75 ЛЕТ
АТОМНОЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ

МОЛОДЕЖЬ В НАУКЕ

СБОРНИК ДОКЛАДОВ

XVIII НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

**ФГУП «Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский институт
экспериментальной физики»**

МОЛОДЕЖЬ В НАУКЕ

Сборник докладов

18-й научно-технической конференции
29–31 октября 2019 г.

г. Саров
2020

УДК 001
ББК 72
М-75

Авторы-составители: Н. Н. Попова, Е. М. Порошин, Т. Б. Григорьева, А. Э. Размыслова, Д. А. Рудаков, Д. В. Сплюхин
Главный научный редактор: д-р физ.-мат. наук В. П. Соловьев
Редакционный совет: д-р техн. наук Мартынов А.П.; д-р физ.-мат. наук В. С. Нефедов;
д-р физ.-мат. наук В. А. Раевский; канд. физ.-мат. наук О. Г. Алексеев;
канд. физ.-мат. наук С. А. Буйко; канд. физ.-мат. наук С. В. Воронцов;
канд. физ.-мат. наук А. Н. Гребенников, канд. физ.-мат. наук И. Е. Пономарев

«Молодежь в науке». Сборник докладов 18-й научно-технической конференции. – Саров:
М-75 ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2020. – 594 с., ил.

ISBN 978-5-9515-0468-5

Научно-техническая конференция «Молодежь в науке» проводится ежегодно.

По рекомендации редакционного совета в сборник вошли 107 докладов, представленные на секциях «Теоретическая и математическая физика», «Экспериментальная физика», «Инженерные науки», «Информационные системы и технологии» молодыми учеными и специалистами:

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» и филиала РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю. Е. Седакова»,

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина», ФГУП «ВНИИА им. Н. Л. Духова», ФГУП «ЭХП», ОАО «ОКБМ Африкантов», Институт спектроскопии РАН, СарФТИ НИЯУ МИФИ.

УДК 001
ББК 72

ISBN 978-5-9515-0468-5 ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2020

Пленарные доклады

ВЛИЯНИЕ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ НА ФОРМУ ЛИЦЕНЗИОННОГО ДОГОВОРА

Т. В. Безрукова

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Цифровой трансформацией называют «внедрение информационных технологий и их широкое использование для повышения эффективности как бизнеса, так и государственных институтов»[1]. Когда говорят о цифровой трансформации бизнеса, часто упоминают о трех ключевых факторах:

– генерация новых знаний при помощи аналитики и больших данных;

– использование цифровых платформ и программного обеспечения (ПО) как основы функционирования организации и предлагаемых ею решений;

– практическое применение концепции интернет-вещей.

Если речь идет о цифровой трансформации государственного сектора, то в первую очередь подразумевают развитие в Российской Федерации цифровой экономики, направленной на «создание условий для развития общества знаний в Российской Федерации, повышение благосостояния и качества жизни граждан нашей страны путем повышения доступности и качества товаров и услуг, произведенных в цифровой экономике с использованием современных цифровых технологий, повышения степени информированности и цифровой грамотности, улучшения доступности и качества государственных услуг для граждан, а также безопасности как внутри страны, так и за ее пределами»[2]. Понятие цифровая экономика впервые упоминается в Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017–2030 гг. [3]. Задача по развитию цифровой экономики также отражена в Указе президента «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» [4].

Цифровая трансформация непосредственно влияет на течение общественных отношений, их содержание, а также правовое регулирование. В связи с тем, что информационные технологии прочно внедрились в жизнь современного общества и привнесли ряд преимуществ для экономического развития, таких как существенное увеличение скорости обмена информации и совершения транзакций, сокращение производственных затрат, модернизация правовых институтов, обеспечивающих регуляцию экономических отношений также неизбежна.

В рамках цифровизации и «революции платформ» [5], когда значения и степень коммерциализации объектов интеллектуальной собственности возрастает, лицензионный договор является одним из наиболее используемых договоров, как самостоятельно, так и в составе комплексных договоров, которые характерны для реализации цифровых услуг, например, на основе облачных вычислений [6]. Право – это главный регулятор общественных отношений в правовом государстве, поэтому правовое регулирование должно соответствовать современной действительности и эффективно адаптироваться к изменениям в жизни общества. Цифровизация в первую очередь, связана со средой реализации договорных отношений, поэтому необходимо рассмотреть, какое влияние данный процесс оказал на форму заключения лицензионных договоров, как действующее законодательство регулирует данный вопрос, какие тенденции цифровой трансформации предполагают дальнейшую модернизацию формы лицензионных договоров, и какие законодательные инициативы могут быть приняты в этой связи.

Согласно пункту 2 статьи 1235 Гражданского Кодекса Российской Федерации (ГК РФ) лицензионный договор должен быть заключен в письменной форме, если ГК РФ не предусмотрено иное [7, статья 1235]. Несоблюдение письменной формы влечет недействительность лицензионного договора. Однако, в настоящее время заключение лицензионных договоров может совершаться и в других формах.

На основании пункта 5 статьи 1286 ГК РФ лицензионный договор с пользователем о предоставлении ему простой (неисключительной) лицензии на использование программы для ЭВМ или базы данных может быть заключен в упрощенном порядке [7, статья 1286]. В таком случае форма соглашения зависит от того, каким образом реализуются указанные объекты. Наиболее распространенным способом реализации программ для ЭВМ, баз данных самостоятельно, либо в составе цифровых продуктов, например, в составе служб облачных вычислений, происходит в сети интернет, что предполагает заключение пользовательского соглашения в электронной форме. Зачастую на этапе регистрации в системе, на персональном устройстве в браузере или при первом запуске экземпляра ПО или базы данных (БД) на экране устройства появляется область, включающая в себя содержания лицензионного договора на использование ПО или БД. Пользователь может согласиться, либо отказаться от исполнения условий по такому договору, о чем делает отметку в специально отведенном поле, после чего продолжает пользоваться программой, либо сталкивается с блокиров-

кой предоставления функциональных возможностей программы в связи с отказом. Такое действие, когда пользователь своим поведением обозначает намерение вступить в определенные отношения, можно квалифицировать как конклюдентное. Конклюдентные действия в гражданском законодательстве предусматриваются и установлены статьями 158, 435, 438 ГК РФ [8, статьи 158, 435, 438]. Также условия лицензионного договора, заключенного в упрощенной форме, могут быть отражены на сайте правообладателя.

Пункт 5 статьи 1286 ГК РФ определяет возможность разместить условия договора на экземпляре или упаковке экземпляра ПО. Начало использования ПО, БД, цифрового продукта, содержащего такое ПО, БД, будет являться акцептом условий лицензионного соглашения. Данное обстоятельство считается конклюдентным действием по смыслу гражданского законодательства Российской Федерации. Стоит отметить, что перечень возможных способов отражения условий лицензионного договора в рассматриваемой статье не является исчерпывающим – возможны и другие способы, например, условия лицензионного договора могут быть отражены в документации на сложный цифровой продукт, в состав которого входят распространяемые ПО и БД, либо непосредственно прилагаться к экземплярам ПО, БД.

Поименованные в пункте 5 статьи 1286 ГК РФ способы указания условий лицензионного договора лицензиаром и их акцепта лицензиатом характерны для реализации ПО, БД на основании OEM-лицензий. OEM-лицензии представляют собой надстройку к приобретаемому пользователем устройству или информационной системе и по российскому законодательству являются сублицензионными договорами. Термин «OEM-лицензия» является заимствованным из западной практики, в частности, такой термин широко использует корпорация Microsoft в рамках реализации предустановленных на персональные компьютеры операционные системы.

Отдельного внимания в рамках цифровизации заслуживает такой формат лицензионных договоров, как открытые лицензии, предусмотренные статьей 1286.1 ГК РФ: «лицензионный договор, по которому автором или иным правообладателем (лицензиаром) предоставляется лицензиату простая (неисключительная) лицензия на использование произведения науки, литературы или искусства, может быть заключен в упрощенном порядке (открытая лицензия)» [7, статья 1286.1]. Указанная норма ГК РФ определяет открытые лицензии как договор присоединения. Все условия открытой лицензий должны быть доступны неопределенному кругу лиц и размещены таким образом, чтобы лицензиат ознакомился с ними перед началом использования соответствующих произведений. Письменная форма договора считается соблюденной в случае указание в лицензии на действия, совершение которых на основании статьи 438 ГК РФ будет считаться акцептом [8, статья 438]. Условия открытой лицензии, как правило, размещают на сайтах правообладателей. Акцепт условий открытой лицензии может быть выражен в конкретном действии лицензиата по осуществлению такого соглашения. Данное обстоятельство существенно увеличивает как коммерческий, так и некоммерческий оборот результатов интеллектуальной деятельности (РИД), позволяя неопределенному кругу лиц получить права на его использование в отсутствие жестких требовании к форме лицензионного договора.

Особый интерес при рассмотрении открытых лицензий представляет институт свободных лицензий, который фактически сложился вне правовой системы Российской Федерации, и не имеет прямого закрепления в российском законодательстве. Свободные лицензии по своей сути являются наиболее близкими к открытым по смыслу и способу реализации. Однако, в связи со спецификой возникновения и осуществления правовой охраны, вопрос о правовом режиме таковых в Российской Федерации остается открытым. Представляется, что основную сложность в определении правового режима составляет противоречие между содержанием отдельных свободных лицензий и положений главы 4 ГК РФ. Исследование подобных противоречий – это тема для отдельной научной работы.

В настоящем докладе обозначим основную причину, лежащую в основе множественности взглядов на проблему. К вопросу об отношениях по реализации свободных лицензий нельзя относиться однозначно, принимая во внимание лишь парадигму отечественной правовой действительности, так как зачастую отношения по реализации свободных лицензий являются многосторонней сделкой, осложненной иностранным элементом, следовательно, к таким соглашениям необходимо применять нормы и принципы международного частного права. Например, условия лицензий таких организаций как Creative Commons, Фонда свободного программного обеспечения (Free Software Foundation), Microsoft, Mozilla и др. используют терминологию, принципы, характерные для права США, а в праве США понятия авторских прав, исключительного права, лицензионного договора отличаются от таковых по законодательству Российской Федерации. Парадоксальным является и то, что право «копилефта», построенное на противоположных праву «копирайта» принципах, и стремящееся нейтрализвать «копирайт» как институт, пытается существовать и развивать идею о свободном использовании РИД именно в рамках парадигмы защиты исключительных прав по смыслу российского законодательства, как бы создавая противоречия в данной парадигме изнутри. Таким образом, для рассматриваемой в докладе темы о форме лицензионного договора стоит сделать следующий вывод: форма свободных лицензий сопоставима с формой открытых лицензий, установленной статьей 1286.1 ГК РФ. Однако, необходимо с осторожностью относиться к поименованию свободных лицензий, как частного случая лицензионного договора в рамках правовой системы Российской Феде-

рации, считая таковые многосторонней сделкой (отношения по использованию РИД между организацией свободного лицензирования, первоначального правообладателя и третьих лиц – пользователей), осложненной иностранным элементом и требующий учета принципов международного частного права и права тех стран, в которой такие свободные лицензии разрабатывались и реализуются.

В России сложилась общая практика для заключения договоров в электронной форме, которая может быть применима и для лицензионных договоров: например, путем согласования его существенных условий в ходе обмена письмами, телеграммами, телексами, телефаксами и иными документами, в том числе электронными документами. Однако, необходимо обратить внимание, что п. 2 ст. 434 ГК РФ [8, статья 434], допускающий такой документооборот, вводит требование о достоверности установления того, что документы исходят от сторон по договору. Данное требование может быть соблюдено в случаях:

– обмена документами, подписанными на основании Федерального Закона от 06.04.2011 № 63-ФЗ «Об электронной подписи» (ФЗ № 63 от 06.04.2011). Согласно данному закону усиленная квалифицированная электронная подпись является аналогом собственноручной подписи лица в электронной среде. Если сторонами применяется иной вид подписи, то таковая будет аналогом, если стороны заключили соглашение об этом, либо на основании закона [9, статьи 5, 6];

– еще один подход связан с применением простой электронной подписи: согласно п. 2 ст. 5 ФЗ № 63 от 06.04.2011 простой считается электронная подпись, которая посредством использования кодов, паролей или иных средств подтверждает факт формирования электронной подписи определенным лицом [9, статья 5]. Исходя из данной нормы, с учетом того, что отдельная учетная запись почтового ящика или иного мессенджера предполагает существование логина и пароля, использование указанных ресурсов для согласования существенных условий договора и его последующего исполнения позволяет установить, что данная переписка исходит от сторон по договору. Такому подходу соответствует судебная практика: в Постановлении Президиума ВАС РФ от 12.11.2013 № 18002/12 по делу № А47-7950/2011 «…получение или отправка сообщения с использованием адреса электронной почты, известного как почта самого лица или служебная почта его компетентного сотрудника, свидетельствует о совершении этих действий самим лицом, пока им не доказано обратное» [10];

– стороны могут заключить рамочный договор, в котором будут указаны реквизиты сторон: адреса электронной почты, номера телефонов сотовой связи, к которым привязаны учетные записи программ-мессенджеров. Таким образом, если при согласовании сторонами условий договора в электронной форме обмен информации происходит с использованием указанных в рамочном договоре электронных адресов, факт, что документы исходят от сторон, считается установленным. Существует мнение, что такое рамочное соглашение может быть заключено и в устной форме: в своей статье «Допустимость электронных средств доказывания в гражданском судопроизводстве» [11] Фейзулла-Заде А.Ю. приводит следующие подход: в соответствии с п. 1, ст. 159 ГК РФ «сделка, для которой законом или соглашением сторон не установлена письменная (простая или нотариальная) форма, может быть совершена устно» [8, статья 159], а в соответствии с п. 2 ст. 158 ГК РФ «сделка, которая может быть совершена устно, считается совершенной и в том случае, когда из поведения лица явствует его воля совершить сделку» [8, статья 158].

Таким образом, соглашение об обмене информации между сторонами в электронной форме может быть заключено в устной форме, а переписка по вопросам заключения и исполнения договора будет являться доказательством наличия договорных отношений между сторонами.

Итак, рассмотренные обстоятельства, при которых лицензионный договор может быть заключен в электронной форме, отвечают существующей парадигме правового регулирования данных отношений. Однако, в рамках цифровизации и популяризации инновационных технологий появляются новые формы заключения лицензионных договоров, которые могут оказаться эффективными.

Примером такой технологии является «блокчейн», особенностью которой является концепция безопасности на уровне баз данных. Блокчейн может быть определен как децентрализованное приложение, которое работает в сети распределенным образом, при этом информация об участниках надежно защищена, а выполнение операций децентрализовано в разных узлах сети.

Концепция цепочек блоков была предложена лицом или группой лиц под псевдонимом Сатоши Накамото (Satoshi Nakamoto) в 2008 г. [12]. Первую реализацию концепция получила в виде биткоинов 2009 г. Биткоин – это криптографическая валюта, «распространяемая посредством компьютерных сетей, в форме уникальных цифровых кодов, имеющая определенную меру стоимости, используемую при расчетах, а также для инвестиций», где блокчейн технология играет роль общего реестра, являющегося главным для всех операций» [13].

В настоящий момент разрабатываются и внедряются решения на основе блокчейн в таких сферах как медицина, в части контроля над производством и реализации лекарств, ведение истории болезни пациентов (США, Израиль, Эстония); регистрация прав собственности (проект Росреестра); электронное голосование (система e-Voting, США); организация электронных правительств (Эстония, Швеция, Грузия, Бразилия); регистрация прав на РИД, контроль над передачей и использованием РИД (зарубежный блокчейн-проект Dot Blockchain совместно с компа-

ниями SOCAN, MediaNet, Songtrust, CD Baby и FUGA, российские проекты ТГУ rupto.io, видеоплатформа Lifechain, система FactFix) [14].

Каким же образом предполагается осуществлять такую регистрацию и контроль? В основе блокчейн лежит технология распределенных реестров. Храмцовская Н.А. приводит определение распределенного реестра, указанное профильным техническим комитетом международной организации по стандартизации (ИСО) ТС307 «Технологии блокчейна и распределенных реестров»: «распределенный реестр (distributed ledger) – реестр, который хранится распределенным, децентрализованным образом на ряде узлов сети, а не централизованно в одном определенном месте»[15]. Недорезков В. В. называет блокчейн «децентрализованной базой данных, записи в которой и их порядок нельзя изменить, ее только можно дополнить»[16]. Харитонова Ю.С. утверждает, что блокчейн технологии могут отвечать стремлениям субъектов предпринимательской деятельности зафиксировать свои права на РИД «наименее затратным и максимально быстрым способом» [17]. Возникает вопрос: если есть возможность зафиксировать в реестре право, то можно ли зафиксировать его переход?

Рассмотрим технологическое устройство блокчейн, принципиально отличающееся от базы данных в классическом понимании.

Первый признак отличия – это критерий высокого уровня сохранности данных, второй – возможность обрабатывать почти неограниченные объемы информации. Именно данные признаки сделали блокчейн популярной технологией во всем мире.

Высокий уровень безопасности данных достигается за счет технологического устройства блокчейн. Фактически блокчейн – это «цепочка блоков или другими словами связный список. В таком списке каждая следующая запись ссылается на одну предыдущую и так по цепочке до самой первой» [18].

Третий признак относится к представлению данных – запись в цепочке блокчейн – это код, который называется хеш. Хеш – это однозначный набор символов, полученный в процессе кодирования, «хеширования». Захешированным может быть любой объем информации, как слово из нескольких букв, так и том романа Толстого Л. Н. «Война и Мир». Закодированные данные будут представлены строчкой одинаковой длины, но разного состава символов, как для первого, так и для второго случая.

Стоит отметить, что безопасность блокчейн обеспечена еще и тем, что каждая запись в блокчейн или связана со сложным математическим уравнением, решение которого добавляется в конец информационной строки, которая должна быть захеширована, или предполагается, что итоговый хеш всей записи состоит из определенного набора символов, например, должно начинаться с 10 нулей. Такое число в блокчейн называют «числом nonce».

Число nonce – это «однократно используемое число (от англ. *nonce* — «number that can only be used once» – число, которое может быть использовано один раз). В криптографии – это одноразовый код, выбранный случайным или псевдослучайным образом, который используется для безопасной передачи основного пароля, предотвращая атаку повторного воспроизведения. В отличие от случайных чисел, здесь не требуется непредсказуемости числа, достаточно неповторяемости» [19].

Таким образом, злоумышленникам не представляется возможным изменить запись в блокчейн, для этого потребуется раскодировать всю цепочку хешэй, решить все связанные с ними математические задачи и внести редакцию во все копии реестра, так как пятым признаком, отличающим блокчейн от обычной базы данных, является децентрализованный способ хранения реестра на требуемом числе копий.

Итак, в рамках фиксации прав на объекты права интеллектуальной собственности (ОИС) в мультимедийных блокчейн системах могут быть захешированы сами ОИС и/или информация о них. Захешированный ОИС в распределенном реестре блокчейн – это строчка кода, которая свидетельствует о факте существования ОИС, дата, указанная в реестре может являться доказательством существования ОИС в определенный период времени, уникальный ключ пользователя блокчейн позволяет идентифицировать автора / правообладателя ОИС. Таким же образом в блокчейн возможно захешировать информацию, подтверждающую переход прав на ОИС в определенный момент. Роспатент выражает крайнюю заинтересованность во внедрении технологий блокчейн в свою деятельность, что отражено в целях «Публичной декларации целей и задач Федеральной службы по интеллектуальной собственности на 2019 год. Для реализации указанной цели, в том числе предлагается «внедрение технологий блокчейн и искусственного интеллекта в традиционные сферы деятельности Роспатента» [20]. Данная цель обусловлена не только задачами цифровой экономики, но и практической необходимостью, например, по итогам 11 месяцев 2018 года был отмечен рост заявок на регистрацию товарных знаков в количестве 68 629, на 3 % выросло количество заявок на регистрацию изобретений, на 11 % – программ для ЭВМ, баз данных и топологий интегральных микросхем.

Технологическое развитие не стоит на месте, к настоящему моменту существует практика заключении договоров в блокчейн с привлечением банковского сектора, что позволяет не только обмениваться данными в блокчейн, но и совершать платежи. Так, первый в мире договор на экспорт масла в блокчейн был заключен еще в 2016 г. между ирландской компанией Ornua и Seychelles Trading Company при сотрудничестве с банком Barclays и позволяющая вести весь документооборот в блокчейн платформа Wave [21]. В 2016 г. в России ПАО «Авиакопания «Сибирь» (S7 Airlines) и АО «Альфа-Банк» также совершили аккредитивную сделку через блокчейн. При совершении этой сделки были захешированы идентификаторы сделки, включающие ИНН сторон, вид

работ и коммерческие условия – сумма аккредитива, дата его открытия и закрытия. Данная сделка была совершена на базе Ethereum – платформы для создания «децентрализованных онлайн-сервисов на базе блокчейна (децентрализованных приложений), работающих на базе умных контрактов» [22]. Ethereum реализована как единая децентрализованная виртуальная машина. Юридическая значимость действий сторон обеспечена самой технологией блокчейн и применением смарт-контрактов, подкрепленными электронными подписями сторон умного контракта, принимающих или отказывающихся от условий. Оплата контракта в Ethereum производится в обменных единицах платформы, которые называются эфиром (англ. ether). Заявлено, что в отличие от других криптовалют, авторы не ограничивают роль эфира платежами, а предлагают его, например, в качестве средства для обмена ресурсами или регистрации сделок с активами при помощи умных контрактов.

Смарт-контракты – это «компьютерные алгоритмы, предназначенные для заключения и поддержания коммерческих контрактов в технологии блокчейн» [23]. Для обеспечения юридической значимости смарт-контракты должны соответствовать законам государства и содержать в себе условия и ограничения, установленные государством. Как правило, смарт-контракт записывается в блокчейн, где его логика помещается в программный контейнер. Такой блок объединяет все сообщения по конкретному смарт-контракту. Сообщения могут исполнять роль как входов, так и выходов программного кода смарт-контракта, в результате происходят определенные действия вне блокчейн, в реальном или виртуальном мире. В смарт-контракт обязательно входят: блокчейн-платформа, имеющая входы и выходы для внешней среды, технология применения электронных подписей (публичные, приватные ключи) для сторон соглашения, предмет договора и инструменты для его исполнения, криптовалюта, расчетные счета, точное описание условий исполнения договора, утвержденные подписями сторон. В зависимости от того, насколько автоматизирован процесс заключения и исполнения договора, смарт-контракты могут происходить полностью в цифровой среде, иметь копию на бумажном носителе, а также осуществляться преимущественно в письменном виде, но часть положений, например, автоматизированные платежи, происходят в блокчейн. Стоит отметить, что помимо необходимости соблюдения условия о возможности идентификации сторон по договору, законопроект «о цифровых правах», который может вступить в силу 1 октября 2019 г. признает эквивалентность электронной сделки письменной сделке, если существует возможность отразить копию договора в бумажном виде, что, однако, не соответствует принципам полностью автоматизированного смарт-контракта. На текущий момент в Российской Федерации правовой режим смарт-контрактов не установлен, однако, законопроект «о цифровых правах», конкретизирует понятие, называя смарт-контракт самоисполняемой сделкой, и легитимирует его применение для любых гражданско-правовых договоров [24].

На основании изложенного предполагается, что лицензионные договоры могут быть заключены в цифровом формате на базе блокчейн-платформ с использованием соответствующих условию сделки смарт-контрактов. Развитие блокчейн-платформ актуально для государственного сектора в лице Роспатента, в особенности, для ОИС, требующих государственной регистрации или для «факультативной» [17] регистрации при участии государственных органов на основании п. 7 ст. 1232 ГК РФ [7, статья 1232]. Для частного сектора можно создать условия для государственной аккредитации информационных систем, развернутых на таких блокчейн-платформах, целью которых могла бы стать фиксация прав на ОИС, не требующих государственной регистрации, и перехода прав на такие ОИС. Одной из функциональных возможностей подобной системы могло бы стать заключение лицензионных договоров на зарегистрированные в блокчейн-платформе ОИС. Однако, до тех пор, пока в Российской Федерации не будет установлено правовое регулирование полностью автоматизированных смарт-контрактов и криптовалют, потенциал блокчейн-платформ не может быть использован в полном объеме, так как расчеты по полностью автоматизированным сделкам в блокчейн происходят с использованием криптовалюты. На текущий момент из проекта закона «о цифровых правах» были исключены положения о криптовалютах. Предполагается, что данный проект закона будет не эффективен для целей цифровой трансформации в отсутствие правового регулирования криптовалют, в связи с чем требуется принять федеральный закон, устанавливающий правовой режим криптовалют.

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы: ОИС являются одними из самых распространенных объектов гражданского оборота, особенно в цифровой среде. Встречая требования бизнеса об извлечении максимальной прибыли, цифровая трансформация оказывает непосредственное влияние на лицензионный договор, меняя его форму, зачастую упрощая ее.

Существующее правовые нормы и судебная практика свидетельствуют о том, что в Российской Федерации возможно заключать лицензионные договоры в формах, отличных от письменной, но приравненным к ней в силу закона.

В настоящее время в дополнение к федеральным законам, таким как ГК РФ, «Об информации, информатизации и защите информации», «Об электронной подписи», где нашли свое отражение положения, регулирующие общественные отношения в сфере цифровой трансформации, предполагается принятие законопроекта «О цифровых правах», задача которого стать продолжением развития российского законодательства для целей цифровой экономики. Указанный законопроект не решает проблему установления правового регулирования полностью

автоматизированных смарт-контрактов и криптовалют. Предполагается, что данный пробел будет необходимо восполнить в будущем за счет принятия отдельного федерального закона, так как цифровая трансформация предлагает новые решения для государственного, производственного и частного секторов хозяйственной деятельности.

В частности, перспективы развития блокчейн-платформ в области интеллектуальной собственности могут привести к появлению новых форм регистрации ОИС, фиксации прав на ОИС, заключения и исполнения лицензионных договоров, что способно дать массу преимуществ перед используемыми технологиями:

– сохранение целостности данных регистрируемых ОИС,

– возможность обрабатывать неограниченный объем данных,

– существенное увеличение скорости обработки данных при регистрации ОИС, при заключении и исполнении лицензионных договоров.

Литература

1. Цифровая трансформация 2019 [Электронный ресурс]: анонс конференции / CNews. – интернет-издание о высоких технологиях, 2019. Режим доступа: http://events.cnews.ru/events/cifrovaya_transformaciya_2018.shtml, свободный. – Загл. с экрана.

2. Программа «Цифровая экономика Российской Федерации» [Электронный ресурс]: утв. распоряжением правительства от 28.07.2017 № 1632р. Режим доступа: http://static.government.ru/media/files/9gFM4FHj4PsB79I5 v7yLVuPgu4bvR7M0.pdf, свободный. – Загл. с экрана.

3. О Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017–2030 годы [Электронный ресурс]: Указ Президента Российской Федерации от 09.05.2017 г. № 203. Режим доступа: http://www.kremlin.ru/acts/bank/41919, свободный. – Загл. с экрана.

4. О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года [Электронный ресурс]: Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2018 № 204. Режим доступа: http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201805070038, свободный. – Загл. с экрана.

5. Паркер, Джеффри Революция платформ. Как сетевые рынки меняют экономику – и как заставить их работать на вас. М.: Манн, Иванов и Фебер, 2017. С. 304.

6. Савельев А. И. Электронная коммерция в России и за рубежом: правовое регулирование [Электронный ресурс]. М.: Статут, 2014. С. 543. Режим доступа: СПС «Консультант Плюс», платный. – Загл. с экрана.

7. Гражданский Кодекс Российской Федерации. Часть 4 [Электронный ресурс]: федер. закон от 18.12.2006 г. № 230-ФЗ. Принят Государственной Думой 24.11.2006, одобрен Советом Федерации 08.12.2006. Режим доступа: СПС «Консультант Плюс», платный. – Загл. с экрана.

8. Гражданский Кодекс Российской Федерации. Часть 1 [Электронный ресурс]: федер. закон от 30 нояб. 1994 г. № 51-ФЗ. - принят Государственной Думой 21.10.1994. Режим доступа: СПС «Консультант Плюс», свободный. – Загл. с экрана.

9. Об электронной подписи [Электронный ресурс]: федер. закон от 06.04.2011 N 63-ФЗ. - принят Государственной Думой 25.03.2011, одобрен Советом Федерации 30.03.2011. Режим доступа: СПС «Консультант Плюс», свободный. – Загл. с экрана.

10. Постановление Президиума ВАС РФ №18002/12 от 12.11.2013 (А47-7950/2011; 18ап-4738/2012; ф09-8847/12) [Электронный ресурс]: электронный архив судебной практики / Федеральные арбитражные суды. 2019. Режим доступа: http://arbitr.ru/as/pract/post_pres/1_1_50541280-07f7-48b2-b0c0-8d561b047348.html, свободный. – Загл. с экрана.

11. Фейзулла-Заде А. Ю. Допустимость электронных средств доказывания в гражданском судопроизводстве [Электронный ресурс] // Арбитражный и гражданский процесс. 2018. № 6. С. 40–44. Режим доступа: СПС «Консультант Плюс», платный. – Загл. с экрана.

12. Сатоси Накамото [Электронный ресурс] // Интернет-энциклопедия Wikipedia. 2019. Режим доступа: http://new.gramota.ru/spravka/letters/85-rubric-79, свободный. - Загл. с экрана.

13. Лагутин И. ., Сусликов В. Н. Правовое обеспечение блокчейн-технологий (вопросы теории и практики) [Электронный ресурс] // Финансовое право. 2017. 1. С. 25–29. Режим доступа: СПС «Консультант Плюс», платный. – Загл. с экрана.

14. Кроме криптовалют: для чего еще используется блокчейн [Электронный ресурс] // Ресурс для IT-специалистов / компания «ТМ», 2018. Режим доступа: http://new.gramota.ru/spravka/letters/85-rubric-79, свободный. – Загл. с экрана.

15. Храмцовская Н. А. Технология блокчейна как инструмент управления документами и электронного документооборота [Электронный ресурс] // Делопроизводство. 2018. № 3 Режим доступа: СПС «КонсультантПлюс», платный. – Загл. с экрана.

16. Недорезков В. В. Криптовалюты на базе технологии блокчейна [Электронный ресурс] // Банковское право. 2017. № 4. Режим доступа: СПС «КонсультантПлюс», платный.– Загл. с экрана;

17. Харитонова Ю. С. Правовое значение фиксации интеллектуального права с помощью технологий распределенных реестров [Электронный ресурс] / Право и экономика. 2018. № 1. С. 15–21. Режим доступа: СПС «КонсультантПлюс», платный. – Загл. с экрана;

18. Блокчейн изнутри: как устроен биткоин [Электронный ресурс] // Итернет-блог. Режим доступа: https://vas3k.ru/blog/blockchain/, свободный. – Загл. с экрана;

19. Nonce [Электронный ресурс] // Интернет-энциклопедия Wikipedia, 2019. Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Nonce, свободный. – Загл. с экрана;

20. Публичная декларация целей и задач Федеральной службы по интеллектуальной собственности на 2019 год [Электронный ресурс]: утверждена руководителем Федеральной службы по интеллектуальной собственности 03.04.2019. Режим доступа: https://rupto.ru/content/uploadfiles/publ-dec-2019.pdf, свободный. – Загл. с экрана;

21. Сделки с использованием технологии блокчейн [Электронный ресурс] // Юридический портал. ООО «Издательская группа “Закон”», 2016. Режим доступа: https://zakon.ru/blog/2016/11/22/sdelki_s_ispolzovaniem_tehnologii_blokchejn, свободный. - Загл. с экрана;

22. Ethereum [Электронный ресурс] // Интернет-энциклопедия Wikipedia, 2019. Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Ethereum, свободный. - Загл. с экрана;

23. Смарт-контракт [Электронный ресурс] // Интернет-энциклопедия Wikipedia, 2019. Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BC%D0%B0%D1%80%D1%82-%D0%BA%D0%BE%D0%BD% D1%82%D1%80%D0%B0%D0%BA%D1%82, свободный. - Загл. с экрана;

24. Законопроект о «цифровых правах» и «цифровых деньгах» рекомендован ко второму чтению [Электронный ресурс] // Экономика и жизнь, 2019. – Режим доступа: https://www.eg-online.ru/news/394080/, свободный. - Загл. с экрана.

ПРОГРАММНОЕ СРЕДСТВО «RESOURCE». МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И НАКОПЛЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПРИ СЛОЖНЫХ РЕЖИМАХ МАЛОЦИКЛОВОГО НАГРУЖЕНИЯ

М. А. Десятникова

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Одной из задач современных отраслей промышленности является обоснование ресурса оборудования и систем инженерных объектов на стадии их проектирования, оценка выработанного и прогноз остаточного ресурса конструктивных узлов в процессе эксплуатации. Известно, что для оценки ресурса элементов конструкций необходимо правильное моделирование процессов упругопластического деформирования и накопления повреждений в «опасных» точках конструкций при эксплуатационных термомеханических воздействиях. В последние годы для решения задач описания процессов деформирования и разрушения материалов часто применяется механика поврежденной среды (МПС).

В рамках настоящей работы для расчета усталостной долговечности материалов при сложном нагружении рассматриваются соотношения механики поврежденной среды (МПС), предложенные профессором Ю. Г. Коротких [1]–[2], и развитые в работах И. А. Волкова и его учеников [3], [4]. Модель поврежденной средысостоит из трех взаимосвязанных частей: соотношений, определяющих термопластическое поведение материала с учетом зависимости от процесса разрушения, уравнений, описывающих процесс накопления повреждений и критерия прочности поврежденного материала.

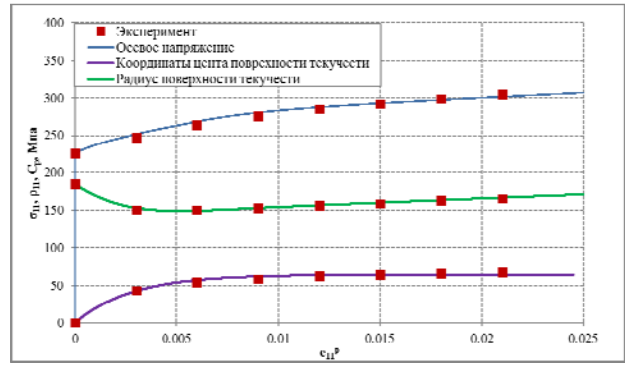
Для анализакинетики напряженно-деформированного состояния и процесса накопления повреждениив «опасных» точках конструкций было разработанопрограммное средство «Resource» (ПС Resource), которое позволяет по заданной истории изменения тензора полных деформаций и температуры рассчитывать параметры процессов упругопластического деформирования и накопления усталостных повреждений в конструкционных материалах при сложных режимах малоциклового нагружения путем совместного интегрирования определяющих соотношений термопластичности Ю. Г. Коротких и эволюционных уравнений накопления повреждений для элементарного объема материала опасной зоны конструктивного элемента.

Для проверки работоспособности ПС Resource проведена серия расчетов и сопоставление полученных численных результатов с имеющимися в литературе экспериментальными данными на широком классе сложных траекторий нагружения произвольной кривизны. В рамках данной работы остановимся на некоторых результатах, демонстрирующих функциональные возможности ПС Resource.

Моделирование процесса одноосного растяжения трубчатых образцов при различных постоянных температурах

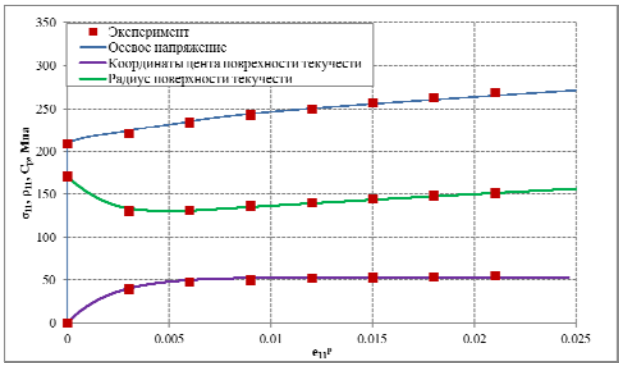
Рассмотрим процесс изотермического упругопластического деформирования рабочей части цилиндрических трубчатых образцов, изготовленных из конструкционной стали 08Х18Н10Т, при монотонном одноосном растяжении с постоянной скоростью деформации при нормальной (20 °С) и повышенных температурах (150 °С, 350 °С).

На рис. 1 для базовых температур 20 °С, 150 °С, 350 °С приведены расчетные и экспериментальные диаграммы деформирования $\sigma_{11}\left(e_{11}^{p}\right)$, $\rho_{11}\left(e_{11}^{p}\right)$, $C_{p}\left(e_{11}^{p}\right)$ в рабочей части лабораторного образца, выполненного из стали 08Х18Н10Т. На данных рисунках сплошные линии соответствуют расчетным данным, маркерами выделены экспериментальные данные, взятые из [1]. Основные физико-механические характеристики и параметры модели Ю. Г. Коротких для стали 08Х18Н10Т взяты из монографии [1].

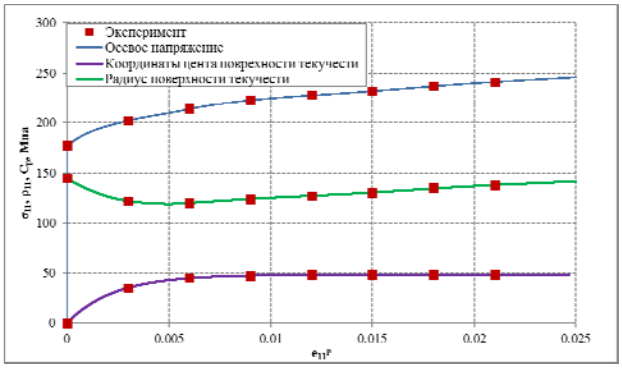


а

Рис. 1. Расчетные и экспериментальные диаграммы деформирования для базовых температур: а – 20 °С, б – 150 °С, в – 350 °С



б



в

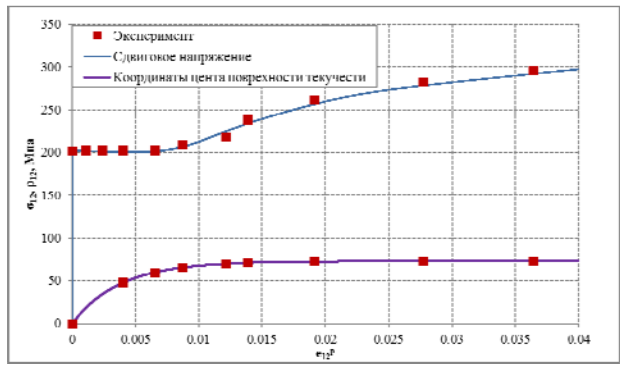
Рис. 1. (Окончание)

Анализ рисунков показывает хорошее качественное и количественное соответствие расчетных и экспериментальных результатов моделирования монотонного растяжения образцов при постоянной температуре. Среднее относительное отклонение между расчетными и экспериментальными значениями осевого напряжения не превышает 1,06 %, значениями координат центра поверхности текучести не превышает 2,62 %, значениями радиуса поверхности текучести не превышает 0,99 %.

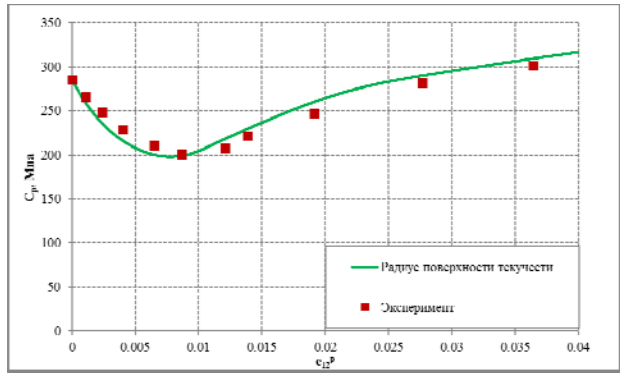
Моделирование процессачистого кручения трубчатых образцов при постоянной температуре

Рассмотрим процесс изотермического упругопластического деформирования рабочей части цилиндрических трубчатых образцов, изготовленных из стали 45, при чистом кручении с постоянной скоростью деформациипри нормальной (20 °С) температуре.

На рис. 2 приведены расчетные и экспериментальные диаграммы деформирования $\sigma_{12}\left(e_{12}^{p}\right)$, $\rho_{12}\left(e_{12}^{p}\right)$, $C_p\left(e_{12}^{p}\right)$ в рабочей части лабораторного образца, выполненного из стали 45, при чистом кручении для базовой температуры 20 °С. На данных рисунках сплошные линии соответствуют расчетным данным, маркерами выделены экспериментальные данные, взятые из [3]. Основные физико-механические характеристики и параметры модели Ю. Г. Коротких для стали 45 взяты из монографии [3].



а



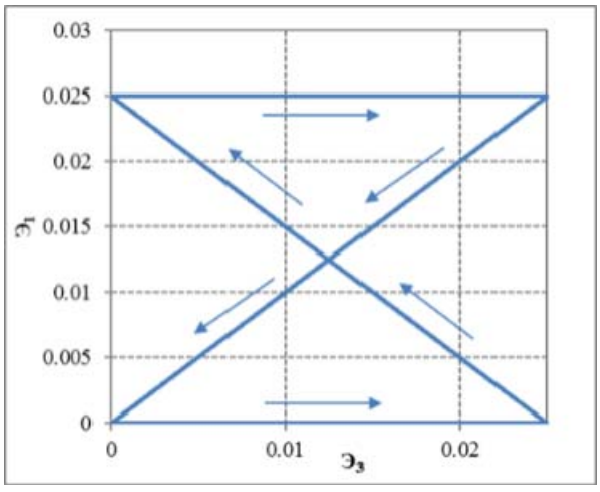
б

Рис. 2. Расчетные и экспериментальные диаграммы деформирования: а – зависимость напряжения и координат центра поверхности текучести от пластической деформации, б – зависимость радиуса поверхности текучести от пластической деформации.

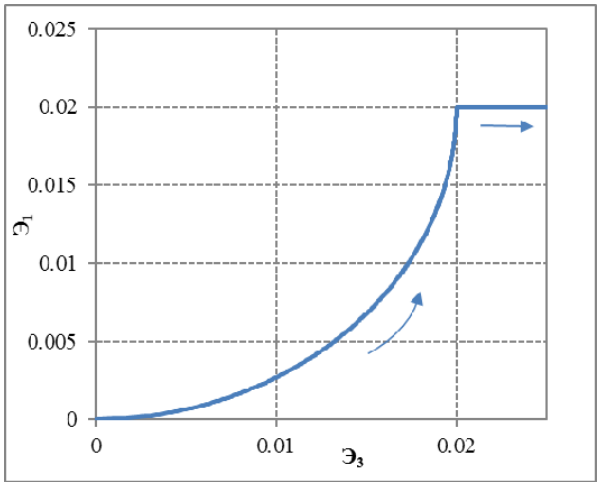
Анализ расчетных данных показывает хорошее качественное и количественное соответствие расчетных и экспериментальных результатов моделирования чистого кручения образцов при постоянной температуре. Среднее относительное отклонение между расчетными и экспериментальными значениями сдвигового напряжения не превышает 1,31 %, значениями координат центра поверхности текучести непревышает 0,46 %, значениями радиуса поверхности текучести не превышает 3,36 %.

Моделирование сложного пластического деформирования конструкционных сплавов по плоским траекториям

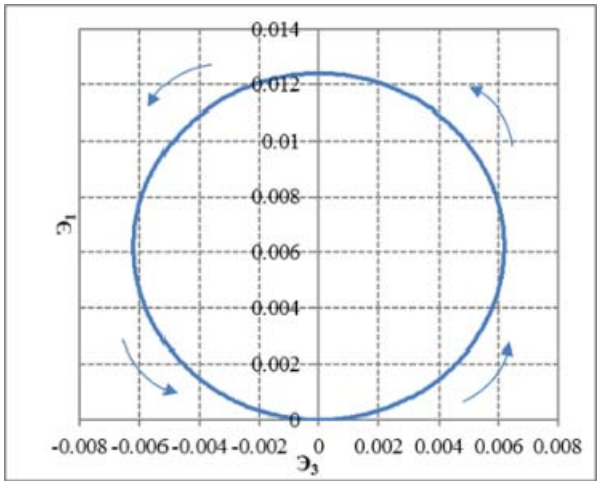
Рассмотрим процесс изотермического упругопластического деформирования рабочей части цилиндрических трубчатых образцов, изготовленных из стали 45, по плоским траекториям: траектории деформирования типа «песочные часы», ломаной нетривиальной траектории деформирования и криволинейной траектории постоянной кривизны в пятимерном девиаторном пространстве деформаций А. А. Илюшина (рис. 3).



а



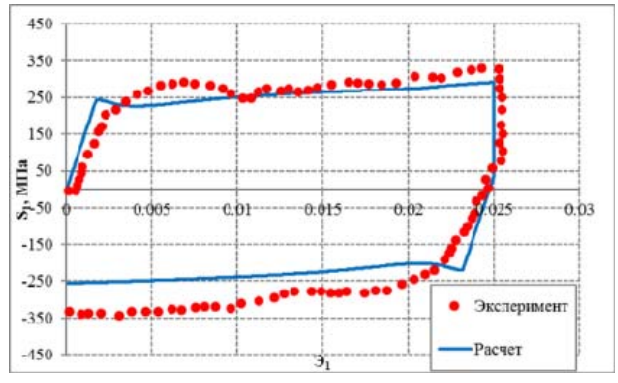
б



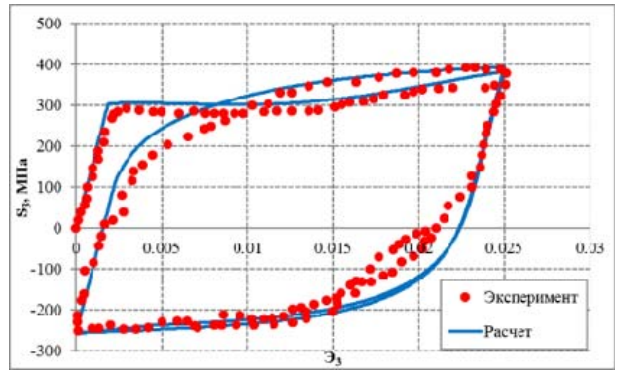
в

Рис. 3. Траектории сложного нагружения

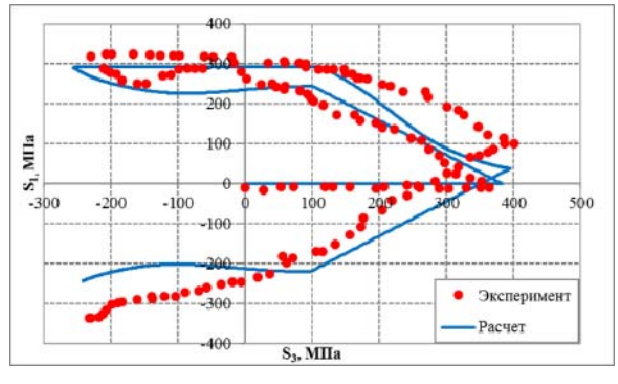
ванным на рис. 3а, 3б, 3в соответственно. На рисунках маркированными линиями обозначены экспериментальные данные [5], сплошными линиями – результаты расчета. Основные физико-механические характеристики и параметры модели Ю.Г. Коротких для стали 45 взяты из монографии [1].



а



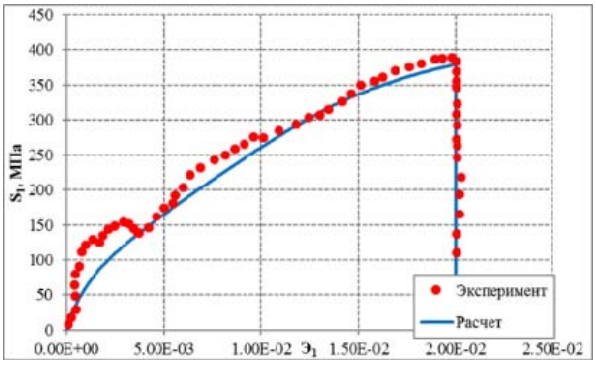
б



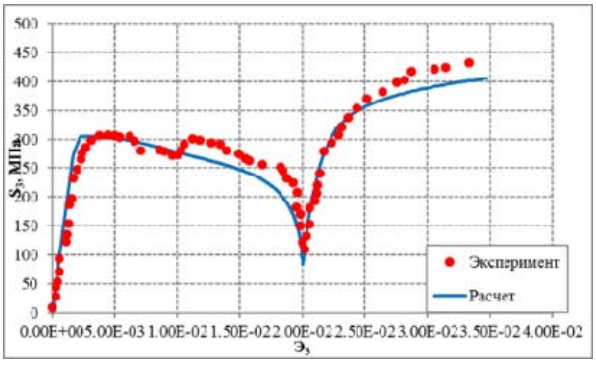
в

Рис. 4. Результаты численного моделирования: а – диаграмма деформирования $S_1 \sim Э_1$, б – диаграмма деформирования $S_3 \sim Э_3$, в – траектория напряжений $S_1 \sim S_3$

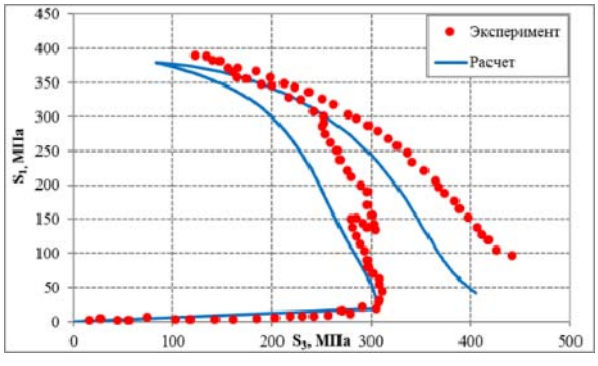
На рис.4, 5, 6 приведены локальные диаграммы деформирования стали 45и траектория напряжений, соответствующиереализованным в пространстве деформаций траекторий нагружения, продемонстриро-



а

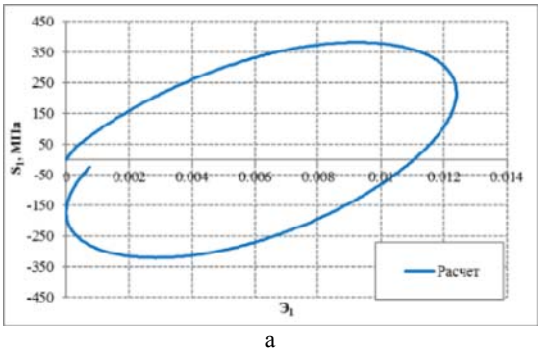


б



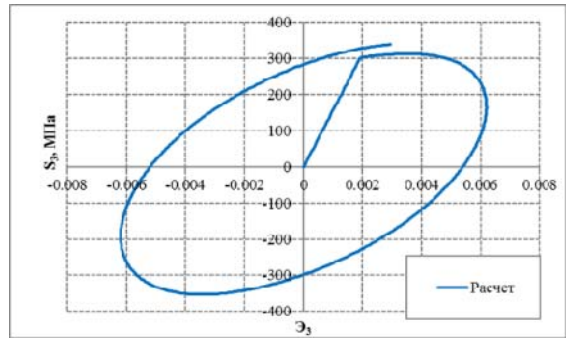
в

Рис. 5. Результаты численного моделирования: а – диаграмма деформирования $S_1 \sim Э_1$, б – диаграмма деформирования $S_3 \sim Э_3$, в – траектория напряжений $S_1 \sim S_3$

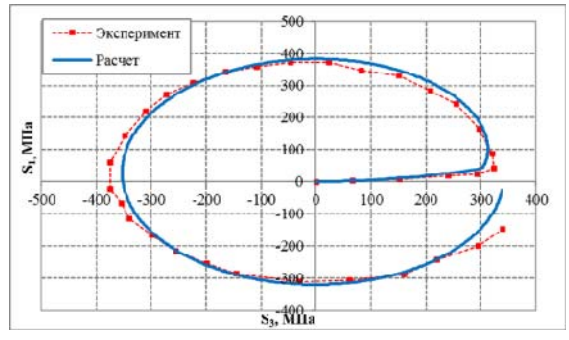


а

Рис. 6. Результаты численного моделирования: а – диаграмма деформирования $S_1 \sim Э_1$, б – диаграмма деформирования $S_3 \sim Э_3$, в –траектория напряжений $S_1 \sim S_3$



б



в

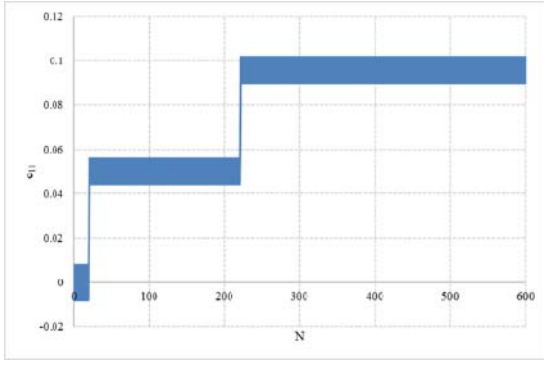
Рис. 6. (Окончание)

Анализ рисунков показывает качественное и приемлемое для инженерных расчетов количественное соответствие опытных данных и результатов расчета параметров процесса упругопластического деформирования по плоским траекториям различной кривизны. Среднее относительное отклонение между расчетными и экспериментальными значениями компонент тензора напряжений (S_1, S_3) при деформировании по плоским траекториям не превышает 12,73 %. Отклонения расчетных значений от экспериментальных можно объяснить неточностями при задании параметров материала.

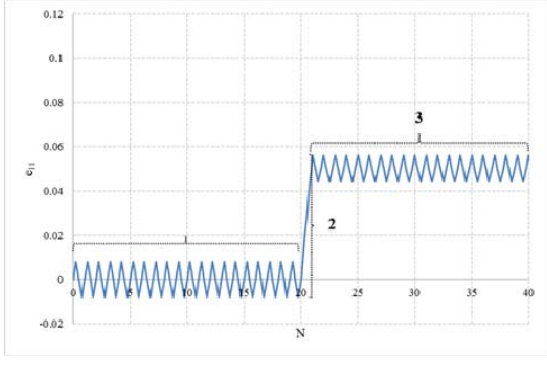
Моделирование сложного пластического деформирования при блочном несимметричном нагружении

Рассмотрим процесс изотермического упругопластического деформирования рабочей части цилиндрических трубчатых образцов, изготовленных из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, в условиях блочного симметричного и несимметричного режимов нагружения, продемонстрированных на рис. 7 [4]. Программа нагружения состоит из пяти блоков, включающих в себя монотонные и циклические нагружения [4]: в первом блоке реализуется 20 циклов симметричного жесткого циклического нагружения с амплитудой деформации e_{11}= 0,008 (рис. 7б); во втором блоке происходит монотонное растяжение до деформации e_{11}= 0,05 (рис. 7б); в третьем блоке реализуется 200 циклов несимметричного циклического нагружения с размахом деформации Δe_{11}= 0,012 и

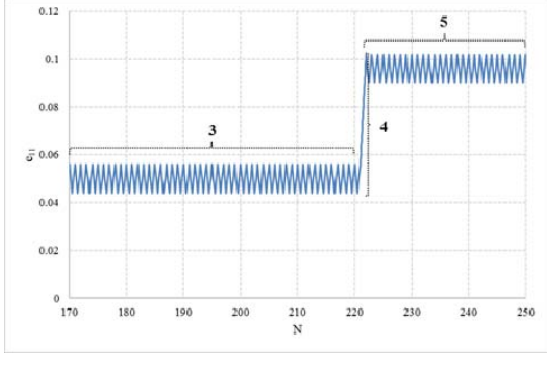
средней деформацией e_{11}= 0,05 (рис. 7б, 7в); в четвертом блоке вновь реализуется монотонное растяжение до деформации e_{11}= 0,1 (рис. 7в); в пятом блоке происходит несимметричное циклическое нагружение с размахом деформаций Δe_{11}= 0,012 и средней деформаций e_{11}= 0,096 до образования макротрещины (рис. 7в). Основные физико-механические характеристики и параметры модели термопластичности Ю. Г. Коротких для стали 12Х18Н10Т были взяты из статьи [4].



а



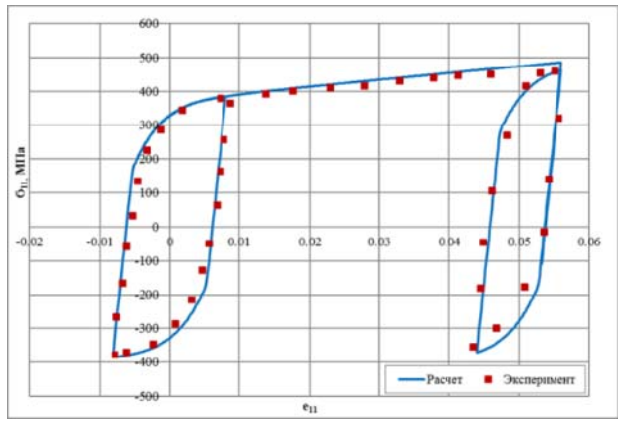
б



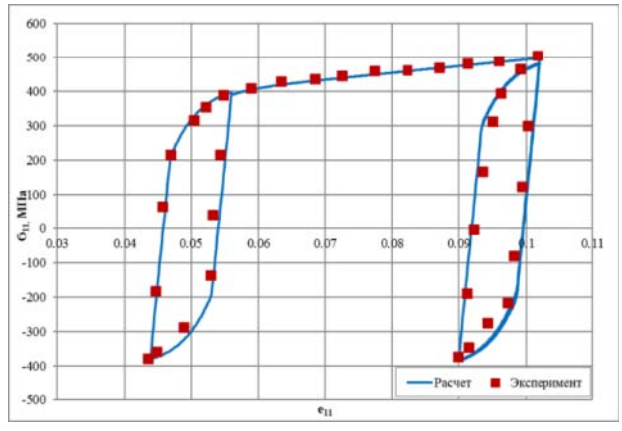
в

Рис. 7. Программа нагружения: а – полная, б – фрагмент № 1, в – фрагмент № 2

На рис. 8 продемонстрированы диаграммы деформирования стали 12Х18Н10Т в условиях блочного симметричного и несимметричного режимов нагружения. Маркерами отмечены результаты эксперимента [4], сплошными линиями – результаты расчета.



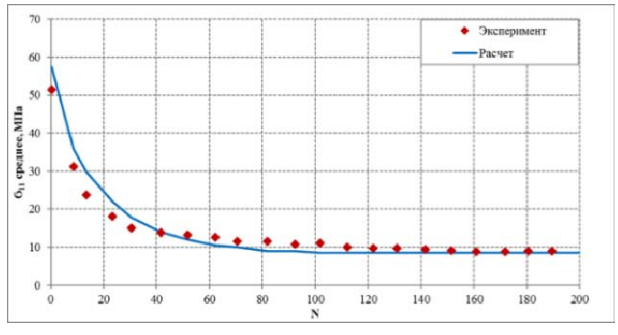
а



б

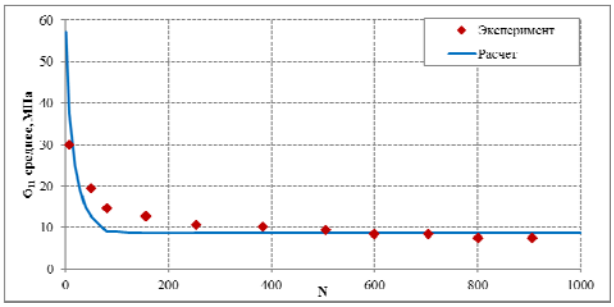
Рис. 8. Диаграмма деформирования: а – в конце первого, втором и начале третьего блоках нагружения, б – в конце третьего, четвертом и начале пятого блоках нагружения

На рис. 9 продемонстрированы средние значения осевого напряжения в цикле в зависимости от номера цикла в третьем и пятом блоках несимметричного циклического нагружения. Полученные результаты показывают процесс посадки петли пластического гистерезиса в условиях несимметричного циклического нагружения.



а

Рис. 9. Зависимость среднего значения напряжения в цикле от номера цикла: а – в третьем блоке, б – в пятом блоке несимметричного циклического нагружения



б

Рис. 9. (Окончание)

Исследование процесса накопления усталостных повреждений при нагружении с контролируемой амплитудой пластической деформации

Рассмотрим процесс изотермического упругопластического деформирования и накопления усталостных повреждений в рабочей части трубчатых образцов, изготовленных из конструкционной стали 08Х18Н10Т, при нормальной температуре (20 °С) при симметричном нагружении в условиях контролируемой знакопеременной осевой пластической деформации с использованием одной и двух значений амплитуд, изменяющихся как в увеличивающимся, так и в уменьшающемся порядке.

Для анализа процесса накопления повреждений в рамках ПС Resourcereализован подход, основанный на установлении связи скорости величины поврежденности ω с некоторыми механическими параметрами, зависящими от истории процесса деформирования, критическое значение которых определяет момент полного разрушения элементарного объема материала. Наиболее эффективным подходом решения этой проблемы является энергетический подход [1]. За энергию разрушения W_p (энергию, затраченную на образование дефектов) принимается соотношение [1]:

$$W_p = \rho_{ij}\dot{e}^p_{ij} \qquad (1)$$

Постулируется, что скорость процесса накопления повреждений определяется эволюционным уравнением в виде [2]:

$$\dot{\omega} = \frac{\alpha+1}{r+1} f(\beta) Z_p^{\alpha} (1-\omega)^{-r} \langle Z_p \rangle$$

$$Z_p = \frac{W_p - W_a}{W^f{}_p - W_a}, \langle Z_p \rangle = \frac{\langle W_p \rangle}{W^f{}_p - W_a}, f(\beta) = e^{k\beta} \qquad (2)$$

где α, r, k – материальные параметры, W_a – значение энергии W_p в конце стадии зарождения рассеянных повреждений, W_f^p – значение энергии W_p, соответствующее образованию макроскопической трещины, $f(\beta)$ – функция, характеризующая влияние вида напряженно-деформированного состояния на процесс развития поврежденности, $\beta = \sigma/\sigma_u$ – параметр объемности напряженного состояния.

В табл. 1 приведены результаты расчета усталостной долговечности для симметричных режимов нагружения в условиях контролируемой знакопеременной осевой пластической деформации и их сравнение с экспериментальными результатами [3]. В табл. 1 приведены экспериментальные значения амплитуд пластической деформации $\left(e_{11}^p\right)$, расчетное $\left(N_f\right)$, экспериментальное $\left(N_f^{\exp}\right)$ и среднее экспериментальное $\left(N_f^{\exp-сред}\right)$ количество циклов до разрушения, относительное отклонение $\left(\delta_{N_f^{\exp-сред}}\right)$ количества циклов до разрушения, полученных по ПС Resource, от средних экспериментальных значений. Основные физико-механические характеристики и параметры модели Ю. Г. Коротких для стали 08Х18Н10Т были взяты из монографий [1], [3]. Значение энергии повреждения, соответствующее образованию макроскопической трещины, равно 420 МДж/м^3.

В табл. 2 приведены условия двухблочного циклического нагружения, расчетные и экспериментальные значения числа циклов до зарождения макротрещин при данных режимах, относительное отклонение между результатами расчета и осредненными опытными данными. Анализ табл. 2 показывает, что гипотеза линейного суммирования повреждений [6], лежащая в основе нормативных подходов, может приводить при расчетах долговечности как к консервативной, так и неконсервативной оценке.

Таблица 1

Расчетные и экспериментальные значения числа циклов до разрушения

№	e_{11}^p	$N_f^{\exp}$	N_f	$N_f^{\exp-сред}$	$\delta_{N_f^{\exp-сред}}$, %
1	0,6	285 – 400	287	342	16,08
2	0,4	519 – 710	566	615	7,97
3	0,2	1406 – 2262	2080	1834	13,41

Таблица 2

Расчетные и экспериментальные значения числа циклов до разрушения при блочных режимах нагружения

№	Блок № 1		Блок №			N_f	$\delta_{N_f^{\exp-сред}}$, %	$\sum \frac{N_i}{N_{fi}}$
	e_{11}^p	$N_f^{\exp}$	e_{11}^p	$N_f^{\exp}$	$N_f^{\exp-сред}$			
1	0,2	1400	0,6	1585 – 1665	1625	1604	1,29	1,384
2	0,2	1400	0,4	1545 – 1735	1590	1626	2,26	1,072
3	0,6	130	0,2	595 – 655	625	651	4,16	0,7034

Исследование влияния вида траектории деформирования на процесс накопления усталостных повреждений

В работе [7] проведены экспериментальные исследования влияния траекторий деформирования на усталостную долговечность стали 08Х18Н10Т при совместном действии знакопеременного кручения и одноосного растяжения-сжатия. В работе [7] рассматривалось 3 вида траекторий деформирования: одноосное растяжение-сжатие, знакопеременное кручение и траектория деформирования по типу «квадрат», состоящая из четырех прямолинейных кусочно-ломаных участков. Обработка экспериментальных результатов с помощью регрессионного анализа позволила получить уравнение регрессии зависимости числа циклов до образования усталостной трещины от амплитуды интенсивности пластической деформации, угла вида деформированного состояния и угла сдвига фаз.

На рис. 10 представлены кривые усталости для различных траекторий деформирования одноосное растяжение-сжатие, кручение, траектория «квадрат»).

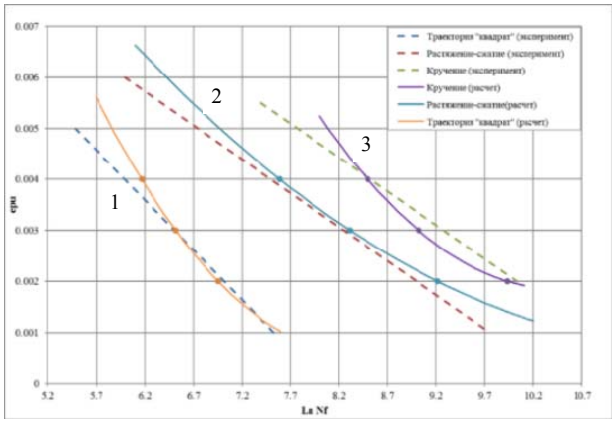
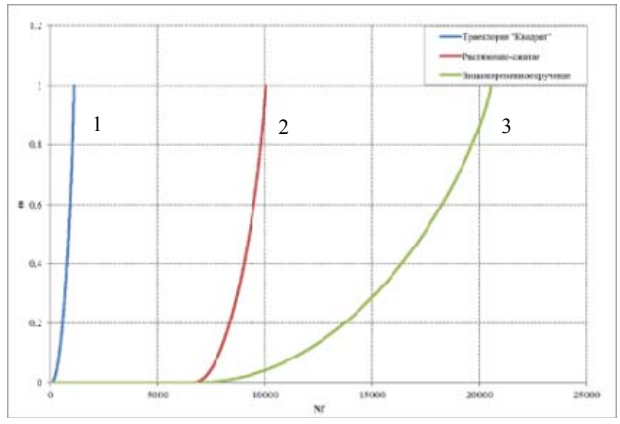


Рис. 10. Экспериментальные регрессионные зависимости $e_u^p \sim LnN_f$ и расчетные кривые МЦУ для различных траекторий деформирования (кривые 1 – траектория «квадрат», 2 – растяжение-сжатие, 3 – кручение)

Пунктирными прямыми отмечены экспериментальные регрессионные зависимости числа циклов до образования макроскопической трещины от амплитуды интенсивности пластических деформаций [7]. Сплошными линиями отмечены соответствующие расчетные кривые малоцикловой усталости. Точками показаны результаты расчетов усталостной долговечности при одинаковой амплитуде интенсивности пластических деформаций для трех рассматриваемых траекторий деформирования. Основные физико-механические характеристики и параметры модели Ю. Г. Коротких для стали 08Х18Н10Т были взяты из монографии [1]. Значение энергии повреждения, соответствующее образованию макроскопической трещины, равно 3685 МДж/м^3.

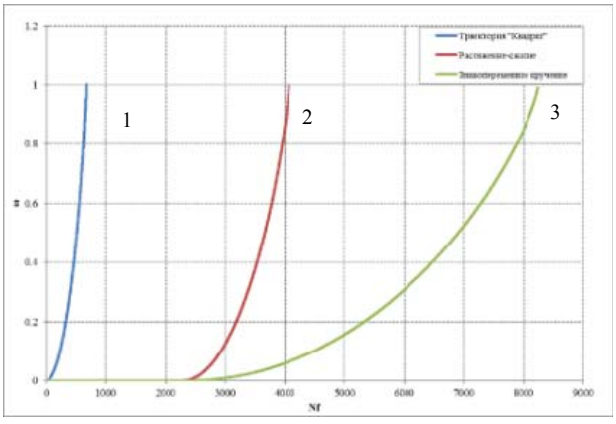
На рис. 11 показаны зависимости величины поврежденности от числа циклов нагружения при одинаковой амплитуде пластических деформаций для трех рассматриваемых траекторий деформирования.



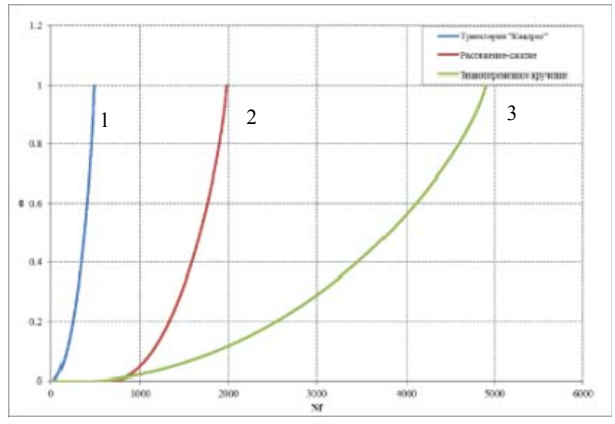
а

Рис. 11. Зависимость развития поврежденности $\omega \sim N$ для амплитуды пластических деформаций: а – $e_{11}^p = 0{,}002$, б – $e_{11}^p = 0{,}003$, в – $e_{11}^p = 0{,}004$. 1 – траектория «квадрат», 2 – растяжение-сжатие, 3 – экспериментальное кручение

(окончание рис. на след стр.)



б



в

Рис. 11. (Окончание). Зависимость развития поврежденности $\omega \sim N$ для амплитуды пластических деформаций: б – $e_{11}^{p} = 0{,}003$, в – $e_{11}^{p} = 0{,}004$. 1 – траектория «квадрат», 2 – растяжение-сжатие, 3 – экспериментальное кручение

Таблица 3

Расчетные и экспериментальные значения числа циклов до разрушения

№	e_{11}^{p}	$e_{11}^{сред}$	$N_f^{\exp}$	N_f	δ,%
1	0,002065	0	7562	8490	12,27
2	0,00291		3406	3711	8,95
3	0,003905		2487	2542	2,21
4	0,004795		1665	1576	5,35
5	0,00573		1104	1125	1,9
6	0,007545		637	661	3,77
7	0,002635	0,08	5562	5467	1,71
8	0,004265	0,08	2673	2155	19,38
9	0,005115	0,08	1517	1401	7,65
10	0,006865	0,08	802	819	2,12
11	0,004541	0,16	1735	1759	1,38

Анализ расчетных данных показывает, что интенсивность полной или пластической деформации не является критериями эквивалентности для процессов малоцикловой усталости, т. к. при совместном действии одноосного растяжения–сжатия и знакопеременного кручения при одной и той же амплитуде пластических деформаций долговечность уменьшается по сравнению с одноосным растяжением-сжатием более чем в 4 раза, а при знакопеременном кручении более чем в 10 раз.

Исследование процесса накопления усталостных повреждений присимметричном и несимметричном жестком нагружении

В работе [8] проведены экспериментальные исследования влияния несимметричности цикла на процесс накопления усталостных повреждений в конструкционных сплавах.

В табл. 3 приведены результаты численного моделирования разрушения стали 45 при симметричном и несимметричном нагружении в условиях контролируемой знакопеременной осевой пластической деформации [8]. В таблице приведены экспериментальные значения амплитуд пластической деформации $\left(e_{11}^{p}\right)$, средняя деформация цикла $\left(e_{11}^{\text{сред}}\right)$, расчетное $\left(N_f\right)$ и экспериментальное $\left(N_f^{\exp}\right)$ количество циклов до разрушения, относительное отклонение количества циклов до разрушения, полученных по ПС Resource, от экспериментальных значений (δ). Основные физико-механические характеристики и параметры модели Ю. Г. Коротких для стали 45 были взяты из монографии [3]. Значение энергии повреждения, соответствующее образованию макроскопической трещины, равно 1450 МДж/м^3.

Влияние несимметричности при жестком циклическом нагружении стали 45 продемонстрировано на рис. 12. На данном рисунке сплошная кривая соответствует расчету при симметричном нагружении, пунктирная линия кривая соответствует расчету при несимметричном нагружении, маркерами отмечены результаты экспериментов [8].

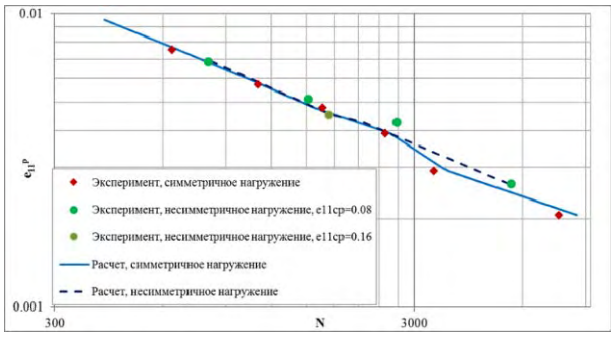


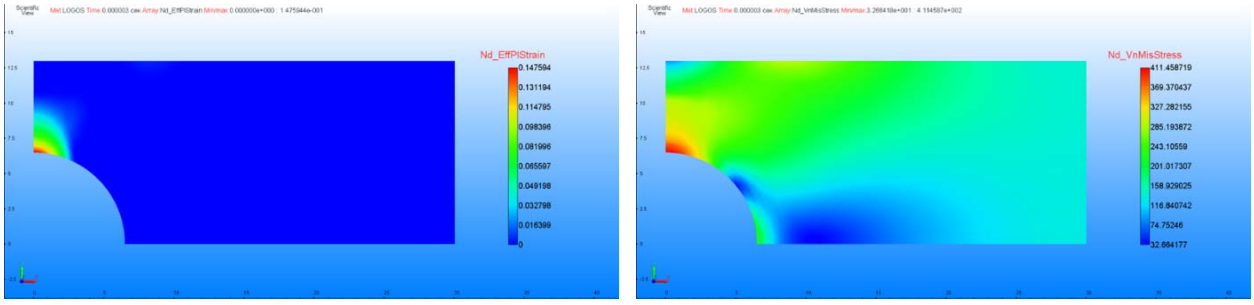
Рис. 12. Расчетная и экспериментальная усталостные кривые при жестком симметричном и несимметричном циклическом нагружении стали 45

Полученные результаты иллюстрируют незначительное влияние несимметричности циклического нагружения при жестком нагружении, что подтверждается результатами экспериментов [8].

Численный анализ усталостной долговечности полосы с круглым отверстием при малоцикловом нагружении

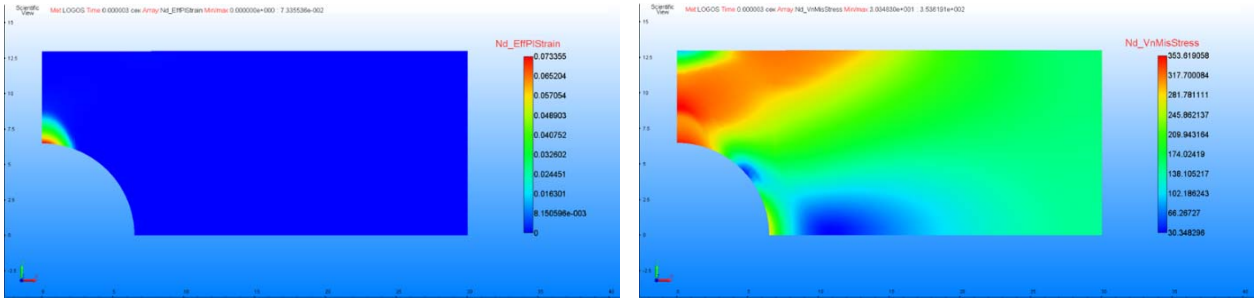
Рассмотрим процесс изотермического упругопластического деформирования и накопления усталостных повреждений в полосе с круглым отверстием, выполненной из нержавеющей стали 304, в условиях циклического знакопеременного нагружения [3], [9]. На концах полосы приложено осевое усилие, циклически изменяющееся между максимальным и минимальным значением с постоянной амплитудой. Амплитудные значения в симметричном цикле нагружения изменялись в диапазоне от -20 кН до 20 кН; при несимметричном цикле – от -10 кН до 20 кН.

На рис. 13, 14 приведено распределение интенсивности пластических деформаций и интенсивности напряжений в конце 10-го цикла для симметричного и несимметричного режимов нагруженияосоответственно. Максимальные значения рассматриваемых величин наблюдаются у основания отверстия (наиболее нагруженная зона).



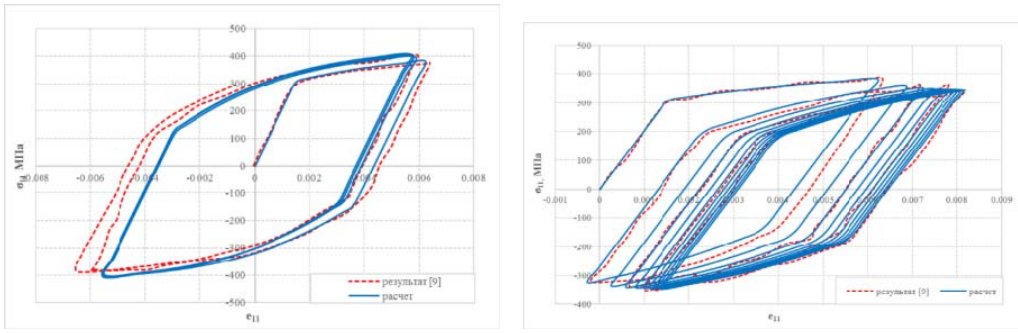
а б

Рис. 13. Распределение полей в конце 10-го цикла симметричного режима нагружения: а – интенсивность пластических деформаций; б – интенсивность напряжений



а б

Рис. 14. Распределение полей в конце 10-го цикла несимметричного режима нагружения: а – интенсивность пластических деформаций; б – интенсивность напряжений



а б

Рис. 15. Диаграмма деформирования для: а – симметричного режима нагружения, б – несимметричного режима нагружения

Таблица 4

Усталостная долговечность полосы с отверстием

Режим нагружения	Количество циклов до разрушения,			Относительное отклонение	
	Результат [3]	Результат [9]	Расчет	$\delta_{[3]}$,%	$\delta_{[9]}$,%
Симметричный режим	1669	1850	1848	10,72	0,11
Несимметричный режим	6560	6900	6301	3,95	8,68

На рис. 15 для наиболее нагруженной зоны показаны расчетные зависимости осевого напряжения от осевой деформации для симметричного и несимметричного циклов нагружения в сравнении с результатами, приведенными в [9].

В табл. 4 приведен совокупный анализ усталостной долговечности полосы с отверстием при симметричном и несимметричном нагружении: расчетное количество циклов до образования макроскопической трещины, полученное по ПС Resource, расчетные данные из [3], [9].

Заключение

В работе приведено описание ПС Resource, предназначенного для моделирования процессов деформирования и накопления усталостных повреждений в опасных зонах конструктивных элементов оборудования по фактической истории их термомеханического нагружения, соответствующей как нормальным, так и аварийным условиям эксплуатации. К основным областям применения разработанного программного средства относится авиастроение, автомобилестроение, атомная энергетика, авиационное двигателестроение.

ПС Resource позволяет учитывать: монотонное и циклическое упрочнение конструкционных материалов при пропорциональном и непропорциональном нагружении, особенности деформирования и процесса «посадки» петли пластического гистерезиса при несимметричных режимах нагружения, пластическую анизотропию, многоосность напряженного состояния, влияние вида траекторий деформирования на усталостную долговечность, нелинейность процесса накопления повреждений. По погрешности результатов расчета ПС Resource относится к средствам проведения инженерных расчетов

Литература

1.Волков И. А., Коротких Ю. Г. Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями. М.: Физматлит, 2008. С.424.

2. Коротких Ю. Г. Описание процессов накопления повреждений материала при неизотермическом вязкопластическом деформировании // Проблемы прочности.1985. Вып.1. С. 18–23.

3. Волков И. А., Игумнов Л. А. Введение в континуальную механику поврежденной среды. М.: Физматлит, 2017. С. 304.

4. Волков И. А., Игумнов Л. А., Тарасов И. С., Шишулин Д. Н., Маркова М. Т. Моделирование усталостной долговечности поликристаллических конструкционных сплавов при блочном несимметричном малоцикловом нагружении // Проблемы прочности и пластичности. 2018. Т. 80, № 1. С. 15–30.

5. Зубчанинов В. Г., Охлопков Н. П., Гараников В. В. Экспериментальная пластичность. Процессы сложного нагружения. Тверь: ТГТУ, 2003. Кн. 1. С. 172.

6. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. ПН АЭ Г-7-008-86. М.: Энергоатомиздат, 1989. С. 124.

7. Казаков Д. А., Капустин С. А., Коротких Ю. Г. Моделирование процессов деформирования и разрушения материалов и конструкций. Н. Новгород: ННГУ, 1999. С. 25.

8. Yand X. Low cycle fatigue and cyclic stress ratheting failure behavior of carbon steel 45 under uniaxial cyclic loading // International Journal of Fatigue. 2005. N. 27. P. 1124–1132.

9. Sosie D. Critical plane approaches for multiaxial fatigue damage assessment // American society for testing and materials. 1993. N. 1191. P. 7–36.

РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЯ МАКЕТА СИСТЕМЫ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ УТИЛИЗАЦИИ РАДИОЛИТИЧЕСКОГО ГАЗА, ОБРАЗУЮЩЕГОСЯ В ТОПЛИВНОМ РАСТВОРЕ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

Н. А. Шлячков, В. Ю. Волгутов, А. Р. Дягель, Д. А. Юнин, О. А. Жилкина, Е. Н. Беспалова, А. А. Пикулев

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородская обл.

Введение

Растворные исследовательские ядерные реакторы (ИЯР) являются одним из эффективных инструментов для проведения исследований и испытаний материалов, приборов и узлов конструкций на радиационную стойкость при их разработке, а также при получении изотопов, используемых в разных сферах научно-технической деятельности: ^{99}Mo, ^{89}Sr, ^{133}Xe, ^{131}I и др.

В качестве ядерного топлива в растворных ИЯР применяют растворы урана в воде – топливный раствор [1], [2].

В процессе эксплуатации растворного ИЯР в топливном растворе, в основном, под действием осколков деления урана происходит интенсивный радиолиз воды с образованием водородно-кислородной смеси в соответствии с основными уравнениями реакций [3] - [6]:

$$2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$$

$$2H_2O \rightarrow H_2 + H_2O_2$$

Если не проводить утилизацию водородно-кислородной смеси, то концентрация водорода может превысить нижний предел взрывобезопасности (4 % объем.) и привести к разгерметизации активной зоны ИЯР.

Применяемые в настоящее время системы утилизации радиолитического газа, реализующиеся посредством искрового воспламенения на ИЯР: ВИР-2М, ЯГУАР, ИГРИК и ИГРИК-2, или системы пассивной каталитической рекомбинации водорода на реакторах: АРГУС и АРГУС-М существенно ограничивают (снижают) технические и эксплуатационные характеристики данных ИЯР [2], [7].

Например, если растворный ИЯР, оснащенный системой искрового воспламенения, используется в статическом режиме, то сжигание образующейся водородно-кислородной смеси приводит к резкому падению давления в корпусе реактора и, как следствие, к значительным скачкам мощности. При этом возможно паровое вскипание топливного раствора, приводящее к временному глушению ИЯР.

Растворные ИЯР, оснащенные системой пассивной каталитической рекомбинации (ПКР) водорода, также имеют ряд недостатков:

– ПКР использует эффект гравитационной тепловой конвекции, поэтому для создания необходимой скорости циркуляции система должна иметь достаточно большую высоту (около 3–4 м в реакторе «АРГУС» и «АРГУС-М»). Это создает значительные неудобства при размещении ПКРВ, обеспечении ее биологической защиты, а также при проведении работ по обслуживанию системы (замена катализатора, датчиков температуры и давления);

– создаваемый в ПКР перепад давления не позволяет использовать катализаторы со средним и высоким газодинамическим сопротивлением (например, гранулированный керамический катализатор), а также исключает возможность использования дополнительных элементов, повышающих эффективность работы системы (в частности, защитных фильтров для улавливания короткоживущих изотопов и каталитических ядов);

– отсутствие управления скоростью прокачки газовой смеси через каталитический блок может привести к возникновению опасных режимов работы ПКР, при которых концентрация водорода в надтопливном пространстве корпуса реактора может превысить предел взрывобезопасности и привести к взрыву и разгерметизации газового контура с выходом газообразных радиоактивных веществ и аэрозолей.

Одним из вариантов повышения технических и эксплуатационных характеристик растворных ИЯР, а также снижения уровня взрывобезопасности является их оснащение системой каталитической рекомбинации (СКР) водорода с принудительной циркуляции парогазовой смеси. Такая система является универсальной для всех растворных ИЯР и позволяет в широких пределах варьировать режимы их работы.

Целью настоящей работы являлось разработать макет системы каталитической утилизации радиолитического газа, образующегося в топливном растворе исследовательских ядерных реакторов.

Для реализации цели было необходимо решить следующие задачи:

– разработать расчетную гидравлическую модель СКР с принудительной циркуляцией парогазовой смеси в газовом контуре;

– отработать технологию изготовления палладиевого катализатора методом пропитки с массовой долей палладия от 0,1 %, до 1,0 %;

– разработать макет каталитического блока, способного обеспечить концентрацию водорода в газовом контуре ИЯР менее 4 %;

– разработать макет СКР и провести его испытания.

Расчетная гидравлическая модель СКР

Для оценки рентабельности и возможности технической реализации системы каталитической рекомбинации водорода с принудительной циркуляцией парогазовой смеси был произведен теплогидравлический расчёт для растворного ИЯР типа ВИР-2М.

Расчёт проводился для газа, состоящего на 78 % (объем.) из воздуха и на 22 % (объем.) из водяного пара при температуре 60 °С (100 % относительная влажность). При расчете гидравлического сопротивления тракта СКР радиолитическими водородом и кислородом ввиду их малых концентраций пренебрегали.

Считали, что динамическая вязкость смеси имеет аддитивный характер, а стенки трубопроводов являются абсолютно гладкими.

Расчетная гидравлическая модель основывалась на том, что в процессе работы ВИР-2М на мощности происходит выделение радиолитических газов и водяного пара, которые в надтопливном пространстве перемешиваются с газовой смесью, поступающей из СКР. Через всасывающий трубопровод парогазовая смесь поступает в тракт СКР и предварительно очищается от каталитических ядов (в основном йода) на керамическом фильтре. После чего парогазовая смесь поступает в каталитический рекомбинатор водорода.

В качестве примера на рис. 1 представлены результаты расчета гидравлических потерь ΔP, температуры катализатора T_r, концентрации водорода C_{H2} при работе ИЯР в статическом режиме на мощности 15 кВт и 30 кВт в зависимости от расхода парогазовой смеси в контуре СКР.

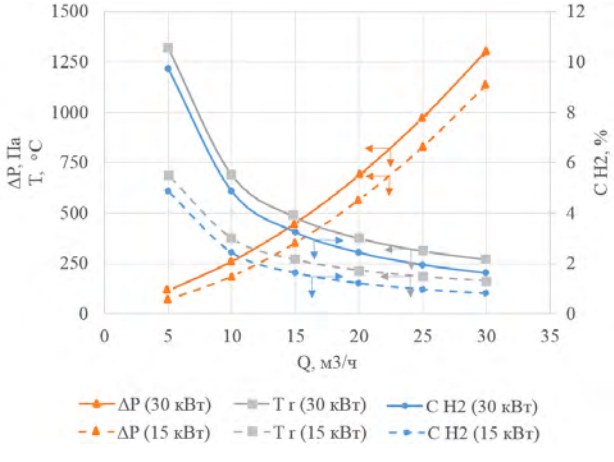


Рис. 1. Зависимости гидравлических потерь ΔP, температуры катализатора Tr и концентрации водорода C_{H2} при работе ИЯР в статическом режиме

Результаты проведенных расчетов показывают, что СКР с принудительной циркуляцией парогазовой смеси способна обеспечить концентрацию водорода в надтопливном пространстве ИЯР менее 4 % (объем). При этом гидравлическое сопротивление тракта СКР не превышало 1,5 кПа.

В дальнейшем расчетная гидравлическая модель была использована при выборе оптимальных скоростей прокачки парогазовой смеси в газовом контуре макета СКР.

Разработка макета каталитического блока

Изготовление гранулированного палладиевого катализатора

Для разработки макета каталитического блока в настоящей работе использовали два типа катализаторов:

– промышленный гранулированный палладиевый катализатор К-ПГ с массовой долей палладия 1,8–2,0 %,

– разработанный в ИЯРФ гранулированный палладиевый катализатор с массовой долей палладия: 0,2 %, 0,6 % и 1,0 % (КАП-02, КАП-06 и КАП-10). За счет варьирования концентрации палладия на поверхности керамических гранул, разработанный катализатор КАП применяли для выравнивания теплового фронта и снижения температуры на каталитических элементах в каталитическом блоке.

Отработку лабораторной технологии изготовления гранулированных палладиевых катализаторов КАП проводили методом пропитки [8]. Процесс изготовления гранулированных катализаторов состоял из трех стадий:

– определения удельной влагоемкости керамического носителя;

– пропитка палладиевым раствором керамической носителя;

– восстановление катализатора на поверхности керамического носителя.

Восстановление керамических гранул, пропитанных палладиевым раствором, проводили при 300 °С в потоке аргон-водородной смеси в течение 5 часов, а затем выдерживали при температуре 600 °С в течение одного часа на разработанном стенде (рис. 2).

Массовую долю палладия на поверхности керамических гранул Al_2O_3 определяли методом атомно-эмиссионной спектрометрии с возбуждением проб в аргоновой высокочастотной индукционной плазме (АЭС-ИСП).

Массовая доля палладия в катализаторах составила: КАП-02 – (0,160±0,024) %, КАП-06 – (0,634±0,095) % и КАП-10 – (1,05±0,16) %.

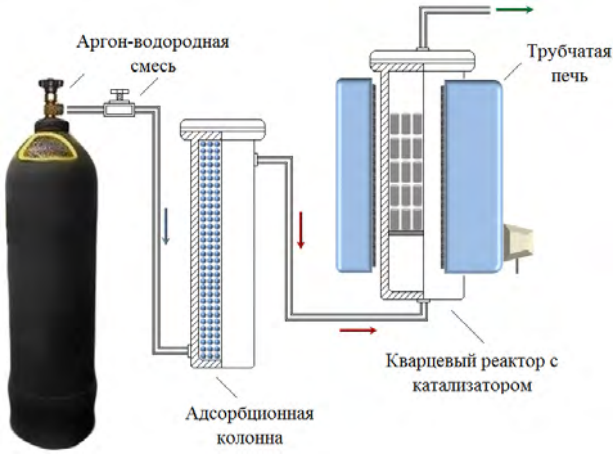
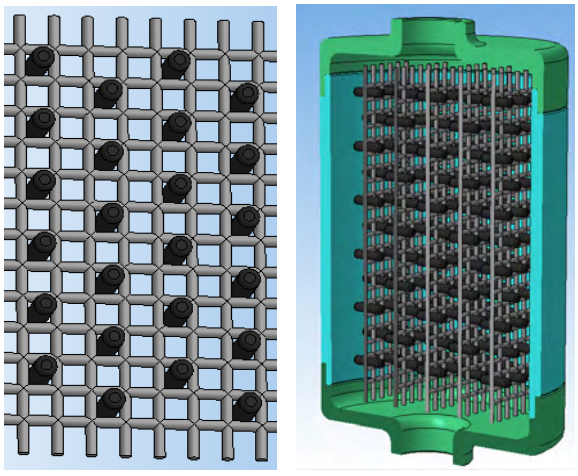


Рис. 2. Установка по восстановлению палладия на поверхности гранул

Сборка макета каталитического блока

После изготовления гранулированного палладиевого катализатора была проведена сборка каталитических элементов и макета каталитического блока (КАБ).

Каталитические элементы представляли собой металлические сетки, в ячейки в которых размещали гранулы катализатора. Сборка нескольких каталитических элементов формировала каталитический сегмент (КС). Изображения каталитического элемента и КС представлены на рис. 3.



а б

Рис. 3. Изображение каталитического элемента и КС: а – каталитический элемент, б – КС

Макет СКР оснащали двумя типами КАБ с промышленным катализатором К-ПГ и с катализаторами КАП-02, КАП-06 и КАП-10. Масса катализатора составляла: К-ПГ по 25 г и КАП по 38 г в каждом КС. КАБ содержал от 2 до 4 КС.

Разработка макета СКР и постановка эксперимента

Испытания по оценке степени каталитической конверсии водорода в макетах КАБ проводили на разработанном испытательном стенде (макет СКР), при постоянной скорости поступления водородно-кислородной смеси 0,45 дм^3/мин в зависимости от количества КС от 2 до 4 и от скорости прокачки парогазовой смеси – (4,5±0,3) и (9,0±0,3) дм^3/мин.

Принципиальная схема макета СКР представлена на рис. 4.

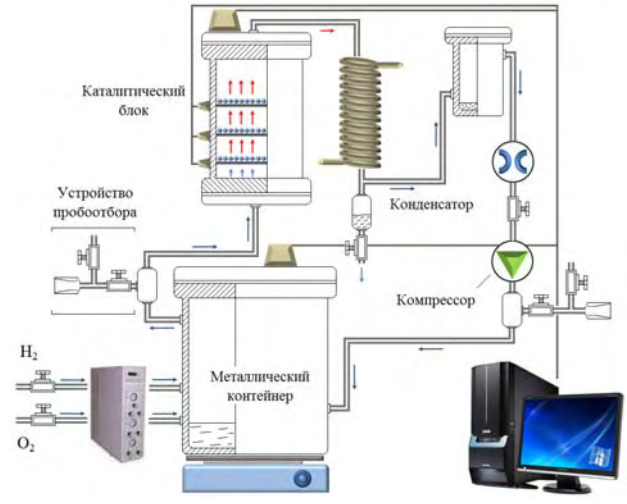


Рис. 4. Макет СКР с принудительной системой циркуляции парогазовой смеси

Цикл работы макета СКР с принудительной циркуляцией парогазовой смеси состоял из четырех основных стадий:

– поступление водородно-кислородной смеси в металлический контейнер со скоростью 0,45 дм^3/мин;

– прокачка водородно-кислородной смеси через КАБ со скоростью (4,5 ± 0,3) или (9,0 ± 0,3) дм^3/мин, обеспечиваемая воздушным компрессором;

– реакция каталитического окисления водорода на КС (КАП и К-ПГ) с образованием парогазовой смеси;

– охлаждение парогазовой смеси на конденсаторе и возвращение в металлический контейнер.

Через заданные промежутки времени от начала эксперимента на двух участках газового контура, до и после КАБ, проводился отбор проб газовой среды и их газохроматографический анализ на содержание водорода по аттестованной методике измерений.

Для автоматического контроля и регистрации в режиме реального времени давления в газовом контуре макета СКР и температуры КС была разработана модульная измерительная система и написано программное обеспечение в среде LabVIEW.

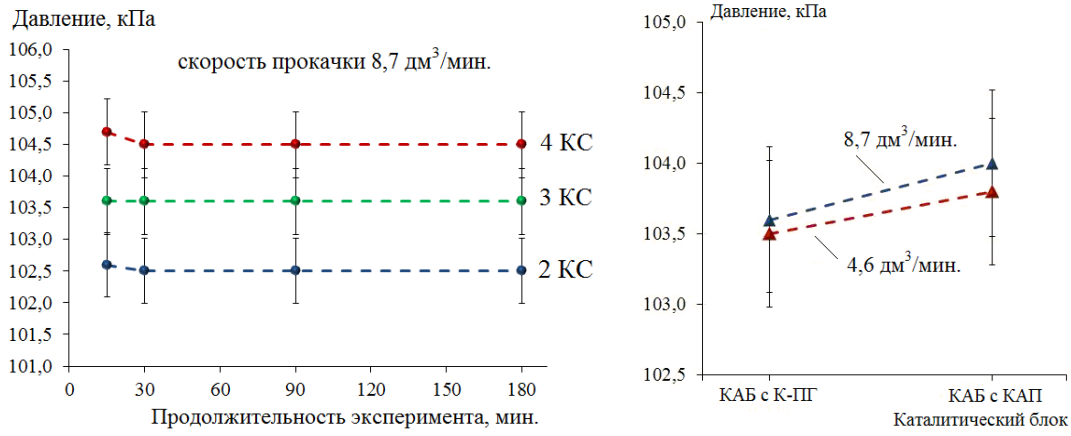


Рис. 5. Давление в газовом контуре макета СКР

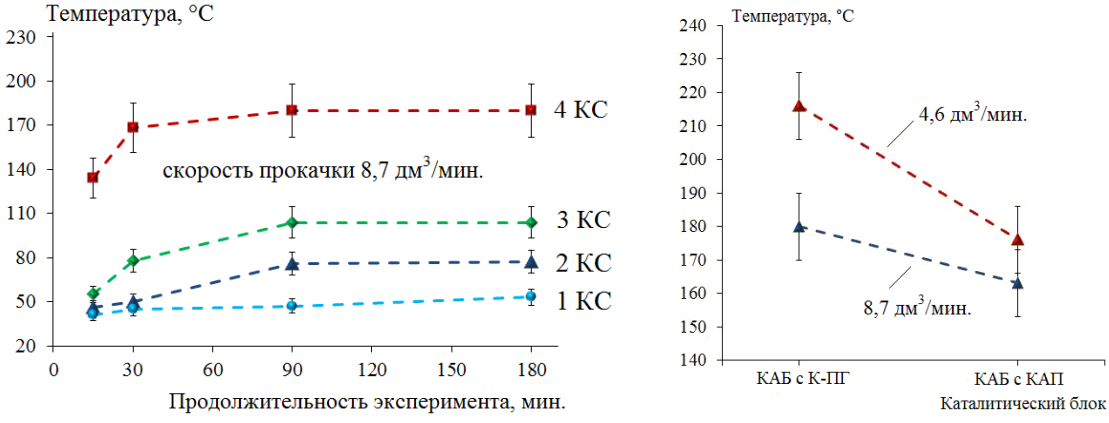


Рис. 6. Температура каталитических сегментов в КАБ

Результаты испытаний макета СКР

Технические характеристики макета СКР, оснащенного каталитическим блоком с промышленным катализатором К-ПГ или изготовленным в ИЯРФ катализатором КАП, при разных скоростях прокачки парогазовой смеси и разном количестве КС в КАБ оценивали по изменению давления в газовом контуре, температуры на каталитических сегментах и концентрации водорода до и после каталитического блока.

В качестве примера на рис. 5–8 представлены динамические зависимости оценки технических характеристик макета СКР с разработанным в ИЯРФ катализатором КАП при скорости прокачки парогазовой смеси 8,7 дм^3/мин, т. к. у макета СКР, оснащенного промышленным катализатором К-ПГ, динамические зависимости имеют аналогичный вид.

Давление в газовом контуре макета СКР

Регистрацию давления в газовом контуре макета СКР проводили датчиками МС 2000 с суммарной относительной погрешностью измерений ±0,25 %.

На рис. 5 представлена динамика изменения давления в газовом контуре макета СКР, оснащенного 2-х-, 3-х и 4-х секционным КАБ с КАП, а также данные по максимальному давлению в газовом контуре макета СКР с катализаторами КАП или К-ПГ при разных скоростях прокачки парогазовой смеси.

Результаты проведенных исследований показали, что давление в газовом контуре макета СКР, оснащенного КАБ с КАП или КАБ с К-ПГ:

– незначительно увеличивается при увеличении количества КС;

– не изменяется при увеличении скорости прокачки парогазовой смеси и замене катализатора К-ПГ на КАП или при замене катализатора К-ПГ на КАП.

Температура каталитических сегментов

Регистрацию температуры на поверхности катализатора проводили термопарами КТХА с абсолютной погрешностью ±2 °С.

На рис. 6 представлена динамика изменения температуры КС для 4-х секционного КАБ с КАП, а также данные с максимальными температурами на КС с катализаторами КАП или К-ПГ при разных скоростях прокачки парогазовой смеси.

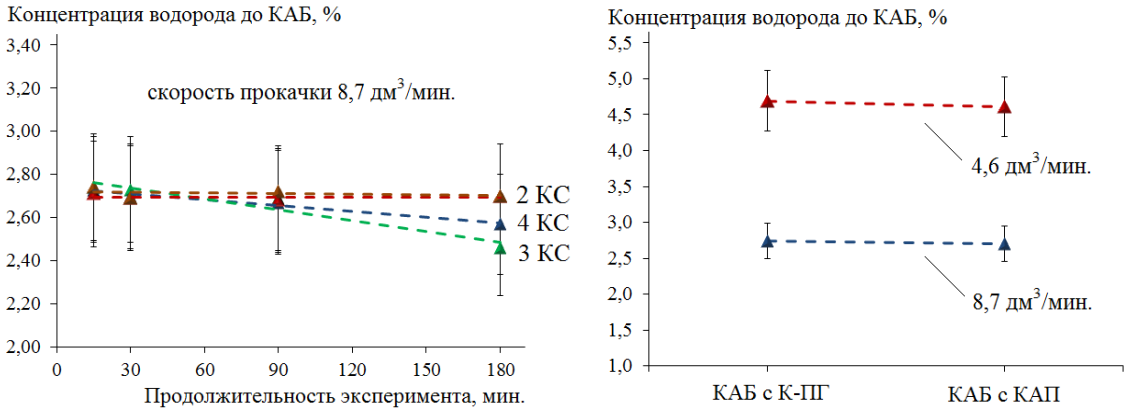


Рис. 7. Концентрация водорода до КАБ

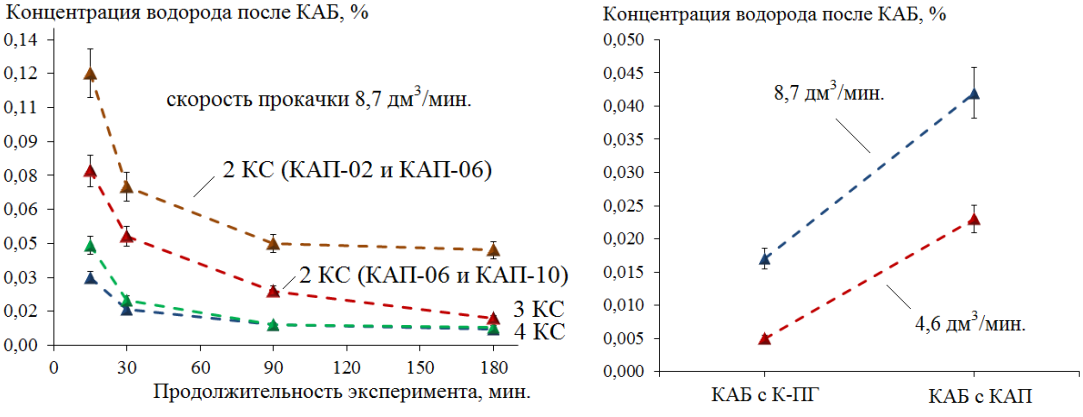


Рис. 8. Концентрация водорода после КАБ

На основании представленных данных следует, что температура КС уменьшается:

– от первого КС к четвертому КС (4-секционный КАБ);

– при увеличении скорости прокачки парогазовой смеси;

– на 40–50 °С при замене промышленного катализатора К-ПГ на катализатор КАП, что является более предпочтительным при его длительной эксплуатации в составе СКР.

Концентрации водорода в газовом контуре макета СКР

Измерение концентрации водорода до и после КАБ в газовом контуре макета СКР проводили методом газовой хроматографии.

На рис. 7 и рис. 8 представлена динамика изменения концентрации водорода в газовом контуре макета СКР до и после 2-х-, 3-х- и 4-х секционного КАБ, а также данные с максимальными концентрациями водорода в газовом контуре макета СКР до и после КАБ с катализаторами КАП или К-ПГ при разных скоростях прокачки парогазовой смеси.

Из полученных данных установлено, что концентрация водорода до КАБ:

– снижается при увеличении скорости прокачки парогазовой смеси;

– практически не изменяется при увеличении количества КС в КАБ и при замене промышленного катализатора К-ПГ на катализатор КАП.

Концентрация водорода после КАБ снижается при увеличении количества КС от 2 до 4 и при уменьшении скорости прокачки парогазовой смеси.

Замена промышленного катализатора К-ПГ на катализатор КАП приводит к незначительному увеличению концентрации водорода в газовом контуре после КАБ.

Степень каталитической конверсии водорода

Газохроматографическое определение концентрации водорода до и после КАБ позволило рассчитать степень каталитической конверсии.

Степень каталитической конверсии водорода в газовом контуре макета СКР, оснащенного КАБ (с КАП и с К-ПГ), рассчитывали по формуле:

$$\alpha = \frac{C_{вх} - C_{вых}}{C_{вх}} \cdot 100 \text{ , \%}$$

где $C_{вх}$ – концентрация водорода на входе в КАБ;

$C_{вых}$ – концентрация водорода на выходе из КАБ.

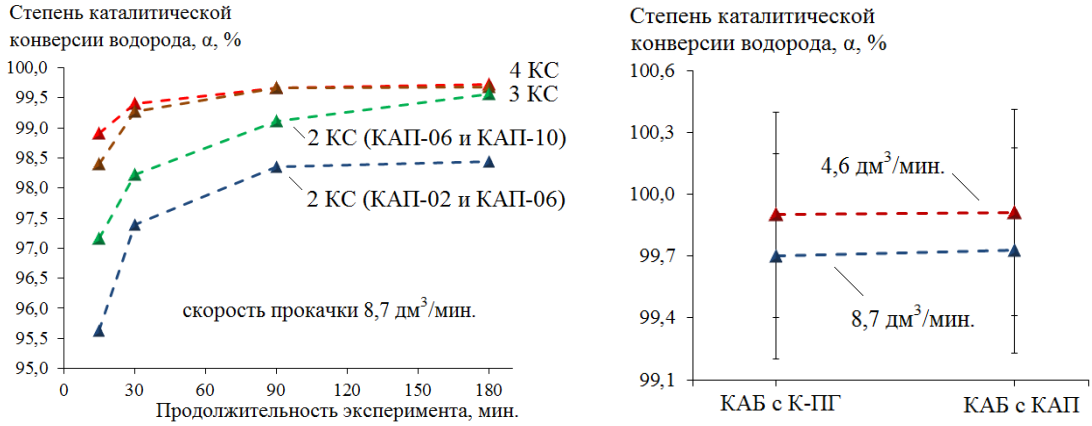


Рис. 9. Степень каталитической конверсии водорода

Динамика изменения степени каталитической конверсии водорода (α, %) на катализаторе КАП, и данные максимальной α на катализаторах КАП и К-ПГ при разных скоростях прокачки парогазовой смеси представлены на рис. 9.

Установлено, что степень каталитической конверсии водорода на катализаторе КАП увеличивается от 96 % до 100 %:

– при увеличении в нем количества КС от 2 до 4;

– при уменьшении скорости прокачки газовой смеси.

Замена промышленного катализатора К-ПГ на КАП практически не влияет на изменение степени каталитической конверсии водорода.

Заключение

В докладе отражен завершенный комплекс работ по разработке макета перспективной системы утилизации радиолитического газа, образующегося в топливном растворе ИЯР, а также исследованию ее технических характеристик.

Результаты проведенных исследований позволяют сделать ряд выводов:

1) разработана расчетная гидравлическая модель СКР с принудительной циркуляцией парогазовой смеси;

2) на основании гидравлической модели СКР разработан, приближенный прототипу, макет СКР с принудительной циркуляцией парогазовой смеси;

3) макет СКР, оснащенный катализатором КАП, позволяет поддерживать концентрацию водорода в газовом контуре не более 4 % (объемных) при скорости прокачки парогазовой смеси не более 9 дм^3/мин;

4) многоблочный вариант СКР обеспечит проведение длительных облучательных экспериментов на ИЯР, работающих в статическом режиме, без падения мощности.

Литература

1. Воинов А. М., Колесов В. Ф., Матвеенко А. С. и др. Водный импульсный реактор ВИР-2М и его предшественники. // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 1990. № 3. С. 3–15.

2. Колесов В. Ф. Апериодические импульсные реакторы. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2007. Т. 1.

3. Аллен А. О. Радиационная химия воды и водных растворов. М.: Атомиздат, 1963.

4. Петерсон З., Уаймер Р. Химия в атомной технологии. М.: Атомиздат, 1967.

5. McDuffie H. F. // J. Phys. Chem. 1958. Vol. 62. P. 1030.

6. Григорук Д. Г., Келлер В. Д., Христенко Е. Б., Церцвадзе Э. Н. Пассивный каталитический рекомбинатор водорода с двухъярусным корпусом // Электрические станции. 2013. № 5. С. 10–12.

7. Афанасьев Н. М., Беневоленский А. М., Венцель О. В. и др. Реактор «Аргус» для лабораторий ядерно-физических методов анализа и контроля // Атомная энергия. Т. 61. Вып. 1. 1986. С. 7–9.

8. Кулакова И. И., Лисичкин Г. В. Каталитическая химия. Часть 1. Основы катализа. М.: МГУ им. М. В. Ломоносова, 2014.

СЕКЦИЯ 1

Теоретическая и математическая физика

Председатели секции:
д-р. физ.- мат. наук К. Г. Гайнуллин
д-р. физ.- мат. наук В. А. Жмайло
д-р. физ.- мат. наук С. С. Соколов

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСКОРЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СВЕРХКОРОТКОГО ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА НА ПЛАЗМУ ВОДОРОДА

Н. А. Андреюк, Н. П. Пятаков, Б. П. Якутов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» г. Саров Нижегородской обл.

Введение

В последние несколько десятилетий широко изучаются возможности лазерно-плазменного ускорения электронов, предложенного в 1979 г. [1]. В таких ускорителях фемтосекундный лазерный импульс, распространяясь в плазме докритической плотности, возбуждает продольную волну плотности заряда, идущую вслед за ним. В этой волне, которую обычно называют кильватерной, создается продольное электрическое поле величиной 10^9–10^{10} В/см, что в тысячи раз превышает ускоряющие поля на современных линейных ускорителях. Электроны плазмы захватываются продольным электрическим полем кильватерной волны и ускоряются от мегавольтных до гигавольтных энергий, в зависимости от параметров эксперимента (длины плазмы, интенсивности лазерного импульса и др.). В настоящее время на ускорителях такого типа электроны ускорены до энергии 7,8 ГэВ [2].

Основным методом теоретического исследования лазерно-плазменного ускорения является численное моделирование, основанное на методе «частиц в ячейках» (*particle-in-cell*, PIC). Численное моделирование в PIC-кодах проводится на основе хорошо известной физической модели полностью ионизированной бесстолкновительной плазмы, которая включает в себя релятивистские кинетические уравнения Власова для функций распределения ионов и электронов, а также уравнения Максвелла для электромагнитного поля.

Обычно, чтобы увеличить энергию ускоренных электронов в режиме кильватерного ускорения используют достаточно разреженную плазму, имеющую плотность 10^{17}–10^{18} см$^{-3}$ и длину в несколько сантиметров. В таком случае, при достаточно мощном драйвере энергия ускоренных электронов достигает значений в несколько ГэВ. Однако, зачастую в современных научных и технических приложениях бывает необходим компактный и относительно недорогой источник электронов диапазона в десятки МэВ. Для этих целей был проведен эксперимент, описанный в работе [3]. В нем ускорялись электроны в плазме водорода лазерным импульсом энергией в 40 мДж в режиме SM-LWFA (self-modulated laser wakefield acceleration). Плотность плазмы имела гауссов профиль с максимумом – $4{,}2\times10^{20}$ см$^{-3}$, и длиной на полувысоте от максимума ≈ 250 мкм. В настоящей работе представлен анализ результатов 3D численного моделирования ускорения электронов в плазменной кильватерной волне для параметров эксперимента, описанного в статье [3]. Моделирование проводилось при помощи релятивистского параллельного кода PLASMA-3P, разработанного во ВНИИЭФ [4]. В докладе представлено сравнение расчетных результатов с результатами эксперимента, показаны характерные особенности данного режима ускорения, в частности – самофокусировка и самомодуляция лазерного импульса.

Возбуждение кильватерной волны лазерным импульсом. Основные особенности режима кильватерного ускорения электронов

Кильватерная волна возбуждается в плазме под воздействием ультракороткого, мощного (порядка 10^{18}–10^{20} Вт\см^2) лазерного излучения, либо пучка высокоэнергетичных электронов. Она представляет собой череду сгущений и разрежений электронной плотности, следующей за «драйвером» (лазерным импульсом или электронным сгустком). На рис. 1 схематично изображен первый период плазменной кильватерной волны. Электроны обозначены маленькими кружками, ионы – большими со знаком «плюс». Лазерный импульс распространяется справа налево и отмечен большой стрелкой. Изогнутыми стрелками показано направление разлета электронов.

На рис. 1 большой стрелкой отмечен передний фронт лазерного импульса, маленькими кружками показаны электроны плазмы, большими со знаком «плюс» – ионы.

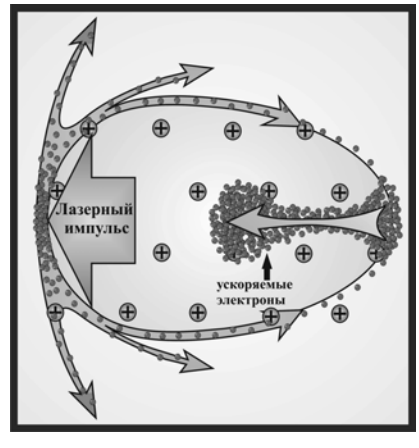


Рис. 1. Схема ускорения электронов в плазменной кильватерной волне

Как видно из рис. 1, распространяясь в плазме докритической плотности, лазерный импульс вытесняет электроны из области взаимодействия излучения с плазмой за счет действия пондеромоторной силы $\overrightarrow{F_p} \sim -\vec{\nabla} I$. Положительно заряженные ионы остаются при этом практически неподвижны. Таким образом, позади лазерного импульса образуется зона избыточного положительного заряда, которая в свою очередь, начинает притягивать электроны обратно. Вследствие чего, в плазме возбуждаются колебания плотности электронов, следующие за лазерным импульсом. Эта плазменная волна, которую еще называют кильватерной, совершает колебания с плазменной частотой $\omega_{pl} = \left(4\pi n_e e^2 / m_e\right)^{1/2}$, где n_e – начальная плотность электронов плазмы, e – заряд, m_e – масса электрона и распространяется с фазовой скоростью равной групповой скорости лазерного импульса:

$$\upsilon_{ph} = \upsilon_g \approx c\sqrt{\left(1 - \omega_p^2 / \omega_0^2\right)} \qquad (1)$$

где c – скорость света, ω_0 – несущая частота лазерного импульса. В область избыточного положительного заряда, вследствие самоинжекции, могут попасть фоновые электроны плазмы и под действием продольного ускоряющего поля набрать энергию от сотен до нескольких тысяч МэВ. При этом, находясь в ускоряющей фазе, электроны постоянно набирают скорость, стремясь к скорости света $\upsilon_e \to c$. В результате, электроны могут обогнать плазменную волну и перейти в область с тормозящим продольным электрическим полем. Длину участка плазмы, где происходит только ускорение электронов, принято называть длиной дефазировки – l_d. Если считать, что электрон в плазменной волне движется со скоростью света, то длина дефазировки равна [5]:

$$l_d = \frac{\lambda_{pl}}{2\left(c - \upsilon_{ph}\right)} c \approx \frac{\omega_0^2}{\omega_{pl}^2} \lambda_{pl} \qquad (2)$$

где λ_{pl} – длина одного периода плазменной волны. Таким образом, максимальное приращение энергии, которое могут набрать электроны, ускоряясь в кильватерной волне равно [1]:

$$W_{Max} = qE_l l_d \approx qE_l \frac{\omega_0^2}{\omega_{pl}^2} \lambda_{pl} \qquad (3)$$

где q – заряд электрона, E_l – среднее значение продольного ускоряющего поля. Выражение (3) хорошо лишь для приблизительной оценки, так как в нем не учитываются нелинейные эффекты, возникающие при кильватерном ускорении, например, самофокусировка лазерного импульса. Данные эффекты приводят к изменению амплитуды ускоряющего поля и длины дефазировки. Также выражение (3) соответствует случаю, когда $L_l \le \lambda_p / 2$, где L_l – пространственная длина лазерного импульса, λ_p – плазменная длина волны.

Постановка задачи и метод расчета

Для моделирования процесса ускорения электронов кильватерной волной чаще всего используют PIC-коды (*Particle-In-Cell*) – математические программы, моделирующие взаимодействие лазерного излучения с бесстолкновительной плазмой путем решения системы уравнений Максвелла – Власова методом «частиц-в-ячейке». В настоящей работе численное моделирование проводилось при помощи трехмерного релятивистского параллельного PIC-кода PLASMA-3P, разработанного во ВНИИЭФ. [4]. Расчеты проводились в трехмерной постановке. Начальные параметры лазерного импульса, плазмы задавались такими же как и в эксперименте [3]. Расчетная область, плазменная мишень и система координат, принятая при моделировании, схематически показана на рис. 2:

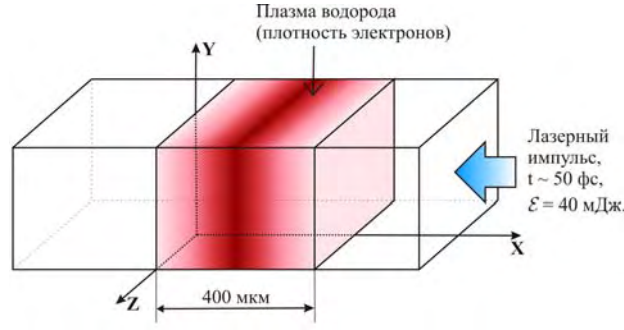


Рис. 2. Расчетная область для численного моделирования лазерно-плазменного ускорения электронов

Из рис. 2 видно, что лазерный импульс распространялся в отрицательном направлении оси X. Размеры расчетной области были – $530 \times 40 \times 40$ мкм вдоль осей $X \times Y \times Z$. Плазма водорода имела размеры $400 \times 40 \times 40$ мкм по осям $X \times Y \times Z$. Плотность плазмы была неоднородной, гауссовой формы, с максимумом $n_0 = 4{,}2 \times 10^{20}$ см$^{-3}$ $\approx 0{,}241 \times n_{crit}$, где $n_{crit} = m_e \omega_0^2 / \left(4\pi e^e\right)$ – критическая плотность электронов плазмы, равная $1{,}74 \times 10^{21}$ см$^{-3}$ для длины волны лазерного излучения λ = 0,8 мкм (e – заряд электрона, m_e – масса электрона, ω_0 – лазерная частота). Соответствующее выражение для профиля плотности – $N_e(x) = n_0 \times \exp\left(-\left(l - X\,\text{мкм}\right)^2 / d^2\right)$ при $0 \le X \le 400$, где $l = 200$ мкм – центр области, $d = 150$ мкм. Распределение плотности электронов показано на рис. 3:

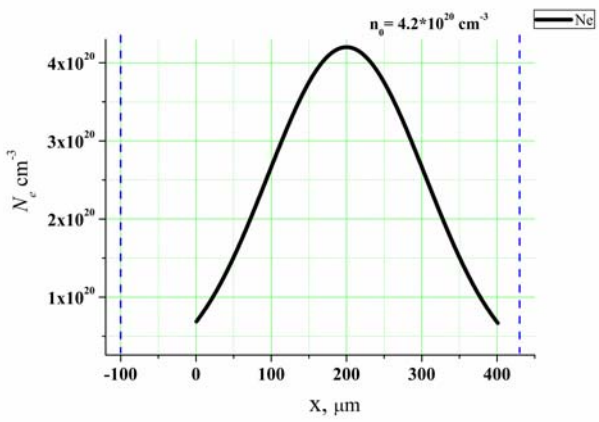


Рис. 3. Начальный профиль плотности электронов плазмы в направлении оси X

На рис. 3 максимум плотности $n_0 = 4{,}2\times10^{20}$ см$^{-3}$, ширина на полувысоте от максимума ≈250 мкм, пунктиром показаны границы расчетной области.

Параметры падающего на плазму лазерного импульса были следующими: длина волны излучения $\lambda = 0{,}8$ мкм, интенсивность лазерного импульса $I = 1\times10^{18}$ Вт/см^2, длительность гауссова лазерного импульса $\tau = 50$ фс на полувысоте от максимума, энергия импульса $W = 40$ мДж, мощность $P \approx W/\tau = 0{,}8$ ТВт. Лазерное излучение имело линейную поляризацию и гауссов профиль по времени и пространству. Безразмерная амплитуда импульса была равна $a_0 = eE_0/(m_e c\omega_0) = 0{,}68$, где e – заряд электрона, m_e – масса электрона, c – скорость света, ω_0 – лазерная частота.

Возбуждение кильватерной волны в режиме SM-LWFA. Сравнение с экспериментом

При лазерном кильватерном ускорении в режиме самомодуляции лазерного импульса (SM-LWFA) пространственная длина излучения L_l должна превышать плазменную длину волны $L_l > \lambda_p$, в нашем случае L_l = 36 мкм, а $\lambda_p = 2\pi c/\omega_{pl}$ = 1,6 мкм ($\omega_{pl} \approx 11{,}6\ \times10^{14}$ с$^{-1}$ – плазменная частота). При этом лазерный импульс становится промодулированным в продольном направлении с масштабом, близким к плазменной длине волны. Также, при достижении лазерным импульсом определенного значения мощности – $P_{cr}(GW) = 17{,}4\, n_{crit}/n_e$, называемым критической мощностью [6, 7] в плазме происходит самофокусировка лазерного излучения и амплитуда лазерного поля заметно возрастает. В результате самомодуляции и самофокусировки лазерного импульса происходит генерация плазменной кильватерной волны, в продольном электрическом поле которой ускоряются электроны. На рис. 4 представлена зависимость максимальных значений амплитуды лазерного поля $|E_{yMAX}|$ от координаты ct, полученная в расчете, что соответствует различным моментам времени. Излучение входит в плазму в точке ct = 400 мкм и выходит в точке ct = 0 мкм.

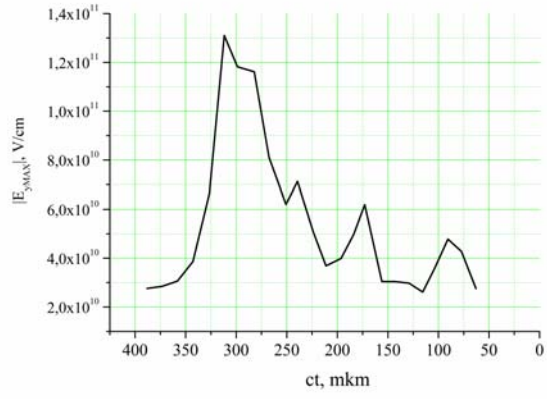


Рис. 4. Зависимость максимальных значений амплитуды лазерного поля $|E_{yMAX}|$ от времени

Согласно выражению для мощности релятивистской самофокусировки $P_{cr}(GW) = 17{,}4\, n_{crit}/n_e$ в нашем случае на входе в плазму данное значение равно $P_{cr} = 0{,}4$ ТВт, что заведомо меньше мощности лазерного импульса (P ≈ 0,8 ТВт), так что процесс самофокусировки наступает практически сразу после входа излучения в плазму. Как видно из рис. 4 в нашем расчете максимальная амплитуда лазерного поля равна $E_{yMAX} \approx 1{,}3\times10^{11}$ В/см, что в 4,8 раз больше начальной амплитуды лазерного импульса $E_0 \approx 2{,}7\times10^{11}$ В/см. На рис. 5 и 6 показаны зависимости амплитуды лазерного поля вдоль оси X для двух моментов времени – 210 фс, что соответствует начальному моменту входа лазерного излучения в плазму, и 460 фс, когда амплитуда лазерного поля достигает своего максимального значения, полученного в расчете $E_{yMAX} \approx 1{,}3\times10^{11}$ В/см = 4,8 E_0.

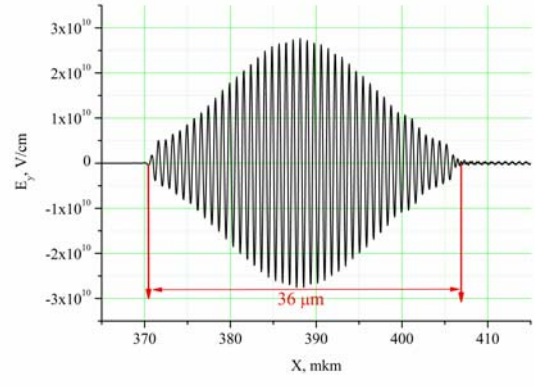


Рис. 5. Зависимость амплитуды лазерного поля вдоль оси X для момента времени t = 210фс

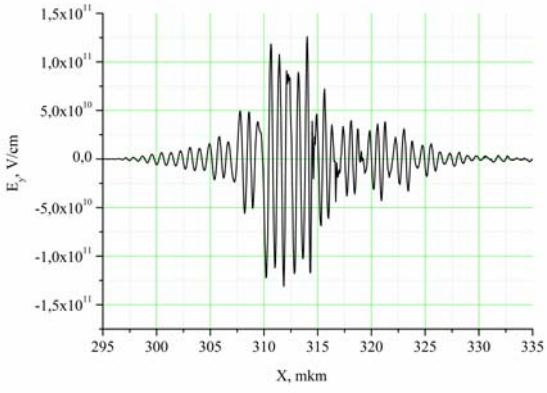


Рис. 6. Зависимость амплитуды лазерного поля вдоль оси X для момента времени t = 460 фс

Из рис. 5 и 6 видно, что в плазме из-за процесса самофокусировки происходит заметное увеличение амплитуды лазерного поля и укручение фронта импульса, а также вследствие самомодуляции возникает чередование максимумов и минимумов амплитуды лазерного излучения.

На рис. 7 показано значение продольного ускоряющего поля E_x кильватерной волны вдоль оси X, возбуждаемой лазерным импульсом для момента времени 460 фс (соответствующего рис. 6).

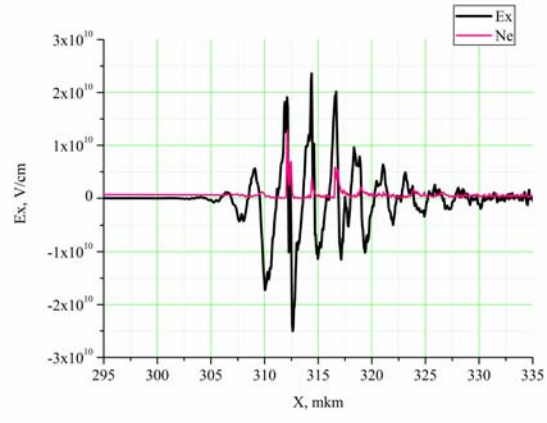


Рис. 7. Зависимость продольного ускоряющего поля E_x кильватерной волны вдоль оси X для момента времени t = 460 фс

Более светлым цветом на рис. 7 показано безразмерное значение плотности электронов.

На рис. 7 также более светлым цветом обозначена плотность электронов на оси распространения лазерного импульса (в произвольных единицах) – видно, что электроны вследствие самоинжекции ускоряются полем кильватерной волны. Максимальное значение амплитуды ускоряющего поля для момента времени, показанного на рис. 7, равно $E_x \approx 2{,}5\times10^{10}$ В/см. Оценка максимальной энергии электронов для такого поля, согласно выражению (3) будет $W_{\max} = qE_x l_d \approx 17$ МэВ, тогда как в нашем расчете $W_{\max} \approx 11$ МэВ, однако следует учитывать, что выражение (3) дает приближенную оценку для случая стандартного режима LWFA, когда $L_l \le \lambda_p/2$, тогда как в режиме SM-LWFA заведомо $L_l > \lambda_p$. Тем не менее оно показывает, что для данной плотности плазмы, длины волны лазерного излучения только за счет механизма кильватерного ускорения нельзя получить приращение энергии электронов $W_{\max}$ свыше ≈ 17 МэВ.

На рис. 8 показано сравнение энергетических спектров электронов, вылетевших из плазмы, нормированные на телесный угол для PIC-моделирования по коду PLASMA-3P, и полученные в эксперименте [3].

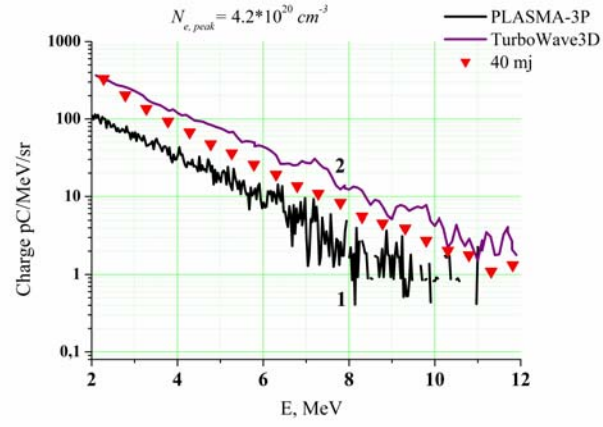


Рис. 8. Энергетические спектры электронов: 1 – спектр из расчета по коду PLASMA-3P; точки – результат эксперимента [3]; 2 – расчет по коду TurboWave 3D [3]

Из рис. 8 видно хорошее совпадение расчетных значений по коду PLASMA-3P с экспериментом.

Заключение

При помощи разработанного во ВНИИЭФ параллельного полностью релятивистского кода PLASMA-3P (3D3V), основанного на методе «частиц-в-ячейке», проведено численное моделирование ускорения электронов в режиме SM-LWFA (self-modulated laser wakefield acceleration) в кильватерной волне, возбужденной в неоднородной плазме водорода лазерным импульсом длительностью 50 фс и интенсивностью 1×10^{18} Вт/см^2. Начальная плотность электронов имела гауссов профиль с максимумом $n_0 = 4{,}2\cdot10^{19}$ см$^{-3}$ и длиной на полувысоте от максимума ≈ 250 мкм.

Начальные параметры лазерного импульса, плазмы отвечали условиям эксперимента, описанного в работе [3]. Был проведен анализ результатов численного моделирования, сравнение энергетиче-

ских спектров ускоренных электронов показало хорошее согласие с экспериментом. Максимальная энергия электронов, полученных в расчете оказалась равна $W_{\max} \approx 11$ МэВ. В докладе показаны характерные особенности данного режима ускорения, в частности – самофокусировка и самомодуляция лазерного импульса.

Литература

1. Tajima T., Dawson J.M. Laser Electron Accelerator // Phys. Rev. Lett. 1979. Vol. 43, N. 4. P. 267–270.

2. Gonsalves A. J., Nakamura K., Daniels J. at al. Petawatt Laser Guiding and Electron Beam Acceleration to 8 GeV in a Laser-Heated Capillary Discharge Waveguide // Phys. Rev. Lett. 2019. Vol. 122.

3. Goers A. J., Hine J. A., Feder L. Multi-MeV electron acceleration by sub-terawatt laser pulses // Phys. Rev. Lett. 2015. Vol. 115.

4. Голубев А. И., Сысоева Т. Г., Якутов Б. П. Генерация ионов в тонких мишенях лазерными импульсами круговой поляризации. / Международная конференция «XII Харитоновские тематические научные чтения» по проблемам физики высоких плотностей энергии // Тр. конф. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2010. С. 369–374.

5. Андреев Н. Е., Горбунов Л. М. Лазерно-плазменное ускорение электронов // УФН. 1999. Т. 169, № 1. С. 53–58.

6. Schmidt G., Horton W. Self-focusing of laser beams in the beatwave accelerator // Comments Plasma Phys. 1985. Vol. 9. P. 85.

7. Litvak A. G. Finite - amplitude wave beams in a magnetoactive plasma // Sov. Phys. JETP. 1970. Vol. 30, N 2.

МЕТОДИКА И ПРОГРАММА РАСЧЕТА ГРУППОВЫХ КОНСТАНТ ДЛЯ ВТОРИЧНЫХ ЧАСТИЦ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ В МНОГОЧАСТИЧНЫХ РЕАКЦИЯХ. МОДЕЛЬ ФАЗОВО-ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Д. С. Барабанова, Н. В. Колобянина, С. В. Мжачих, А. В. Алексеев

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Для численного решения задач термоядерного (ТЯ) синтеза необходимо осуществлять численное решение согласованных между собой кинетических уравнений переноса нейтронов и быстрых заряженных частиц (БЗЧ). Например, для решения задач выхода нейтронов из DT-мишени, обжимаемой лазерным излучением.

БЗЧ – ядра основных изотопов водорода и гелия, образуются в тепловых ТЯ процессах, в реакциях «на лету» и в нейтронно-ядерных (НЯ) процессах. Для многочастичных реакций, рождающих от 3-х частиц и более, в отличие от двухчастичных, пока не удается построить точные математические модели. Одна из проблем – нехватка экспериментальных данных. Зачастую точно не известен механизм протекания таких реакций. Для математического моделирования таких процессов исследователи вынуждены применять приближенные теории, сохраняющие энергетический баланс. Так для описания многочастичных процессов широко используется модель фазово-пространственного распределения.

Для расчета многогрупповых констант используется программный комплекс GROUND [1], созданный в 2011 г. с использованием собственных программных модулей и программных модулей пакета NJOY (США) [2]. В состав комплекса GROUND была включена собственная программа расчета групповых констант RMK2 для различных типов двухчастичных НЯ [3] и ТЯ реакций, которая в отличие от реализации в NJOY имеет расширенные возможности расчета.

В связи с вышесказанным было решено в составе программы RMK2 реализовать расчет групповых констант для многочастичных реакций по методике фазово-пространственного распределения. В качестве исходных данных в программе RMK2 используются международные библиотеки оцененных данных и отечественные базы данных в формате ENDF [4].

Расчет групповых констант для двухчастичных реакций

В таблице представлены примеры двухчастичных НЯ и ТЯ взаимодействий, для которых программа RMK2 на сегодняшний момент рассчитывает групповые константы,

где

$Q^n = (m_1 + m_2)c^2 - (m_3 + m_4)c^2$ – калорийность процесса (энергия дефекта масс),

$m_k = M_k / N_A$ – масса частицы/ядра с индексом k,

k – индекс частицы/ядра, M_k – масса, выраженная в атомных углеродных единицах (а.у.е.), константа N_A – число Авогадро.

На рис. 1 представлена общая кинематическая схема двухчастичных реакций, где α – углы вылета в лабораторной системе координат (ЛСК), а θ и ϕ – углы вылета в системе центра масс (СЦМ).

Примеры двухчастичных реакций

Тип реакции	Нейтронно-ядерные	Термоядерные
Упругое рассеяние $\left(Q^n = 0\right)$	$n + p \rightarrow p + n + Q^n$	$p + d \rightarrow d + p + Q^n$
Неупругое рассеяние $\left(Q^n < 0\right)$	$\mathrm{n} + {}^6\mathrm{Li} \rightarrow \mathrm{n} + {}^6\mathrm{Li}^* + Q^n$	$d + {}^6Li \rightarrow d + {}^6Li^* + Q^n$
Экзотермическое поглощение $\left(Q^n > 0\right)$	$n + h \rightarrow t + p + Q^n$	$d + t \rightarrow n + \alpha + Q^n$
Эндотермическое поглощение $\left(Q^n < 0\right)$	$n + h \rightarrow 2d + Q^n$	$p + t \rightarrow 2d + Q^n$

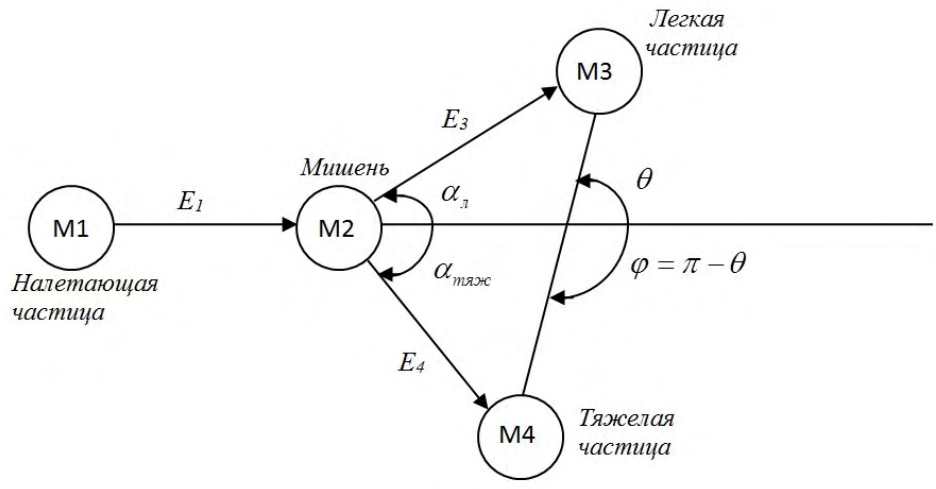


Рис. 1. Кинематическая схема двухчастичных реакций

Расчет групповых констант для многочастичных реакций

Для расчета групповых констант кинематика многочастичных реакций с образованием трех и более частиц описывается сначала в системе центра масс, а затем переводится в лабораторную. При выполнении законов сохранения энергии и импульса вторичные частицы будут распределены в конечном объеме фазового пространства продуктов реакции. В основе данной модели лежит метод равных фазовых объемов. Предполагается, что вторичные частицы распределены независимо в некотором объеме.

В качестве примера рассмотрим 3х-частичную реакцию

$$n + d \rightarrow 2n + p + Q^n,$$

где $Q^n < 0$.

Данная реакция интересна тем, что вторичные нейтроны и протон имеют примерно равные массы, что идеально подходит для описания методикой фазово-пространственного распределения.

Перейдем к алгоритму расчета групповых констант. Задаются групповые разбиения: g' – индекс группы частицы до столкновения, g_k – индекс группы частицы k после столкновения.

Групповые сечения рассчитываются по формуле

$$\sigma_{g'} = \frac{\int\limits_{E^*_{g'}}^{E_{g'-1}} \psi(E')\,\sigma(E')\,dE'}{\Psi_{g'}},$$

где

$$E^*_{g'} = \begin{Bmatrix} \max\left(\bar{E}, E_{g'}\right) & \text{для пороговых процессов} \\ E_{g'} & \text{в других случаях} \end{Bmatrix},$$

$\bar{E} = \dfrac{M}{A_2}(-Q)$ – энергетический порог реакции,

$\sigma(E')$ – сечение процесса в точке E',

$\psi(E')$ – весовая функция, имеющая физический смысл потока частиц.

Групповой поток вычисляется по формуле

$$\Psi_{g'} = \int\limits_{E_{g'}}^{E_{g'-1}} \psi(E')\,dE'.$$

Так как функции в формулах расчета групповых сечений и группового потока кусочно-линейные, то интегралы в них рассчитываются аналитически.

Элементы матрицы групповых переходов рассчитываются по формуле

$$\xi_{k,g'\rightarrow g_k} = \frac{1}{\sigma_{g'}\,\Psi_{g'}} \int\limits_{E^*_{g'}}^{E_{g'-1}} \sigma(E')\,\psi(E')\,dE' \int\limits_{\mathbb{E}^{\min}_{k,g_k}(E')}^{\mathbb{E}^{\max}_{k,g_k}(E')} dE \times$$

$$\times \int\limits_{\mu_k^{\min}(E',E)}^{1} f_k^{CM}(E', e, \chi)\, J_k(E', E, \mu)\, d\mu,$$

где

N – число вторичных частиц: $N \geq 3$; m_k – масса частицы с индексом k;

$E' = E_1$ – энергия налетающей частицы в ЛСК;

$E = E_k$ – энергия вторичной частицы с индексом k ($k \geq 3$), измеряемая в ЛСК;

$e = e_k$ – энергия частицы k в СЦМ;

$\mu = \mu_k$ – косинус угла вылета частицы k, измеряемый в ЛСК;

$\chi = \chi_k$ – косинус угла вылета частицы k в СЦМ;

$J_k(E', E, \mu)$ – якобиан преобразования из элемента $de\, d\chi$ в СЦМ в элемент $dE\, d\mu$ в ЛСК:

$$J_k(E', E, \mu) = \frac{1}{\sqrt{C_k^2 + 1 - 2C_k\,\mu}};$$

$$C_k(E', E) = \frac{1}{M}\sqrt{\frac{A_k E'}{E}};$$

$f_k^{CM}(E', e, \chi)$ – функция энерго-углового распределения частицы k в СЦМ:

$$f_k^{CM}(E', e, \chi) = D_{k,N}\sqrt{e}\left(e_k^{\max} - e\right)^{\frac{3N}{2}-4};$$

$$\chi(E', E, \mu) = J_k(\mu - C_k);$$

$$e(E', E, \mu) = E / J_k^2;$$

$e_k^{\max}(E') = \dfrac{M - A_k}{M}\left(\dfrac{A_2}{M'}E' + Q\right)$ – максимальная энергия частицы k в СЦМ;

$$D_{k,3}(E') = \frac{4}{\pi\left(e_k^{\max}\right)^2}, \qquad D_{k,4}(E') = \frac{105}{32\left(e_k^{\max}\right)^{7/2}},$$

$D_{k,5}(E') = \dfrac{256}{14\pi\left(e_k^{\max}\right)^5}$ – нормировочные множители спектра, представленные для разного числа N.

Сложность расчета по формуле матрицы групповых переходов заключается в трехкратном интегрировании по переменным пределам.

В отличие от NJOY программа RMK2 имеет возможность рассчитывать групповое распределение кинетической энергии быстрой частицы сорта k для инициирующей частицы группы g'

$$\left[\xi E\right]_{k,g'\to g_k} = \frac{1}{\sigma_{g'}\Psi_{g'}}\int_{E_{g'}^*}^{E_{g'-1}} \sigma\,\psi\, dE' \int_{\mathbb{E}_{k,g_k}^{\min}(E')}^{\mathbb{E}_{k,g_k}^{\max}(E')} E\, dE \int_{\mu_k^{\min}}^{1} f_k^{CM} J_k\, d\mu.$$

Данная формула является аналогом формулы матрицы групповых переходов, но с добавлением под интегралом энергии.

Контроль вычислений выполняется через расчет баланса энергий. Он определяется равенством

$$E_{g'}^n + Q^n = \sum_{g_3=1}^{G_3}\left[\xi E\right]_{3,g'\to g_3} + \sum_{g_4=1}^{G_4}\left[\xi E\right]_{4,g'\to g_4} + \sum_{g_5=1}^{G_5}\left[\xi E\right]_{5,g'\to g_5},$$

где

$E_{g'}^n = \dfrac{\int_{E_{g'}}^{E_{g'-1}} \psi(E')\,\sigma^n(E')\,E'\,dE'}{\Psi_{g'}\,\sigma_{g'}^n}$ – энергия инициирующих частиц группы g' для процесса n.

С одной стороны, имеем среднюю энергию налетающей частицы и калорийность рассматриваемого процесса, а с другой стороны, вклады в кинетическую энергию вторичных частиц, просуммированных по выходящим группам g_k. Анализ проведенных расчетов показал, что баланс выполняется с высокой точностью.

Программа RMK2 рассчитывает калорийности процессов, на слайде продемонстрированы формулы расчета калорийностей с учетом БЗЧ и без учета БЗЧ.

$$\varepsilon_{g'} = E_{g'}^n + Q^n - \sum_{g_3=1}^{G_3}\left[\xi E\right]_{3,g'\to g_3} - \sum_{g_4=1}^{G_4}\left[\xi E\right]_{4,g'\to g_4} - \sum_{g_5=1}^{G_5}\left[\xi E\right]_{5,g'\to g_5}.$$

Отметим, что должно выполняться условие

$$\frac{\left|\varepsilon_{g'}\right|}{E_{g'}^n + Q^n} \le 10^{-4}.$$

Калорийность процесса без учета БЗЧ рассчитывается по формулам

$$\varepsilon_{g'} = E_{g'}^n + Q^n - \sum_{g_3=1}^{G_4}\left[\xi E\right]_{g'\to g_3}^{3,n} - \sum_{g_4=1}^{G_4}\left[\xi E\right]_{g'\to g_4}^{4,n} -$$

в результате реакции образуются два нейтрона $(k = 3,4)$,

$\varepsilon_{g'} = E_{g'}^n + Q^n$ в результате реакции не образуются нейтроны.

Элементы матрицы коэффициентов Фурье определяются по формуле

$$\omega^{(l)}_{k,g'\to g_k} = \frac{1}{\sigma_{g'}\,\Psi_{g'}\,\xi_{k,g'\to g_k}} \int\limits_{E^*_{g'}}^{E_{g'-1}} \sigma\,\psi\,dE' \times$$

$$\times \int\limits_{\mathbb{E}^{\min}_{k,g_k}(E')}^{\mathbb{E}^{\max}_{k,g_k}(E')} dE \int\limits_{\mu_k^{\min}}^{1} f_k^{CM} J_k\, P_l(\mu)\, d\mu.$$

Для расчета $P_l(\mu)$ в точке μ используются рекуррентные соотношения.

Свойство функции f_k^{CM}:

$$\int\limits_0^{\infty} dE \int\limits_{-1}^{1} f_k^{CM} J_k\, d\mu = 1 \Rightarrow \sum_{g_k=1}^{G_k} \xi_{k,g'\to g_k} = 1.$$

Для расчета индикатрисы выхода частиц в ЛСК при фиксированном групповом переходе используется функция, которая представляется конечным рядом Фурье по полиномам Лежандра

$$\omega_{k,g'\to g_k}(\mu) = \sum_{l=0}^{L} \frac{2l+1}{2}\,\omega^{(l)}_{k,g'\to g_k} P_l(\mu).$$

На рис. 2 представлен график зависимости нейтронной индикатрисы от угловой переменной μ. График построен для перехода из 1-й группы в 4-ю, которая является самой первой группой, куда нейтрон может вылететь.

Из рис. 2 видно, что при увеличении числа гармоник индикатриса стремится к табулированному, точному представлению, т. е. для более корректного описания индикатрисы необходимо использовать большее число гармоник.

Также видно, что для конкретного группового перехода индикатрисе свойственны интервалы с узкой областью определения.

Особенности расчета и программной реализации

Во всех формулах интегралы по энергии рассчитывались методом численного интегрирования с помощью квадратур Гаусса [5–7], а интегралы по углу двумя способами: методом численного интегрирования и аналитическим методом.

Расчеты показали, что первый вариант оказался затратным по времени, поэтому нами было уделено большое внимание ускорению и оптимизации расчета. В связи с этим был реализован аналитический расчет интеграла по угловой переменной.

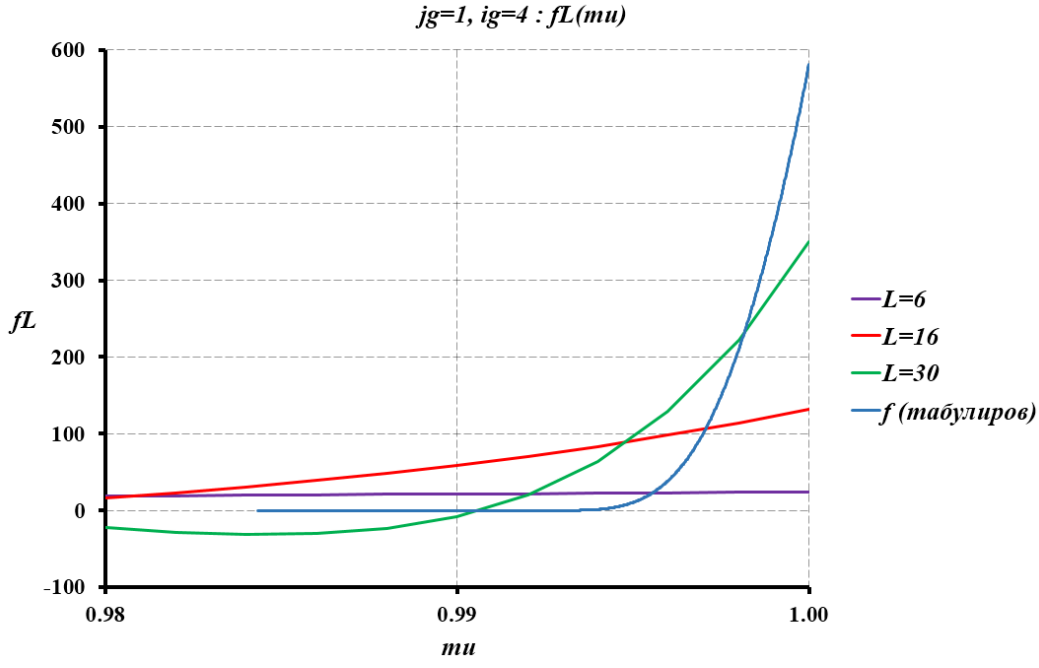


Рис. 2. График зависимости нейтронной индикатрисы по угловой переменной для группового перехода $[13.91; 14.19]$ МэВ $\Rightarrow$ $[10.94; 11.98]$ МэВ: 1, 2 , 3 – графики соответствуют индикатрисе, полученной с помощью P_L -приближения; 4 – график – табулированная индикатриса

Полиномы Лежандра представляются в виде

$$P_l(\mu) = \sum_{m=0}^{[l/2]} B_l^{(m)} \mu^{l-2m}.$$

Для расчета коэффициентов $B_l^{(m)}$ используются рекуррентные соотношения:

$$B_0^{(0)} = B_1^{(0)} = 1;$$

при $l \geq 2$: $B_l^{(m)} = \left(1 - \frac{l-0,5}{m}\right) B_{l-2}^{(m-1)}$, $m = \overline{1,[l/2]}$

$B_l^{(0)} = \left(2 - \frac{1}{l}\right) B_{l-1}^{(0)}$ ёили $B_l^{(0)} = 1 - \sum_{m=1}^{[l/2]} B_l^{(m)}$ (для контроля точности).

Сначала величины $B_l^{(m)}$ рассчитываются в рабочий массив типа real(16), но в дальнейших расчетах используется массив значений $B_l^{(m)}$ типа real(8). Заметим, массив $B_l^{(m)}$ не зависит от процесса, группового перехода и индекса *k*.

Таким образом, в программе RMK2: используются вещественные переменные только типа real(8), расчет матриц ξ, $[\xi E]$ и $\omega^{(l)}$ ведется одновременно, т. е. на единых узлах E' и E. В результате чего было получено ускорение расчета в 20–30 раз. Но есть ограничение: аналитика работает хуже для большого числа гармоник, в таком случае необходимо использовать метод численного интегрирования.

Заключение

В составе собственной программы RMK2 реализован алгоритм расчета групповых констант для многочастичных НЯ и ТЯ реакций на основе модели фазово-пространственного распределения.

Результатами расчета являются групповые сечения, матрицы групповых переходов, групповое распределение кинетической энергии вторичных частиц, матрицы коэффициентов Фурье индикатрисы выхода частиц, индикатриса вылета в ЛСК. Проведен расчет баланса энергий и калорийностей процесса. В качестве примера была рассмотрена трехчастичная реакция $n + d \to 2n + p$.

В ходе работы было проведено сравнение результатов расчетов групповых констант программы RMK2 с помощью двух способов определения интеграла по угловой переменной (аналитического и численного). Анализ показал совпадение результатов с высокой точностью. Аналитический метод предпочтительнее из-за экономии времени счета.

Были проведены сравнительные расчеты с NJOY, в результате которых получили совпадение результатов с высокой точностью.

Литература

1. Алексеев А. В., Крутько Н. А., Бнятов А. В., Касаткин С. С. Программный комплекс GROUND константного обеспечения ядерно-физическими данными / 66-я международная конференция «Ядро-2016» по проблемам ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра // Сб. докл. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2016

2. MacFarlane R. E., Muir D. W. The NJOY Nuclear Data Processing System. Version 91, LA-12740-M, October 1994.

3. Барабанова Д. С., Колобянина Н. В., Мжачих С. В., Алексеев А. В. Методика и программа расчета групповых констант для вторичных частиц, образующихся в нейтронно-ядерных реакциях на изотопах водорода и гелия / 16-я научно-техническая конференция «Молодежь в науке» // Сб. докл. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2018. Т. 1.

4. Herman M. and members of the cross section evaluation working group ENDF-6 Formats Manual. Report BNL-NCS-44945-05-Rev. July 1990 // N. Y.: BNL, Revised June 2005.

5. Крылов В. И., Шульгина Л. Т. Справочная книга по численному интегрированию. М.: Наука, 1966.

6. Davis P., Rabinowitz P. Abscissas and weights for Gaussian quadratures of high order // J. Research NBS. 1956. Vol. 56, N 1. P. 35–37.

7. Davis P., Rabinowitz P. Additional abscissas and weights for Gaussian quadratures of high order: Values for *n* = 64, 80, and 96 // J. Research NBS. 1958. Vol. 60, N 6. P. 613–614.

МИКРОСКОПИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРОЕНИЯ ФРОНТА УДАРНОЙ ВОЛНЫ

А. С. Буркацкий[1], *Ю. Б. Кудасов*[1,2], *Д. А. Маслов*[1,2], *В. Н. Павлов*[2], *О. М. Сурдин*[1,2]

[1]СарФТИ НИЯУ МИФИ, г. Саров Нижегородской обл.
[2]ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Для анализа ударно-волновых явлений часто используется гидродинамическое приближение, которое весьма точно характеризует поведение вещества в ударных волнах (УВ) высокой интенсивности, когда развиваемые давления чрезмерно превышают предел текучести материала. Но с ослаблением ударной нагрузки упругопластические свойства играют большую роль. При движении ударной волны происходит упругопластическое деформирование твердого тела. При напряжениях до предела текучести материала, вещество упруго сжимается, при больших напряжениях начинается пластическая область. Из-за разницы продольных сжимаемостей (и звуковых скоростей) в упругом диапазоне напряжений и пластическом могут выделяться упругие предвестники, в которых может быть реализовано упругое одноосное сжатие твердого тела [1].

Важной фундаментальной задачей является изучение строения фронта стационарной ударной волны в кристаллическом теле. Изучение проблемы возможно в рамках методов молекулярной динамики, однако, этот подход является ресурсозатратным. На примере модели классических частиц в кристалле алюминия с гранецентрированной кубической (ГЦК) решеткой рассматривается альтернативная методика расчета структуры фронта стационарной ударной волны, сопровождающейся упругим одноосным сжатием вещества.

Предполагается, что разработанный в данной работе подход к определению структуры фронта ударной волны будет в дальнейшем использован для расчетов в реальных кристаллах посредством программного пакета квантово-механических вычислений Quantum ESPRESSO (QE). Решение подобной задачи позволило бы определить распределение электронной плотности и структуру электрических полей вблизи фронта ударной волны (ФУВ), а также исследовать устойчивость структуры вещества за ФУВ (упругого предвестника) и определить динамический предел текучести.

Одномерный кристалл и ударная адиабата

Рассмотрим одномерный кристалл как цепочку одинаковых частиц, расположенных равноудаленно друг от друга вдоль прямой. Ограничимся только продольными перемещениями частиц. Вначале предположим, что взаимодействие имеет место только между ближайшими соседями. Потенциал взаимодействия между частицами выберем в форме Леннард-Джонса (рис. 1)

$$U = \frac{U_0}{n-m} \cdot \left(\frac{n \cdot a^m}{r^m} - \frac{m \cdot a^n}{r^n} \right), \qquad (1)$$

где U_0 – потенциал взаимодействия в равновесном положении (глубина потенциальной ямы, взятая со знаком минус), m, n – параметры потенциала, характеризующие силы притяжения и отталкивания между двумя соседними частицами, r – расстояние между частицами, a – равновесное расстояние между частицами.

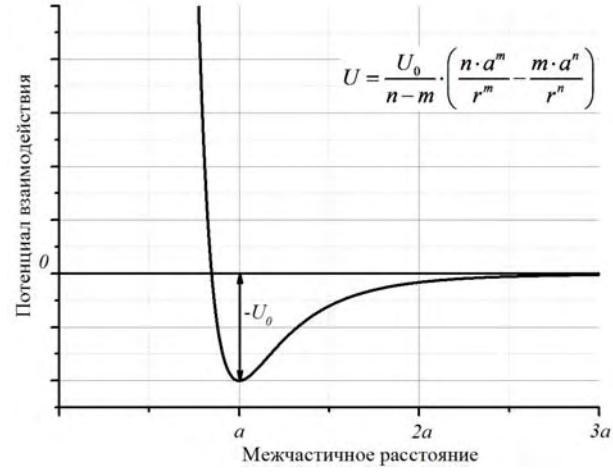


Рис. 1. Характерный вид потенциала Леннард-Джонса

Сила взаимодействия двух соседних частиц определяется через производную потенциала и всегда ориентирована так, чтобы установить равновесное расстояние между частицами

$$F(r) = -\frac{dU}{dr} = \frac{m \cdot n \cdot U_0}{n-m} \left(\frac{a^m}{r^{m+1}} - \frac{a^n}{r^{n+1}} \right). \qquad (2)$$

Скорость звука в кристалле в невозмущенном состоянии равна

$$c=\sqrt{\left.\frac{dF(\tau)}{d\tau}\right|_{\tau=\tau_0=M\,a^{-1}}}=\sqrt{-\frac{m\cdot n\cdot U_0}{M}}\,, \qquad (3)$$

где $\tau=M/r$ и $\tau_0=M/a$ – массовые линейные плотности кристалла в произвольном и равновесном состоянии соответственно, M – масса частицы.

Для получения формулы ударной адиабаты в одномерном кристалле выпишем законы сохранения массы и импульса при прохождении вещества через ФУВ

$$\tau_0\cdot D=\tau(D-u)\,, \qquad (4)$$

$$\tau_0\cdot D\cdot u=F-F_0\,, \qquad (5)$$

где D – скорость ФУВ, u – скорость вещества за поверхностью разрыва, F и $F_0=0$ – силы парного взаимодействия за и перед поверхностью разрыва. При рассмотрении распространения УВ по ненапряжённому кристаллу $F_0=0$.

Нормируем плотность вещества за ФУВ на плотность вещества до поверхности разрыва, скорости – на скорость звука в кристалле в невозмущенном состоянии, а силы – на $\tau_0\cdot c^2$.

$$d=t(d-\upsilon)\,, \qquad (6)$$

$$d\cdot\upsilon=f\,, \qquad (7)$$

где $t=\tau/\tau_0$ – обезразмеренная массовая линейная плотность кристалла, $d=D/c$ – обезразмеренная скорость фронта ударной волны, $\upsilon=u/c$ – обезразмеренная скорость вещества за ФУВ, $f=F/\tau_0c^2$ – обезразмеренная сила парного взаимодействия, действующая между частицами за ФУВ.

С учётом выражений

$$F(\tau)=F(r)\big|_{r=M/\tau}=\frac{m\cdot n\cdot U_0}{n-m}\left(\frac{a^m\cdot\tau^{m+1}}{M^{m+1}}-\frac{a^n\cdot\tau^{n+1}}{M^{n+1}}\right), \qquad (8)$$

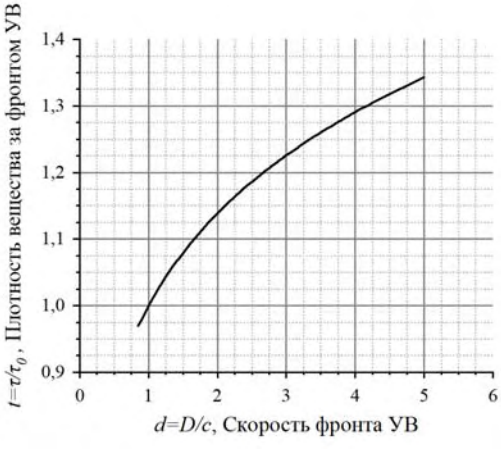
$$F(t)=F(\tau)\big|_{\tau=\tau_0\cdot t=(M/a)t}=\frac{m\cdot n\cdot U_0}{a(n-m)}\left(t^{m+1}-t^{n+1}\right), \qquad (9)$$

$$f(t)=\frac{F(t)}{\tau_0\cdot c^2}=\left(t^{m+1}-t^{n+1}\right)\Big/(m-n) \qquad (10)$$

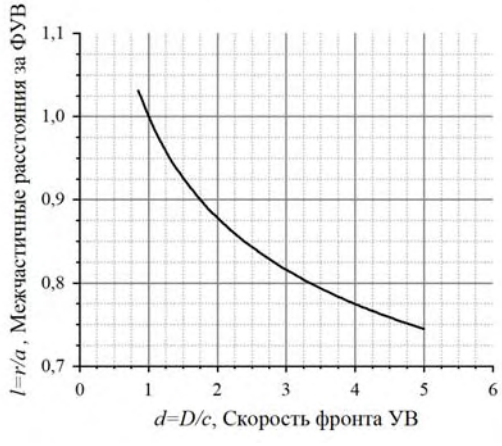
получаем систему трёх уравнений для нахождения параметров вещества за ФУВ в зависимости от обезразмеренной скорости УВ.

$$\begin{cases} d=t(d-\upsilon), \\ d\,\upsilon=f(t), \\ f(t)=\left(t^{m+1}-t^{n+1}\right)\Big/(m-n). \end{cases} \qquad (11)$$

Численное решение системы (11) позволяет построить графики зависимостей $t(d)$, $l(d)$, $\upsilon(d)$, $f(d)$ – рис. 2–3. Отметим отдельно, что система имеет математическое решение в области $d<1$, которое, однако, не имеет физического смысла, т. к. скорость ФУВ здесь меньше скорости звука. Поэтому для этой области получены отрицательная скорость вещества и растяжение кристалла за ФУВ.

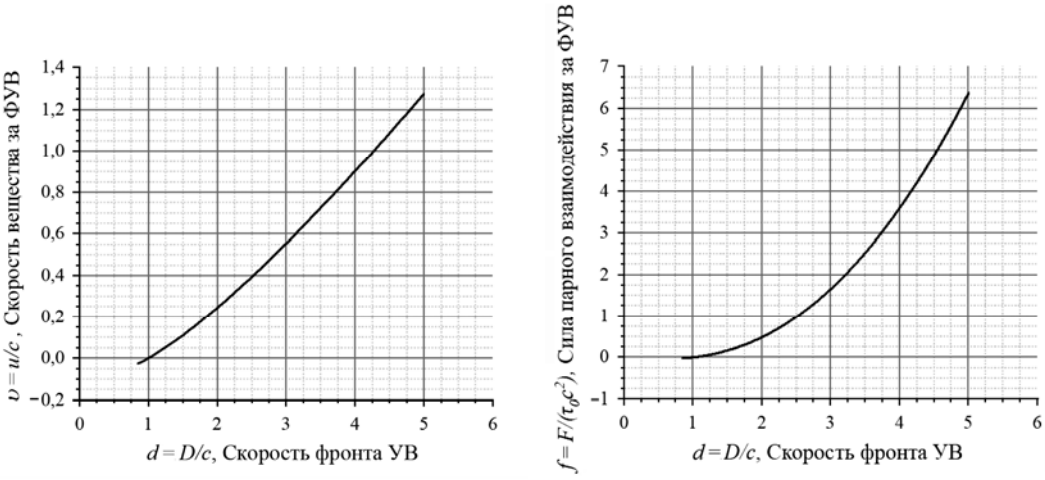


а



б

Рис. 2. Графики зависимости параметров вещества за ФУВ от скорости УВ: а – плотности, б – межчастичных расстояний



а б

Рис. 3. Графики зависимости параметров вещества за ФУВ от скорости УВ: а – массовой скорости, б – силы парного взаимодействия

Теория расчёта распределения частиц во фронте ударной волны

Стационарность УВ обуславливает особое ограничение: при прохождении ФУВ через частицы вещества, каждая частица проходит через один и тот же набор состояний. Под состоянием в этом случае подразумевается скорость частицы и равнодействующая сила.

Расчет распределения будем вести итерационным методом. Воспользуемся законом сохранения масс (6) и определением скорости для отдельных частиц

$$d = t_i\left(d - \upsilon_i\right), \tag{12}$$

$$\upsilon_i = \upsilon_{i-1} + \Delta\upsilon_i, \tag{13}$$

где υ_i – обезразмеренная скорость *i-ой* частицы, $\Delta\upsilon_i$ – разница обезразмеренных скоростей *i*-ой и (*i*-1)-ой частиц, t_i – обезразмеренная массовая линейная плотность в окрестностях *i*-ой частицы.

С учетом преобразований получим выражения удобные для расчета

$$l_i = \left(d - \upsilon_i\right)/d, \tag{14}$$

$$\upsilon_i = \upsilon_{i-1} + \frac{f_i}{d}, \tag{15}$$

где $l_i = 1/t_i$ – межчастичное расстояние между *i*-ой и (*i*-1)-ой частиц, f_i – равнодействующая сила, действующая на *i*-ую частицу.

Вычисление равнодействующей силы f_i будем вести согласно формуле (16), выведенной из формулы (10) для всех частиц, а для последний частицы f_{count}, так как нет одного из соседей, нужно вводить дополнительную силу «поршня» F_{end}, которая бы действовала на частицу со стороны отсутствующего соседа (17). По сути, сила является силой парного взаимодействия с соседней частицей. Эта сила «поршня» является решением системы (11).

$$f\left(l_i\right) = \left(l_i^{-m-1} - l_i^{-n-1}\right)\Big/\left(m-n\right), \tag{16}$$

$$f_N = F_{end} - \left(l_N^{-m-1} - l_N^{-n-1}\right)\Big/\left(m-n\right). \tag{17}$$

Тогда получим систему уравнений (18)

$$\begin{cases} f_i = \left(\left(l_{i+1}^{-m-1} - l_{i+1}^{-n-1}\right) - \left(l_i^{-m-1} - l_i^{-n-1}\right)\right)\Big/\left(m-n\right), \\ f_N = F_{end} - \dfrac{l_N^{-m-1} - l_N^{-n-1}}{m-n}, \\ \upsilon_i = \upsilon_{i-1} + \dfrac{f_i}{d}, \\ l_i = \left(d - \upsilon_i\right)/d. \end{cases} \tag{18}$$

Для первой итерации задается начальное распределение межчастичных расстояний, по которым рассчитываются силы, а по ним скорости частиц, через которые снова определяются межчастичные расстояния. Таким образом, можно найти распределения массовой плотности, межчастичных расстояний, массовых скоростей, равнодействующих сил для различных скоростей УВ.

Также можно оценить ширину ФУВ. Ширина ФУВ считается как сумма межчастичных расстояний частиц, которые находятся в ФУВ. Частица находится в ФУВ, если она удовлетворяет условию (19). График зависимости ширины ФУВ от скорости ФУВ представлен на рис. 4.

$$l_1 - 0{,}99\cdot\left(l_1 - l_N\right) \le l_i \le l_1 - 0{,}01\cdot\left(l_1 - l_N\right), \tag{19}$$

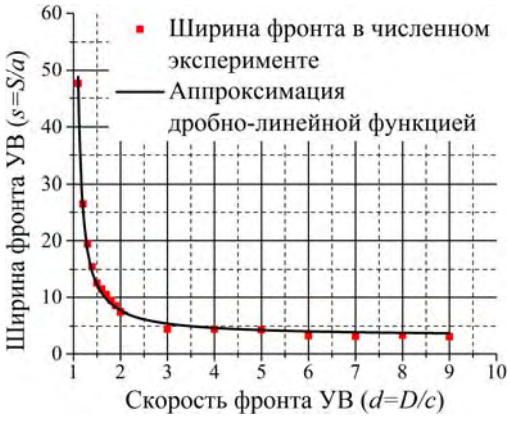


Рис. 4. График зависимости ширины ФУВ от скорости ФУВ

Алюминий в ГЦК фазе

Данная методика применима для произвольных кристаллических структур металлов, в том числе и для кристаллического алюминия. Выбран алюминий для расчетов, потому как к настоящему времени известны многие параметры материала, в частности авторы работы [2], исследуя алюминий, проводили полноэлектронные расчеты в программе WIEN2k. Результаты были подтверждены экспериментами в Сандийских национальных лабораториях. Для сравнения своих результатов мы используем некоторые материалы исследования этих авторов.

Вернемся к расчетам структуры ФУВ. Чтобы перейти к другой структуре кристалла (рис. 5) следует только обобщить силы (20–22) и скорости звука на рассматриваемую структуру, и под межчастичными расстояниями понимать межплоскостные расстояния.

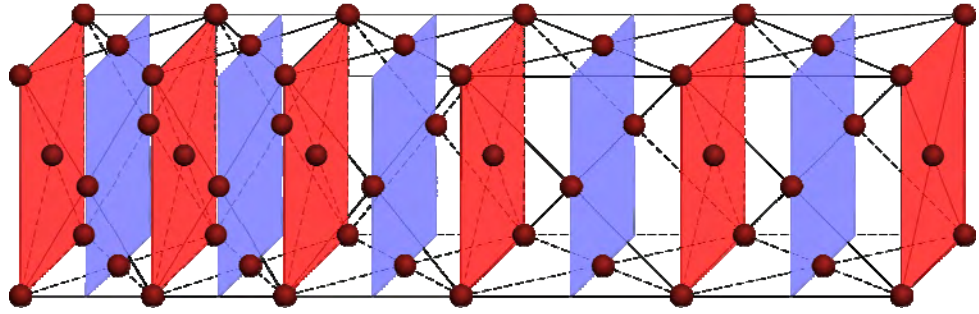


Рис. 5. Возможный вид кристаллической решетки на ФУВ

$$f(t)=\frac{4\,t\left(\left(\frac{\sqrt{2}\,t}{\sqrt{1+t^2}}\right)^m-\left(\frac{\sqrt{2}\,t}{\sqrt{1+t^2}}\right)^n\right)}{(m-n)\left(1+t^2\right)}, \tag{20}$$

$$f_i=\frac{8\,a\,l_{i+1}\left(\left(\frac{\sqrt{2}\,a}{\sqrt{a^2+4\,l_{i+1}^2}}\right)^m-\left(\frac{\sqrt{2}\,a}{\sqrt{a^2+4\,l_{i+1}^2}}\right)^n\right)}{(m-n)\left(a^2+4\,l_{i+1}^2\right)}-\frac{8\,a\,l_i\left(\left(\frac{\sqrt{2}\,a}{\sqrt{a^2+4\,l_i^2}}\right)^m-\left(\frac{\sqrt{2}\,a}{\sqrt{a^2+4\,l_i^2}}\right)^n\right)}{(m-n)\left(a^2+4\,l_i^2\right)}, \tag{21}$$

$$f_N=F_{end}-\frac{8\,a\,l_N\left(\left(\frac{\sqrt{2}\,a}{\sqrt{a^2+4\,l_N^2}}\right)^m-\left(\frac{\sqrt{2}\,a}{\sqrt{a^2+4\,l_N^2}}\right)^n\right)}{(m-n)\left(a^2+4\,l_N^2\right)}. \tag{22}$$

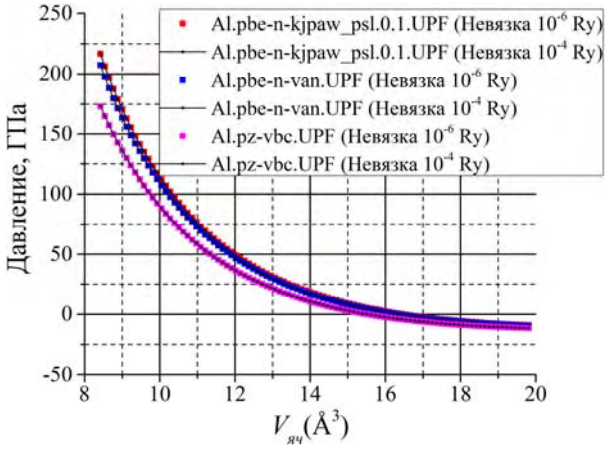
Необходимо знать потенциал взаимодействия. Его параметры мы подберем в следующем разделе работы.

Определение параметров расчета электронной структуры в QE

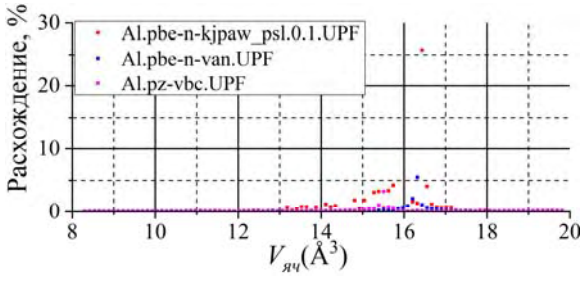
Параметры потенциала будем определять по кривой одноосного сжатия, построенной благодаря серии проведенных квантово-механических расчетов в QE. Программный пакет QE вычисляет электронную структуру методом псевдопотенциалов, за счет чего достигается выигрыш во времени, по сравнению с полноэлектронными расчетами, реализованными в пакете WIEN2k.

Была разработана методика определения оптимальных параметров расчета.

Для двух невязок, характеризующих точность вычислений, были проведены расчеты и построены графики всестороннего сжатия. Из графиков на рис. 6 видно, что результаты с невязками 10^{-6} Ry и 10^{-4} Ry согласуются друг с другом в сжатом состоянии с погрешностью в несколько сотен бар, наименьшее согласие наблюдается в несжатом состоянии. Для исследования сжатия кристалла данная погрешность рассматривается как удовлетворительная. Тогда следует выбирать параметры расчетов для меньшей невязки (10^{-4} Ry) – можно получить выигрыш во времени расчета и в объеме выделяемой оперативной памяти.



а



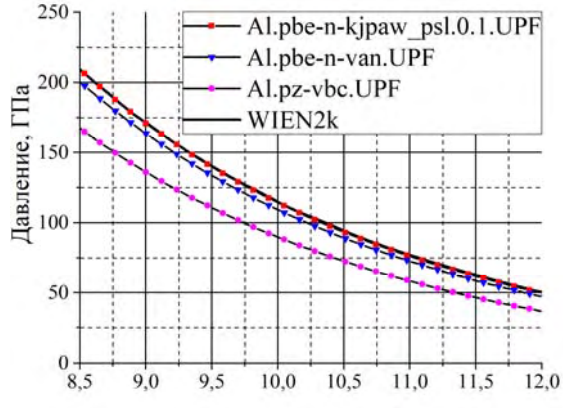
б

Рис. 6. Графики: а – кривых всестороннего сжатия, б – расхождения кривых всестороннего сжатия

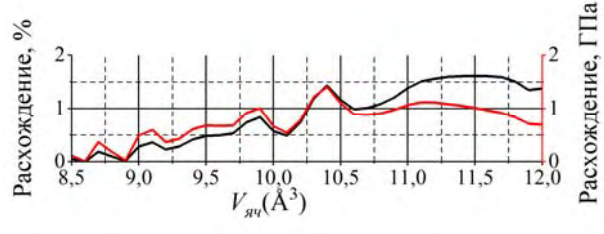
График кривых всестороннего сжатия, рис.6а, построен по расчетам в QE с тремя псевдопотенциалами для двух невязок. Рис. 6б - график расхождения кривых всестороннего сжатия для невязок 10-6 и 10-4 Ry.

Сравнение с кривой из WIEN2k

Для выбора псевдопотенциала для расчетов по одноосному сжатию произведено сравнение кривых всестороннего сжатия из расчетов в QE и кривой по расчетам в WIEN2k (рис. 7), предоставленной авторами вышеназванной работы. Наиболее точно расчетам из WIEN2k соответствуют расчеты с псевдопотенциалом Al.pbe-n-kjpaw_psl.0.1.UPF, расхождение составляет не более 2 % (не более 2 ГПа).



а



б

Рис. 7. Графики: а - кривых всестороннего сжатия, б - расхождения кривых всестороннего сжатия

График сравнения кривых всестороннего сжатия, рис. 7а, получен из программного пакета QE с невязкой 10^{-6} Ry и из WIEN2k. График расхождения кривых всестороннего сжатия, рис. 7б, получен из программного пакета QE с псевдопотенциалом Al.pbe-n-kjpaw_psl.0.1.UPF и из WIEN2k.

С псевдопотенциалом Al.pbe-n-kjpaw_psl.0.1.UPF были проведены расчеты и построена кривая одноосного сжатия, аппроксимация которой позволила получить параметры потенциала, записанного в форме Леннард-Джонса.

Сравнение с результатами других источников

С найденными параметрами потенциала в форме Леннард-Джонса проведены расчеты ударной адиабаты и распределения частиц во фронте ударной волны в направлении [100]. Полученные в нашем численном эксперименте ударные адиабаты качественно не противоречат (рис. 8) экспериментальным данным и данным численного моделирования, рассмотренным в статье [3].

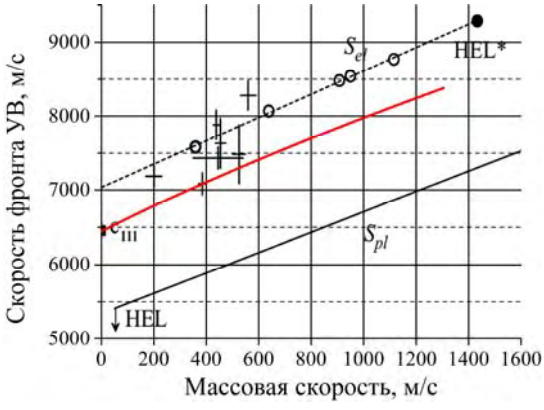


Рис. 8. График зависимости скорости ФУВ от массовой скорости вещества

Средняя линия на рис. 8 соответствует упругой адиабате, полученной по рассмотренной выше методике для направления [100].

Помеченные крестиком точки на рис. 8 – результаты экспериментов с фемтосекундным лазером.

Пластическая адиабата S_{pl}, рис. 8, построена по экспериментальным данным.

Упругая адиабата S_{pl}, рис. 8, одноосного ударного сжатия по направлению [111] проходит через кружки, полученные с помощью МД моделирования.

Результаты моделирования

Получены распределения величин на ФУВ (рис. 9–12) для направления [100] и скорости УВ 7090 м/с, что превышает продольную скорость звука на 10 %.

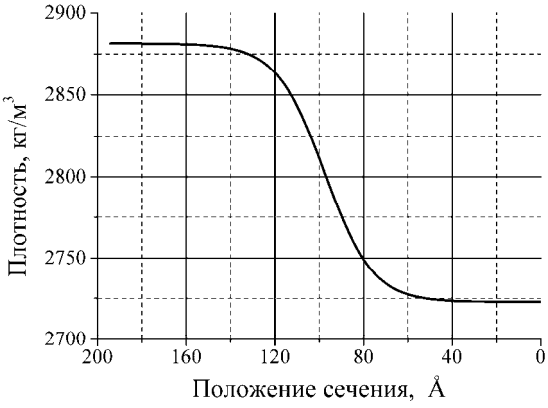


Рис. 9. График распределения плотности в ФУВ

Рис. 10. График распределения массовой скорости в ФУВ

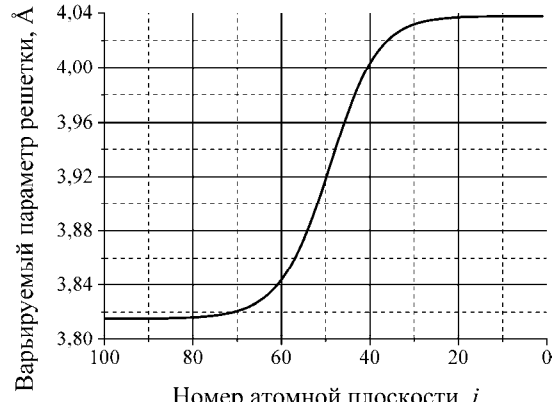


Рис. 11. График зависимости параметра решетки b от номера атомной плоскости в ФУВ

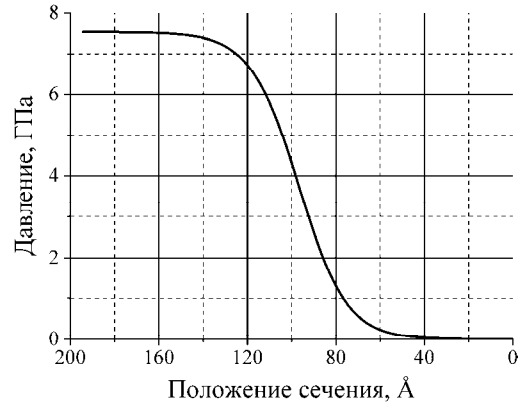


Рис. 12. График распределения нормального давления, приложенного к площадке (100)

Построен график зависимости ширины фронта от скорости ударной волны (рис. 13). При скорости УВ на 10 % больше продольной скорости звука ширина ФУВ составит около 170 ангстрем.

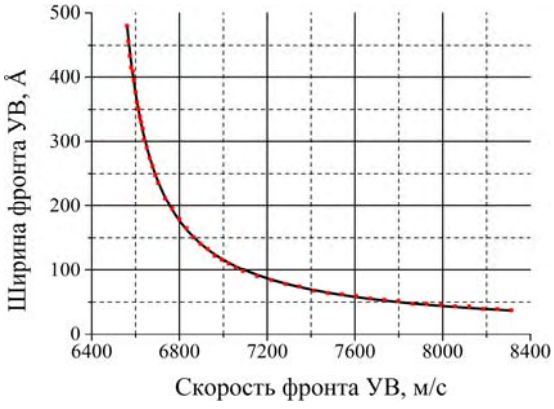


Рис. 13. График зависимости ширины ФУВ от скорости ФУВ в кристаллическом алюминии

Заключение

На примере модели классических частиц в кристалле алюминия с ГЦК решеткой показана возможность расчета структуры фронта стационарной ударной волны, сопровождающейся упругим одноосным сжатием вещества вдоль направления [100]. Полученные в данной работе межплоскостные расстояния в ГЦК-фазе алюминия для ФУВ в дальнейшем будут применяться при задании супер ячейки в квантово-механических расчетах в качестве исходного приближения. Это, в свою очередь, позволит определить распределение электронной плотности и структуру электрических полей вблизи ФУВ, а также исследовать устойчивость структуры вещества за ФУВ (упругого предвестника) и определить динамический предел текучести.

Литература

1. Канель Г. И., Разоренов С. В., Уткин А. В. , Фортов В. Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. М.: Янус-К, 1996.

2. Кудасов Ю. Б., Сурдин О. М., Коршунов А. С., Павлов В. Н., Фролова Н. В., Кузин Р. С. Динамика решетки и фазовая диаграмма алюминия при высоких давлениях // Письма в ЖЭТФ. 2013. Т. 144. Вып. 4 (10) / С. 765–773.

3. Жаховский В. В., Иногамов Н. А. Упруго-пластические явления в ультракоротких ударных волнах // Письма в ЖЭТФ. 2010. Т. 92. Вып. 8 (10). С. 574–579.

РЕАЛИЗАЦИЯ ИСКУССТВЕННОЙ ВЯЗКОСТИ ТЕНЗОРНОГО ВИДА В МЕТОДИКЕ МИМОЗА

А. В. Воеводин, М. Н. Мицура

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Методология использования искусственной вязкости была разработана Нейманом и Рихтмайером [1] при расчетах одномерных ударных волн более полвека назад и до сих пор остается удобным и широко применяющимся численным средством. В общем виде вязкость Неймана – Рихтмайера можно записать в следующем виде:

$$q = c_L \rho c_s |\Delta v| + c_Q \rho (\Delta v)^2 . \qquad (1)$$

Здесь, как обычно, c_s – скорость звука перед фронтом ударной волны, Δv – скачок скорости на разрыве, c_L, c_Q – соответственно коэффициенты линейной и квадратичной вязкости. Ширина фронта ударной волны при этом всегда зависит от характерного размера ячеек расчетной сетки, что приводит к неизбежным трудностям и ограничениям, особенно при использовании неравномерных счетных сеток. С той поры постоянно продолжаются работы по поиску новых, более совершенных форм искусственной вязкости.

В работе М. Ю. Шашкова [2] приведен алгоритм реализации искусственной вязкости тензорного вида. Преимущество изложенной в этих работах тензорной вязкости состоит в уменьшении зависимости численного решения от структуры сеток. Данный алгоритм был реализован в рамках программы расчета двумерной лагранжевой газодинамики методики МИМОЗА[3]. Ранее данный алгоритм тензорной вязкости был реализован в методике Д [4] и комплексе ЛЭГАК [5]. За основу выражения тензорной вязкости была взята форма В. Ф. Куропатенко [6], которая имеет следующий вид:

$$q_{K_{ur}} = \rho \left\{ c_2 \frac{\gamma+1}{4} |\Delta v| + \sqrt{c_2^2 \left(\frac{\gamma+1}{4} \right)^2 (\Delta v)^2 + c_1^2 c_s^2} \right\} |\Delta v| \qquad (2)$$

где Δv – скачок скорости на разрыве, $c_1 = c_2 = 1$ – безразмерные константы (соответственно, линейные и нелинейные члены искусственной вязкости), γ – отношение удельных теплоемкостей, ρ и c_s – плотность и скорость звука в ячейке.

Данное выражение (2) не стремится к нулю при всестороннем сжатии. Первое решение этой проблемы заключается в использовании тензорной формы, которая имеет сходство с физической вязкостью жидкости; второе решение заключается в формулировке TVD-ограничителя простой адвекции Кристиансена [7].

Реализация алгоритма тензорной вязкости

Рассмотрим систему дифференциальных уравнений, которая используется в методике МИМОЗА для описания движения сплошной среды:

$$\begin{gathered} d\frac{1}{\rho} \\ \rho \frac{}{dt} = div \vec{U} \\ \rho \frac{d\vec{U}}{dt} = -grad\, P + div\, S \\ \frac{dE}{dt} = -P d\frac{1}{\rho} + \frac{1}{\rho} Sp(S \cdot D) \\ \frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{U} \end{gathered} \qquad (3)$$

где ρ – плотность вещества, $\vec{U}$ – вектор скорости, P – давление, S – девиатор тензора напряжений, E – внутренняя энергия, D – тензор скоростей деформаций, $Sp(S \cdot D)$ – первый инвариант, $\vec{r}$ – радиус-вектор.

Система дифференциальных уравнений (3) замыкается уравнением состояния (4).

$$P = P(\rho, E) \qquad (4)$$

В работе [2] вводится искусственная вязкость на основе дискретного приближения непрерывной функции Q тензорного вида, которая есть произведение скалярного коэффициента на тензор скоростей деформаций

$$Q = \mu D \qquad (5)$$

В скалярный множитель входит вязкий член в форме Куропатенко [6] и функция-ограничитель, которая используется для отключения действия вязкости при безударном сжатии и вращении как твердого тела.

Тензорная искусственная вязкость входит в уравнения газовой динамики следующим образом

(члены полного уравнения, отвечающие за учет действия сил давления, для наглядности опущены)

$$\begin{cases} \rho\dfrac{d\vec{u}}{dt} = div(\mu G), \\ \rho\dfrac{de}{dt} = G \cdot\cdot \mu G. \end{cases} \tag{6}$$

здесь G – тензор градиента скорости $\left(G_{ij} = \dfrac{\partial u_i}{\partial x_i}, i, j, = x, y\right)$, μ – скалярный вязкий множитель, имеющий определенную размерность, $G \cdot\cdot \mu G$ – скалярное произведение векторов.

Для построения аппроксимации этой системы необходимо определить дискретную форму дифференциальных операторов *div* и *grad*. Для этого сначала определим вид этих операторов в непрерывной форме в общей криволинейной системе координат. Далее, на основе полученных выражений, построим дискретную форму для регулярной сетки.

Непрерывная форма:

$$G = grad\,\vec{u} = \begin{pmatrix} \dfrac{du_x}{dx} & \dfrac{du_x}{dy} \\ \dfrac{du_y}{dx} & \dfrac{du_y}{dy} \end{pmatrix} \tag{7}$$

$$divT = \frac{1}{\sqrt{|g|}}\left(\frac{\partial}{\partial\xi}\left(\sqrt{|g|}\,\frac{T^{\xi} - T^{\eta}\cos\theta}{\sqrt{g_{\xi\xi}}\sin^2\theta}\right) + \right.$$

$$\left. + \frac{\partial}{\partial\eta}\left(\sqrt{|g|}\,\frac{T^{\eta} - T^{\xi}\cos\theta}{\sqrt{g_{\eta\eta}}\sin^2\theta}\right)\right) \tag{8}$$

Непрерывная форма оператора дивергенции произвольного тензора T, получена из условия что оператор дивергенции DIV является отрицательно сопряженным оператору GRAD.

При выводе дискретных операторов перейдем к локальной системе координат, связанной с линиями основной сетки и будем считать, что –линии являются строками, а η – линии – столбцами (рис. 1).

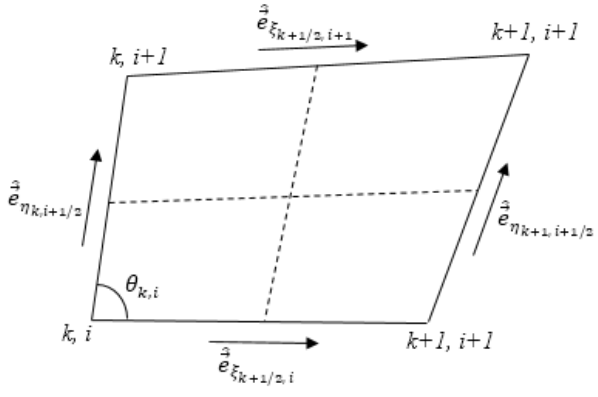


Рис.1. Ячейка регулярной счетной сетки

Дискретный аналог выражения (7)

$$G^{\xi}_{k+\frac{1}{2},i} = \left(\frac{u_{x_{k+1,i}} - u_{x_{k,i}}}{l_{\xi_{k+\frac{1}{2},i}}};\ \frac{u_{y_{k+1,i}} - u_{x_{k,i}}}{l_{\xi_{k+\frac{1}{2},i}}}\right) \tag{9}$$

$$G^{\eta}_{k,i+\frac{1}{2}} = \left(\frac{u_{x_{k,i+1}} - u_{x_{k,i}}}{l_{\eta_{k,i+\frac{1}{2},i}}};\ \frac{u_{y_{k,i+1}} - u_{x_{k,i}}}{l_{\eta_{k,i+\frac{1}{2}}}}\right) \tag{10}$$

Дискретная форма оператора дивергенции произвольного тензора T:

$$\left(DIV\,T\right)_{k,i} = \frac{1}{V_{k,i}}\left\{\vec{f}^{\,k+\frac{1}{2},i+\frac{1}{2}}_{k,i} + \vec{f}^{\,k-\frac{1}{2},i+\frac{1}{2}}_{k,i} + \right.$$

$$\left. + \vec{f}^{\,k-\frac{1}{2},i-\frac{1}{2}}_{k,i} + \vec{f}^{\,k+\frac{1}{2},i-\frac{1}{2}}_{k,i}\right\} \tag{11}$$

Здесь силы $\vec{f}$, входящие в правую часть, имеют вид:

$$\vec{f}^{\,k+\frac{1}{2},i+\frac{1}{2}}_{k,i} = V^{k+\frac{1}{2},i+\frac{1}{2}} \times$$

$$\times\left\{\frac{1}{l_{\xi_{k+\frac{1}{2},i}}}\left[\left(\frac{W}{\sin^2\theta}\right)^{k+\frac{1}{2},i+\frac{1}{2}}_{k,i}\left(T^{\xi}_{k+\frac{1}{2},i} - \cos\theta^{k+\frac{1}{2},i+\frac{1}{2}}_{k,i} \times\right.\right.\right.$$

$$\left.\left.\left. \times T^{\eta}_{k,i+\frac{1}{2}}\right) + \left(\frac{W}{\sin^2\theta}\right)^{k+\frac{1}{2},i+\frac{1}{2}}_{k+1,i}\cdot\left(T^{\xi}_{k+\frac{1}{2},i} - \cos\theta^{k+\frac{1}{2},i+\frac{1}{2}}_{k+1,i} \times\right.\right.\right.$$

$$\left.\left.\left. \times T^{\eta}_{k+1,i+\frac{1}{2}}\right) + \left(\frac{W}{\sin^2\theta}\right)^{k+\frac{1}{2},i+\frac{1}{2}}_{k,i}\cdot\left(T^{\eta}_{k,i+\frac{1}{2}} - \cos\theta^{k+\frac{1}{2},i+\frac{1}{2}}_{k,i} \times\right.\right.\right.$$

$$\left.\left.\left. \times T^{\eta}_{k+\frac{1}{2},i}\right) + \left(\frac{W}{\sin^2\theta}\right)^{k+\frac{1}{2},i+\frac{1}{2}}_{k,i+1} \times \left(T^{\eta}_{k,i+\frac{1}{2}} - \cos\theta^{k+\frac{1}{2},i+\frac{1}{2}}_{k,i+1} \times\right.\right.\right.$$

$$\left.\left.\left. \times T^{\xi}_{k+1,i+\frac{1}{2}}\right)\right]\right\} \tag{12}$$

Здесь $W^{k+\frac{1}{2},i+\frac{1}{2}}_{k+p,i+q}$ – весовые множители, равные отношению половины площади треугольника, содержащего угол $(k+p, i+q)$ к площади всей ячейки. Множители удовлетворяют условиям: $W^{k+\frac{1}{2},i+\frac{1}{2}}_{k+p,i+q} \geq 0$, $\sum^{1}_{p,q=0} W^{k+\frac{1}{2},i+\frac{1}{2}}_{k+p,i+q} = 1$.

Такой набор весовых множителей дает первый порядок аппроксимации дискретного скалярного произведения тензоров в ячейке.

Далее в формулы для вязких сил вместо произвольного тензора T будем подставлять проекцию вязкого тензора μG.

Вычисление функций-ограничителей

Вычисление функций-ограничителей производится для каждого ребра счетной сетки. На рис. 2 приведен шаблон для вычисления ограничителя на ребре $\left(k+\frac{1}{2}, i\right)$.

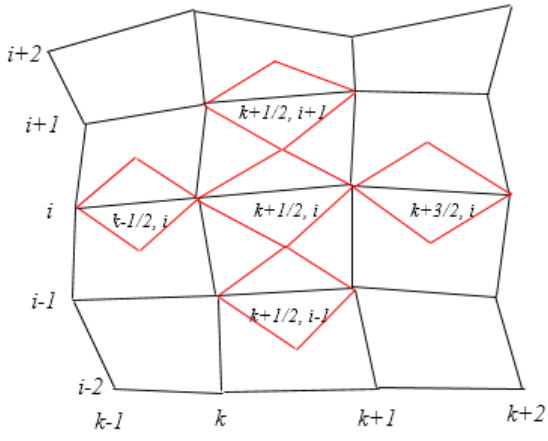


Рис. 2. Шаблон для вычисления функции-ограничителя

Закрашенные области назовем «реберными» ячейками. Во всех закрашенных «реберных» ячейках вычисляется дивергенция скорости по стандартной формуле. Например, для «реберной» ячейки $\left(k+\frac{1}{2}, i\right)$ дивергенция скорости имеет вид:

$$\left(div\,\vec{u}\right)_{k+\frac{1}{2},i} =$$

$$= \frac{1}{2V_{k+\frac{1}{2},i}}\left\{\left(u_{x_{k+1,i}} - u_{x_{k,i}}\right)\times\left[y_{k+\frac{1}{2},i+\frac{1}{2}} - y_{k+\frac{1}{2},i-\frac{1}{2}}\right] - \right.$$

$$-\left[u_{x_{k+\frac{1}{2},i+\frac{1}{2}}} - u_{x_{k+\frac{1}{2},i-\frac{1}{2}}}\right]\left(y_{k+1,i} - y_{k,i}\right) - \left(u_{y_{k+1,i}} - u_{y_{k,i}}\right)\times$$

$$\times\left[x_{k+\frac{1}{2},i+\frac{1}{2}} - x_{k+\frac{1}{2},i-\frac{1}{2}}\right] + \left[u_{y_{k+\frac{1}{2},i+\frac{1}{2}}} - u_{y_{k+\frac{1}{2},i-\frac{1}{2}}}\right]\times$$

$$\left.\times\left(x_{k+1,i} - x_{k,i}\right)\right\} \qquad (13)$$

Когда все дивергенции скорости во всех указанных «реберных» ячейках посчитаны, вычисляются следующие отношения:

$$r_{k-\frac{1}{2},i} = \frac{\left(div\,\vec{u}\right)_{k-\frac{1}{2},i}}{\left(div\,\vec{u}\right)_{k+\frac{1}{2},i}}, \quad r_{k+\frac{1}{2},i+1} = \frac{\left(div\,\vec{u}\right)_{k+\frac{1}{2},i+1}}{\left(div\,\vec{u}\right)_{k+\frac{1}{2},i}} \qquad (14)$$

$$r_{k+\frac{3}{2},i} = \frac{\left(div\,\vec{u}\right)_{k+\frac{3}{2},i}}{\left(div\,\vec{u}\right)_{k+\frac{1}{2},i}}, \quad r_{k+\frac{1}{2},i-1} = \frac{\left(div\,\vec{u}\right)_{k+\frac{1}{2},i-1}}{\left(div\,\vec{u}\right)_{k+\frac{1}{2},i}} \qquad (15)$$

Затем определяются величины ψ_1 и ψ_2:

$$\psi_1 = \max\times$$

$$\times\left[0, \min\left\{0{,}5\left(r_{k-\frac{1}{2},i} + r_{k+\frac{3}{2},i}\right), 2r_{k-\frac{1}{2},i}, 2r_{k+\frac{3}{2},i}, 1\right\}\right] \qquad (16)$$

$$\psi_2 = \max\times$$

$$\times\left[0, \min\left\{0{,}5\left(r_{k+\frac{1}{2},i+1} + r_{k+\frac{1}{2},i-1}\right), 2r_{k+\frac{1}{2},i+1}, 2r_{k+\frac{1}{2},i-1}, 1\right\}\right] \qquad (17)$$

И только теперь определяется функция-ограничитель на ребре:

$$\psi_{k-\frac{1}{2},i} = \min\left(\psi_1, \psi_2\right) \qquad (18)$$

На граничных ребрах коэффициенты r определяются так: для границ типа «жесткая» стенка дивергенция скорости вне области приравнивается дивергенции скорости с противоположного ребра. Для других типов граничных условий дивергенция за пределами границы полагается равной нулю.

Аналогичным образом вычисляются функции – ограничители на столбцах.

Вычисление скалярного множителя

Скалярный множитель определяется в «угловом» объеме, вершинами которого являются узлы вспомогательной сетки. Пример такого объема приведен на рис. 3. На его примере и проведем вычисление скалярного множителя.

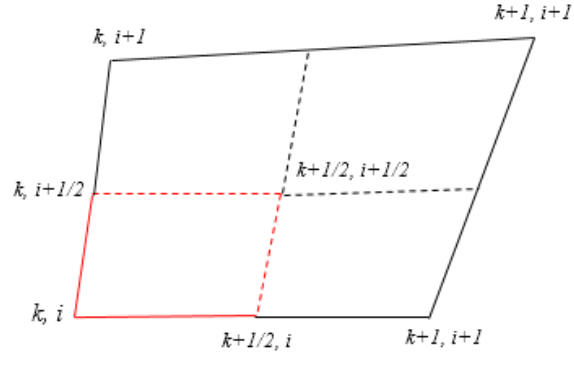


Рис. 3. Ячейка основной сетки с нанесенной вспомогательной сеткой

В основе скалярного множителя лежит вязкость Куропатенко [6]. Для закрашенного углового объема множитель будет иметь вид:

$$\mu_{k,i} = \left(1-\psi_{k,i}\right)\rho_{k,i}\left\{c_2\frac{\gamma+1}{4}\left|\Delta u_{k,i}\right| + \right.$$

$$\left. + \sqrt{c_2^2\left(\frac{\gamma+1}{4}\right)^2\left(\Delta u_{k,i}\right)^2 + c_1^2\left(c_{\text{зв}}\right)_{k,i}^2}\right\} l_{k,i} \qquad (19)$$

Плотность $\rho_{k,i}$ будем определять из условия лагранжевости углового объема, скорость звука $\left(c_{\text{зв}}\right)_{k,i}$ равна скорости звука во всей ячейке, а характерный размер будем определять как минимальное значение длины двух смежных ребер, образующих угол (k,i):

$$l_{k,i} = \min\left(l_{k+\frac{1}{2},i}, l_{k,i+\frac{1}{2}}\right) \qquad (20)$$

Скачок скорости:

$$\Delta u_{k,i} = l_{k,i}\left|div\,\vec{u}_{k,i}\right| \qquad (21)$$

здесь дивергенция скорости в угловом объеме вычисляется стандартным образом по ранее приведенной формуле (13).

Дивергенцию скорости в угловом объеме также будет использоваться как выключатель действия вязкости.

В частности, если

$$\left(div\,\vec{u}\right)_{k,i} > 0, \quad \text{то} \quad \mu_{k,i} = 0\,.$$

Теперь осталось определить вид функции-ограничителя. Будем вычислять $\psi_{k,i}$ как минимальное значение функций-ограничителей на двух смежных ребрах

$$\psi_{k,i} = \min\left(\psi_{k+\frac{1}{2},i}, \psi_{k,i+\frac{1}{2}}\right) \qquad (22)$$

Аналогичным образом вычисляются множители в остальных угловых объемах ячейки.

Тестовые расчеты

В текущей главе приведены расчеты тестовых задач. Все расчеты с тензорной вязкостью проводились с коэффициентами $c_1 = 1$, $c_2 = 1$, включенным режимом действия функций-ограничителей и без какого-либо сглаживания. Также для сравнения приводятся результаты расчетов с вязкостью Неймана – Рихтмайера. Все расчеты с вязкостью Неймана – Рихтмайера проводились со стандартными коэффициентами $c_1 = 2$, $c_2 = 0,25$.

Задача о плоской волне напряжения

Целью данного теста являлось проверить работу алгоритма тензорной вязкости на упругопластической задаче с одномерным течением.

Область представляет собой прямоугольный брусок, содержащий идеальный газ с показателем адиабаты $\gamma = 3$ и уравнением состояния $P = (\gamma - 1)\rho e$.

Начальные условия:

На левой границе задается постоянное по времени давление $P_{\text{гр}}$ = 5 Гпа, все другие границы – жесткие стенки.

Размеры области: |AD| = 0,25 см, |AB| = 1,5 см. Число точек по осям: $OX \to M = 31$, $OY \to N = 6$.

На рис. 4–6 приведены результаты расчета и аналитическое решение на момент времени $t = 2,4\mu c$.

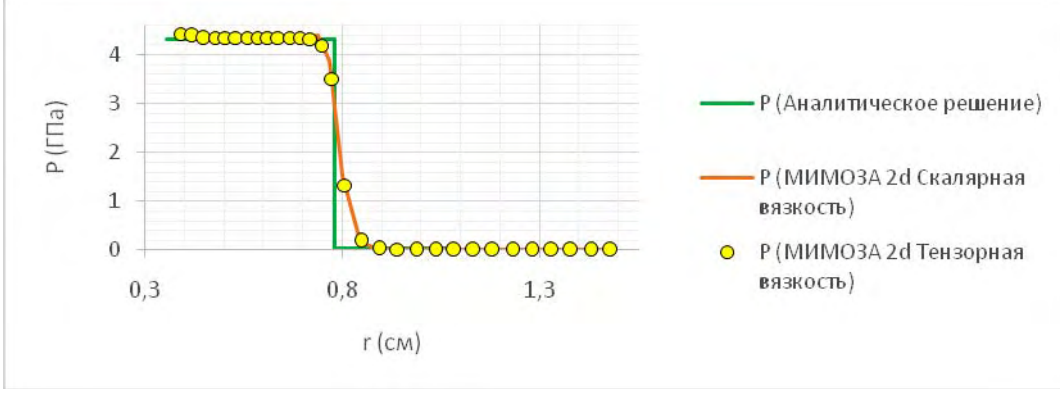


Рис. 4. График зависимости давления от радиуса на момент времени $t = 2,4\mu c$

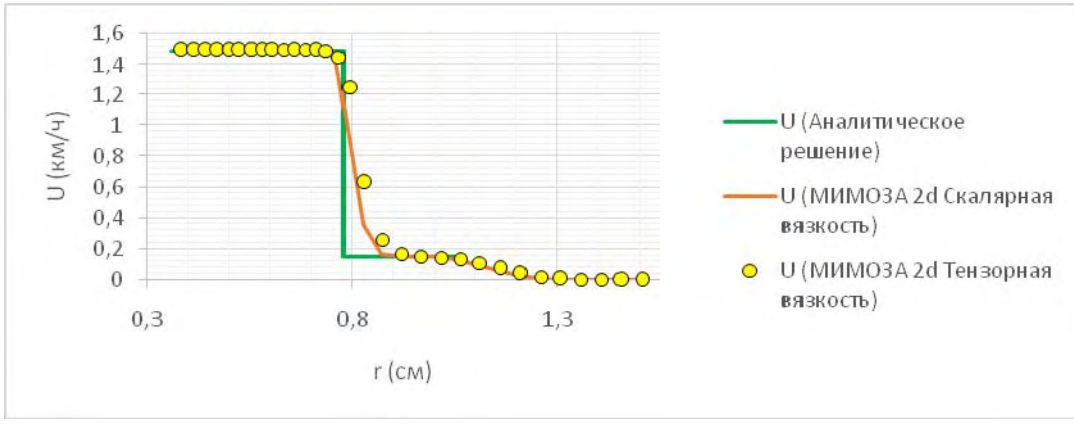


Рис. 5. График зависимости скорости от радиуса на момент времени $t = 2,4 \mu c$

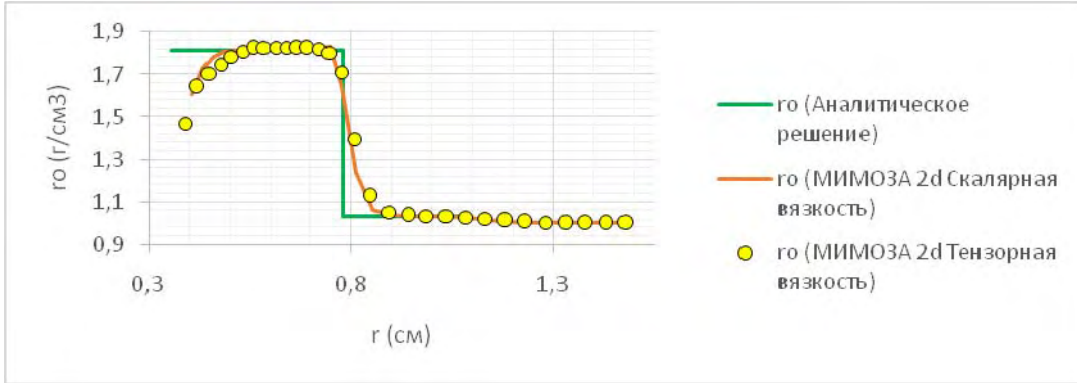


Рис. 6. График зависимости плотности от радиуса на момент времени $t = 2,4 \mu c$

Как и в аналитическом решении, в результате расчета получено расщепление ударной волны на две: впереди распространяется ударная волна $D_{\text{упр}} = 4,47$ км/ с, а за ней – пластическая волна $D_{\text{пл}} = 3,25$ км/с. В таблице приведены значения скорости, плотности и давления в упругой и пластической областях.

Скорость, плотность и давление в упругой и пластической областях

	Область	Точное решение	МИМОЗА 3д. Скалярная вязкость	МИМОЗА 2д. Скалярная вязкость	МИМОЗА 2д. Тензорная вязкость	Отличие тензорной вязкости от точного решения
U	пластич.	1,489	1,495	1,496	1,491	0,13 %
	упругая	0,15	0,146	0,149	0,149	–0,66 %
r_0	пластич.	1,814	1,821	1,824	1,816	0,11 %
	упругая	1,034	1,034	1,034	1,032	–0,19 %
P	пластич.	4,333	4,325	4,337	4,34	0,16 %
	упругая	0,023	0,025	0,023	0,022	–4,3 4%

Как видно из графиков и таблицы, результаты расчетов удовлетворительно согласуются с точным решением и с результатами, полученными в ходе решения по МИМОЗА 3Д (Скалярная вязкость), МИМОЗА 2Д (Скалярная вязкость). Можно отметить незначительное отклонение графиков скорости и плотности в расчете с использованием тензорной вязкости от результатов расчета с вязкостью Неймана – Рихтмайера.

Цилиндрический тест Ноха

В области, представляющей в момент времени $t = 0$ квадрат со стороной, равной единице $(0 < x < 1, 0 < y < 1)$, находится идеальный газ с уравнением состояния $p = (\gamma - 1)\rho e$, где показатель адиабаты $\gamma = 5/3$. Плотность газа равна единице, удельная внутренняя энергия равна нулю, скорость газа в каждой точке области по модулю равна единице и направлена к началу координат. Счетная область равномерно разбивается на 50 интервалов в каждом направлении $\Delta x = \Delta y = 0,02$. На границах $x = 0$, $y = 0$ задано условие зеркального отражения «жесткая стенка». Все расчеты проводились до момента времени $t = 0,6$.

На рис. 7–10 приведены вид счетной сетки и поле плотности на конечный момент времени в расчетах с использованием вязкости Неймана – Рихтмайера и тензорной вязкости.

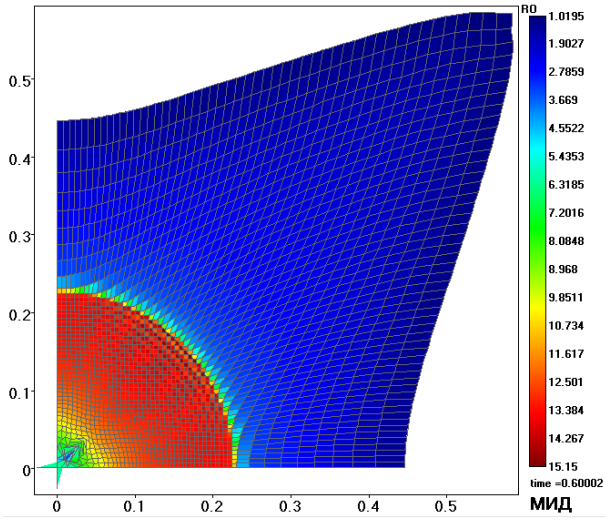


Рис. 7. Вид счетной сетки и поле плотности на конечный момент времени в расчете с использованием вязкости Неймана – Рихтмайера

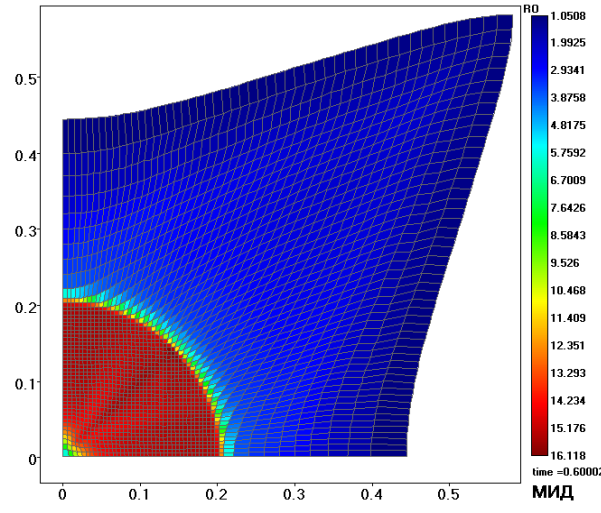


Рис. 8. Вид счетной сетки и поле плотности на конечный момент времени в расчете с использованием тензорной вязкости

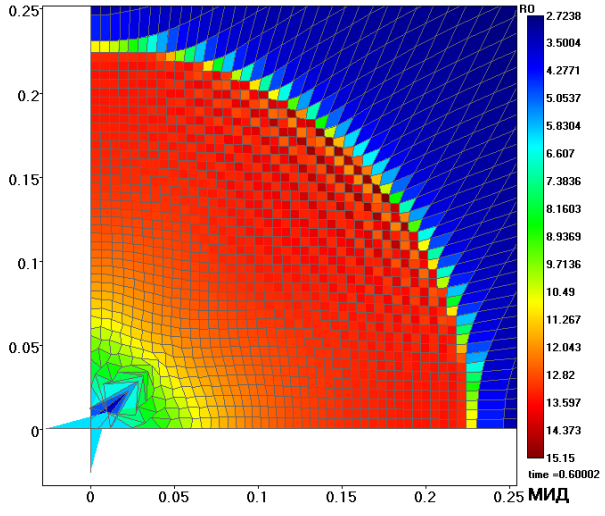


Рис. 9. Вид счетной сетки и поле плотности на конечный момент времени в расчете с использованием вязкости Неймана – Рихтмайера

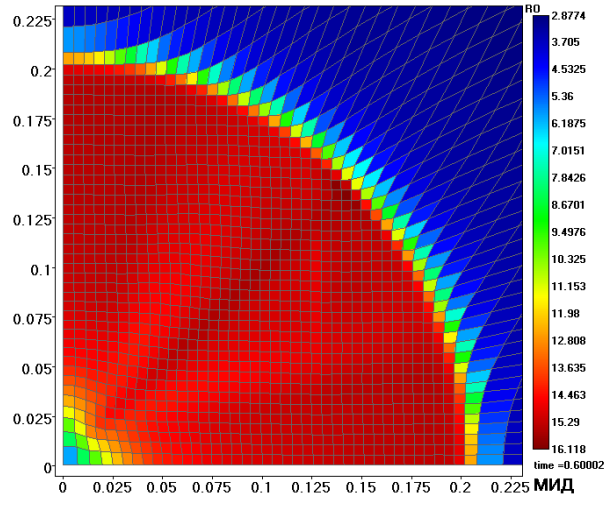


Рис. 8. Вид счетной сетки и поле плотности на конечный момент времени в расчете с использованием тензорной вязкости

Видно, что в расчете с использованием вязкости Неймана – Рихтмайера решение получилось немонотонным, а счетная сетка сильно искажена в районе центра. Также наблюдается отклонение от одномерности в поле плотностей в районе фронта ударной волны под углом 45° к осям координат.

В расчете с использованием тензорной вязкости качество сетки значительно лучше. Но также наблюдается отклонение от одномерности в поле плотностей.

На рис. 11 приведен график зависимости плотности от координат центров ячеек.

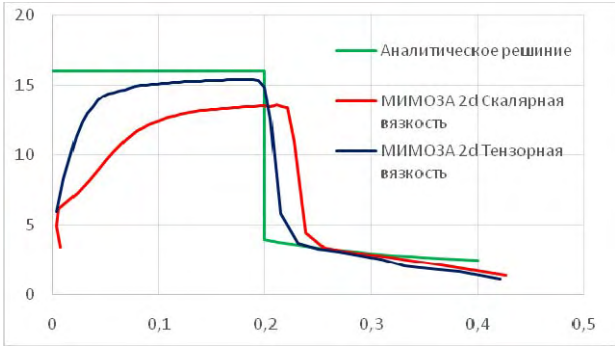


Рис. 9. Зависимость плотности от координат центров ячеек первой строки (вдоль оси X)

Как видно из графика результаты с использованием тензорной вязкости ближе к точному решению, чем результаты с использованием вязкости Неймана – Рихтмайера.

Задача Зальцмана

Целью данного теста являлось проверить работу алгоритма тензорной вязкости на неравномерных неортогональных сетках.

Рассмотрим задачу типа Зальцмана – движение плоской ударной волны по сетке, неравномерной в направлении движения фронта, с переменной неравномерностью.

В прямоугольной области со сторонами 0,1 и 1 содержится идеальный газ с параметрами $\gamma = \frac{5}{3}$, $\rho_0 = 1$, $e_0 = 0,0001$.

На левой границе задано давление, равное 1. Остальные границы – «жесткие» стенки.

Сетка была построена так: боковые и верхняя границы разбиты равномерно, нижняя граница разбита с постоянным вдоль столбцов знаменателем 0,992.

Результаты расчетов этой задачи представлены на момент времени t = 0,925, когда волна уже дважды отразилась от вертикальных границ счетной области. В качестве результатов приведены вид счетной сетки и распределение плотности – рис. 12 и рис. 13.

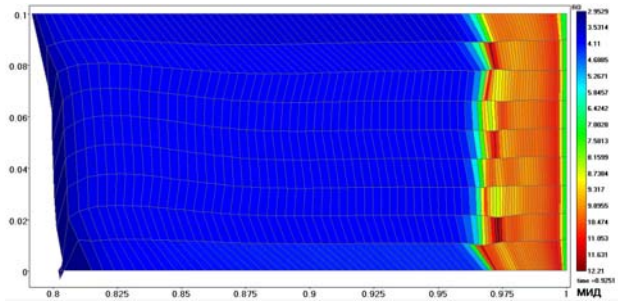


Рис. 10. Вид счетной сетки и поле плотности на конечный момент времени в расчете с использованием вязкости Неймана – Рихтмайера

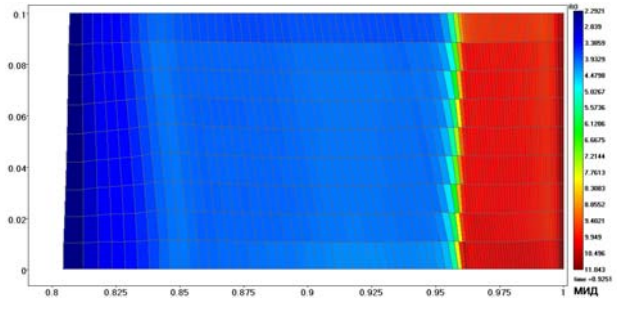


Рис. 11. Вид счетной сетки и поле плотности на конечный момент времени в расчете с использованием тензорной вязкости

В расчете с использованием вязкости Неймана – Рихтмайера произошло сильное искажение сетки. Использование тензорной вязкости позволило получить заметно лучшее решение, чем при использовании вязкости Неймана – Рихтмайера. Здесь состояние сетки значительно лучше, плотность вдоль столбца имеет меньший разброс и распределение плотностей на фронте волны более одномерно.

На рис. 14 и рис. 15 представлена зависимость плотности от координат центров ячеек на моменты времени 0,7 (когда ударная волна еще не дошла до правой границы) и 0,925 (когда ударная волна отразилась от правой, а затем и от левой границы).

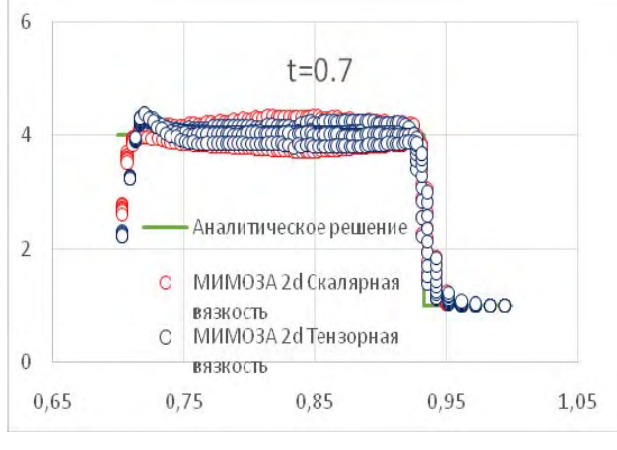


Рис. 12. Зависимость плотности от координат центров ячеек на момент времени t = 0,7

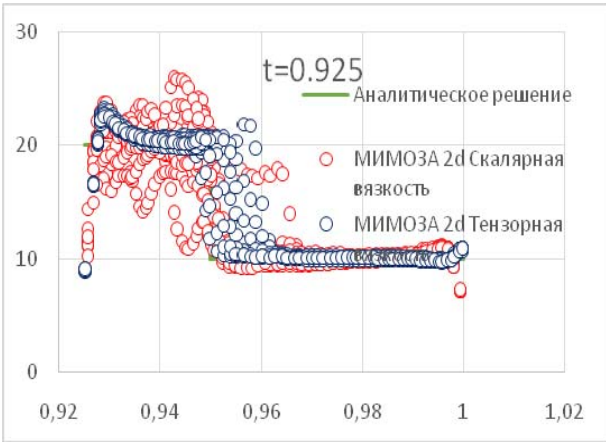


Рис. 13. Зависимость плотности от координат центров ячеек на момент времени $t = 0{,}925$

Как видно из графиков результаты с использованием тензорной вязкости ближе к точному решению, чем результаты с использованием вязкости Неймана – Рихтмайера.

Заключение

В докладе представлена реализация искусственной вязкости тензорного вида для моделирования разрывных течений в переменных Лагранжа в методике МИМОЗА.

Дискретные дифференциальные операторы *DIV* и *GRAD,* аппроксимирующие уравнения движения и энергии с учетом тензорной вязкости, строятся на основе непрерывных операторов.

С использованием тензорной вязкости посчитан ряд тестовых задач, на которых демонстрируется работоспособность реализованного алгоритма. Результаты численных расчетов сравниваются с точным решением, а также с результатами, полученными при использовании вязкости Неймана – Рихтмайера. Исходя из результатов тестов, можно сказать, что применение тензорной вязкости в лагранжевых расчетах позволяет разностной сетке при своей эволюции значительно дольше оставаться квазиравномерной и квазиортогональной (без перехлестов и изломов ячеек), чем в тех же расчетах с использованием вязкости Неймана – Рихтмайера.

Литература

1. Von Neuman J., Rychtmyer R., A method for The Numerical Calculation of Hydrodynamic Shocks // J. App. Phys. 1950. Vol. 21. P. 232.

2. Campbell J. C., Shashkov M. J. A tensor artificial viscosity using a mimetic finite difference algorithm // J Comput. Phys. 2001. P. 172.

3. Софронов И. Д., Афанасова Е. А., Винокуров О. А. и др. Комплекс программ МИМОЗА для решения многомерных задач механики сплошной среды на ЭВМ «Эльбрус» // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Мат. моделир. физ. процессов. 1990. Вып. 2. С. 3–9.

4. Дмитриева Н. А., Дмитриева Л. В., Малиновская Е. В., Софронов И. Д. Методика расчета двумерных задач газовой динамики в переменных Лагранжа. //Препринт ИПМ АН СССР. Москва. 1976. № 59.

5. Авдеев П. А., Артамонов М. В., Бахрах С. М., Володина Н. А., Проневич С. Н., Шувалова Е. В. и др. Комплекс программ ЛЭГАК для расчета нестационарных течений многокомпонентной сплошной среды и принципы реализации комплекса на многопроцессорных ЭВМ с распределенной памятью // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Мат. моделир. физ. процессов. 2001. Вып. 3. С. 14–18.

6. Куропатенко В. Ф. Об одной форме псевдовязкости // Известия Сибирского отделения АН СССР. Серия технических наук. 1967. № 13. Вып. 3. С. 81–82.

7. Christensen R. B. High resolution hydrodynamics using artificial viscosity // Вопросы атомной науки и техники. Сер. мат. моделир. физ. процессов. 1996. № 4. С. 89–93.

АВТОМАТИЧЕСКОЕ ПЕРЕСТРОЕНИЕ ИНТЕРВАЛОВ РАЗБИЕНИЯ СПЕКТРА РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ СЧЕТА В МЕТОДИКЕ САТУРН

А. А. Гаврилова, В. Ю. Резчиков

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Детальное изучение характеристик рентгеновского излучения (направленности, жесткости и пр.) занимает в настоящее время значительное место в расчетно-теоретических исследованиях соответствующих структур Института теоретической и математической физики РФЯЦ-ВНИИЭФ. Интенсификация работ в данном направлении стала возможной в последнее время благодаря выросшим мощностям современных вычислительных систем. Вместе с тем, растущие запросы в плане детализации описания спектра рентгеновского излучения (например, учет линий в коэффициентах поглощения веществ), высокий коэффициент загрузки вычислительных систем, сложившийся к настоящему времени в математическом отделении, оставляют вопрос совершенствования технологий, направленных на сокращение календарного времени расчетного моделирования, по-прежнему актуальным.

Для решения задач распространения рентгеновского излучения (РИ) в многогрупповом кинетическом приближении используется методика САТУРН [1]. Совокупность всех работ по рассчитываемому классу задач показывает, что проводимое моделирование весьма затратно, как в плане календарного времени, так и в плане использования ресурсов ЭВМ (число переменных фазового пространства при использовании многогруппового кинетического приближения достигает в настоящее время величины $3 \cdot 10^{10}$, а количество решаемых переменных за весь расчет может составлять 10^{16}).

В настоящем докладе описан начальный этап создания технологии автоматического перехода с одного энергетического разбиения на другое в расчетах распространения РИ. Предполагается, что создаваемая технология позволит существенно сокращать календарное время проведения многогрупповых расчетов в кинетическом приближении, используя переход с меньшего количества энергетических групп на большее и, наоборот, без существенной потери детализации спектра.

Инструмент для подобного перехода был создан в методике САТУРН ранее. Однако для использования этого инструмента требовалось вмешательство исполнителя расчета (прерывание счета после проведения определенного анализа результатов, включение соответствующего приказа и затем возобновление счета). Авторы, модифицировав имеющийся инструмент, предприняли попытку выработать и опробовать на тестовых расчетах некие критерии, инициирующие смену числа энергетических групп без прерывания счета, что преследует цель сократить влияние человеческого фактора и сократить время простоев при проведении расчетов.

В отчете рассмотрены две задачи переноса излучения: известная задача ФЛЭКА [2] и модификация задачи о распространении тепла в шаровом слое. В первой задаче с использованием критерия анализа энергии излучения в одной из областей автоматически осуществлен переход с 7-группового на 28-групповое приближение, во второй задаче после анализа дифференциальной индикатрисы (окончание изменения жесткой части спектра) выполнен переход с 53 на 33 группы.

Особенности программной реализации автоматического перестроения интервалов разбиения спектра рентгеновского излучения

Совокупность приказов, необходимая для автоматического перехода с одного числа энергетических групп на другое без остановки счета

Для перестроения интервалов разбиения спектра рентгеновского излучения в методике САТУРН был написан приказ, вызов которого происходит в процессе счета после выполнения условия одного из реализованных критериев для перехода (анализ энергии излучения в области, подлежащей контролю; анализ изменения дифференциальной индикатрисы). Данный приказ распараллелен по областям с использованием стандарта MPI. Работа происходит внутри параобласти на процессоре. Для текущей области анализируется пересечение старой и новой энергетических сеток и заполняется массив ALF (*ni_old*, *ni_new*), где *ni_old* – число узловых значений старого энергетического разбиения, *ni_new* – число узловых значений нового энергетического разбиения. Далее перестраивается массив информации о спектре, массив угловых сеток и пересчитываются массивы, зависящие от числа групп и числа направлений по всем группам.

Переинтерполяция на новую энергетическую сетку производится по формуле:

$$f_j = \frac{1}{\Delta\omega_j} \sum_i f_i \Delta\omega_{i,j} \qquad (1)$$

f_i – значения функции на старой энергетической сетке, f_j – значения функции на новой энергетической сетке, $\{\Delta\omega_j\}$ – множество длин интервалов новой энергетической сетки, $\{\Delta\omega_{i,j}\}$ – пересечение старой и новой сеток.

В случае, когда старая сетка содержит непересекающуюся часть ($m-1$ интервал) с новой сеткой, краевое значение функции на новой сетке вычисляется по формуле:

$$f_1 = \sum_{i=1}^{m} f_i + \sum_{i=m+1} \frac{1}{\Delta\omega_i} f_i \Delta\omega_{i,1} \qquad (2)$$

В случае, когда новая сетка содержит непересекающуюся часть (m-1 интервал) со старой сеткой:

$$f_1 = \ldots = f_{m-1} = 0 \qquad (3)$$

Далее более подробно остановимся на некоторых особенностях организации счета с переходом и необходимых параметрах, указываемых в управляющем файле. Для автоматического перехода с одного энергетического разбиения на другое на этапе расчета начальных данных нужно присвоить значение TRUE параметру задачи TRANSFER_SPECTR (по умолчанию задается FALSE). Этот параметр отвечает за возможность проверки выполнения одного из критериев для перехода. Его можно указывать также на этапе счета. Однако в этом случае после смены разбиения в следующем заходе придется установить этому параметру значение по умолчанию, т. к. в настоящее время реализована возможность только одного перехода на другое число групп в процессе расчета задачи.

За применяемый для инициирования перехода критерий отвечает параметр задачи TYPE_TRANSFER_SPECTR (1 – анализируется энергия излучения, 2 – анализируется изменение дифференциальной индикатрисы). Если после проверки одного из критериев условие перехода (а именно, возникновение энергии излучения в одной из областей или прекращение изменения дифференциальной индикатрисы для одной из групп жесткой части спектра) выполнилось, присваивается значение TRUE параметру IS_TRANSFER_SPECTR. Условие на этот параметр задается в режиме счета MODWORK входного языка, где необходимо указать новое энергетическое разбиение и вызвать приказ перестройки энергетической сетки и пересчета величин, зависящих от числа энергетических групп.

Пример входного языка приведен ниже:

```
MODWORK ;
    …
IF 'IS_TRANSFER_SPECTR' ;
    SPECTR_NEW 0 0.08 0.3 1.0 2.6 4.5 7.0 15.0 ;
     TRANSFER_SPECTR ;
 ENDIF ;
    …
ENDMOD ;
```

После того, как переход с одного количества групп на другое осуществлен, параметрам TRANSFER_SPECTR и IS_TRANSFER_SPECTR присваивается логическое значение FALSE. Также в директорию задачи записывается файл transfer_spectr.txt, содержащий сообщение об успешном завершении работы приказа по перестройке энергетической сетки, а также номер общего шага по времени, на котором эта перестройка произошла.

Критерии смены числа энергетических групп и их программная реализация

Скажем несколько слов о выборе критериев смены числа энергетических групп.

Очевидно, что в практически любом расчете присутствуют этапы, на которых описание жесткости спектра РИ может быть промоделировано с различной степенью детализации без сколько-нибудь существенной потери сущности явления. Рассмотрим, например, расчет распространения РИ в цилиндрическом боксе-конверторе лазерно-физической установки NIF, проведенный для оценки возможности зажигания капсулы с DT-топливом, помещенной в центре бокса. Вполне понятно, что этап конверсии лазерного излучения в рентгеновское и распространения излучения с эффективной температурой, не превышающей 300 эВ, по боксу может быть корректно описан энергетическим разбиением с верхней границей не более, чем в 5 кэВ. После сжатия криогенной капсулы наступает момент ее возможного зажигания и горения, при котором реализуются температуры (вещества) уже в десятки килоэлектронвольт, что требует смещения верхней границы описания спектра в область сотен кэВ, а необходимость детализации спектра может кратно увеличить число энергетических групп. После выхода сверхжесткой части рентгеновского излучения из мишени (что происходит достаточно быстро, в течение долей наносекунды) количество групп может быть уменьшено, а границы интервалов сужены.

Для инициирования смены числа энергетических групп в расчетах распространения излучения в настоящий момент реализованы два физически обоснованных критерия. Согласно первому из них, в одной из счетных областей анализируется энергия излучения, и в момент, когда она становится больше некоторой заданной величины, происходит переход на другое число групп. Этой величине можно присвоить значение в параметре задачи EPS_SPECTR (значение по умолчанию 0.0001). Во втором критерии анализируется суммарная по всем направлениям дифференциальная индикатриса для одной из внешних линий наружной области, и, если ее изменение по времени становится незначительным (сравнение происходит также с параметром EPS_SPECTR), вызывается приказ перестройки энергетической сетки. За выбор критериев перехода и за возможность их анализа отвечают параметры, описанные в пункте 1.1. Необходимую область, в которой будет осуще-

ствляться проверка одного из критериев, нужно задать с помощью параметра задачи OBL_SPECTR. По умолчанию ему присвоено значение 0, поэтому он является обязательным для указания в управляющем файле задачи, в противном случае расчет будет остановлен с диагностикой о недостающем параметре.

Внутри счетных программ, содержащих реализацию данных критериев, происходит похожий набор действий. Необходимые величины сравниваются с параметром EPS_SPECTR. В случае выполнения условия для параметра IS_TRANSFER_SPECTR, как было описано ранее, устанавливается значение TRUE. Поскольку выполнение критериев проверяется для определенной области, далее с помощью средств MPI происходит рассылка значения IS_TRANSFER_SPECTR по всем процессорам задачи. Это необходимо сделать, т. к. возможность расчета с разным числом групп в разных областях на текущий момент не реализована.

Тестирование реализованных алгоритмов и критериев на модельных задачах распространения излучения в многогрупповом кинетическом приближении

Задача Флэка

Постановка задачи Флэка, которая широко освещена в соответствующей открытой литературе, взята из [2]. В цилиндрическом слое рассчитывается процесс распространения излучения в многогрупповом кинетическом приближении. Газодинамическое движение среды отсутствует, плотность вещества слоя равна $\rho = 1$, процессы рассеяния излучения (комптоновского или томсоновского) не учитывались. Задача численно моделировалась в трехобластной постановке (см. рис. 1).

Рис. 1. Геометрия расчета, счетные области. Единицы размера – сантиметры

Сечение поглощения излучения задавалось формулой $\chi_w = A \cdot \left(1 - \exp\left(-w/T\right)\right) / w^3$. Первая и третья счетные области – оптически прозрачны (A = 27), вторая область – оптически плотная (A = 10000). Уравнение состояния вещества задавалось по формуле $E = 0{,}81 \cdot T$. Граничные условия: на поверхность r = 100 падает излучение планковского (равновесного) источника с $T_0 = 1$, на поверхности r = 104 задано условие свободной поверхности.

Во всех счетных областях пространственная сетка по радиусу задавалась шестнадцатью равномерными интервалами. Все расчеты проводились на одинаковой угловой квадратуре ES_8.

Всего для тестирования технологии автоматической смены числа групп было проведено три серии расчетов задачи Флэка.

Первая серия проводилась на 7-групповом (далее на рисунках помечена как «7 групп») энергетическом разбиении. Энергетическая сетка задавалась следующим образом {кэВ}: 0-0.08-0.3-1.0-2.6-4.5-7-15.

Вторая серия считалась на 28-групповом энергетическом разбиении (далее на рисунках помечена как «28 групп»). Энергетическая сетка задавалась так {кэВ}: 0-0.02-0.04-0.06-0.08-0.1-0.15-0.2-0.3-0.4-0.5-0.7-1-1.4-1.8-2.2-2.6-3-3.5-4-4.5-5-5.5-6-7-8-10-12-15.

И, наконец, третья серия (далее на рисунках помечена как «переход») заключала в себе переход с 7 на 28-групповое разбиение, осуществленный по критерию выхода излучения из оптически плотной (второй) области в оптически прозрачную (третью). Значение EPS_SPECTR выбиралось равным 0,05. Заметим, что переход осуществился на момент времени 0,0011 (ct = 3,3; c – скорость света, равная $3 \cdot 10^{10}$ см/сек).

Все расчеты считались с переменным шагом по времени, выбираемым по критерию оптимального количества в 15 итераций, которые сводились с точностью 0,0001 по интегральной плотности излучения. Для ускорения сходимости итераций использовался КМ-метод.

Ниже на рис. 2–4 представлены пространственные распределения температур вещества и излучения в системе вдоль радиуса на три момента времени: ct = 6, ct = 15 и ct = 50.

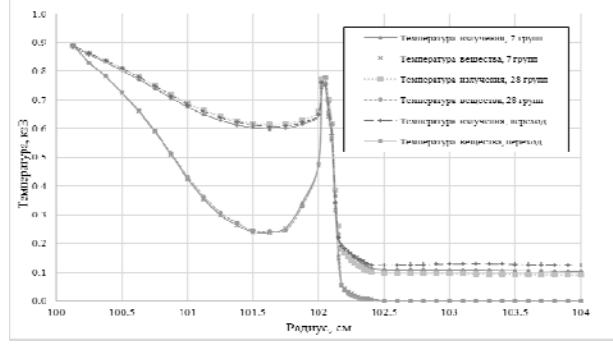


Рис. 2. Пространственные распределения температур на момент времени ct = 6

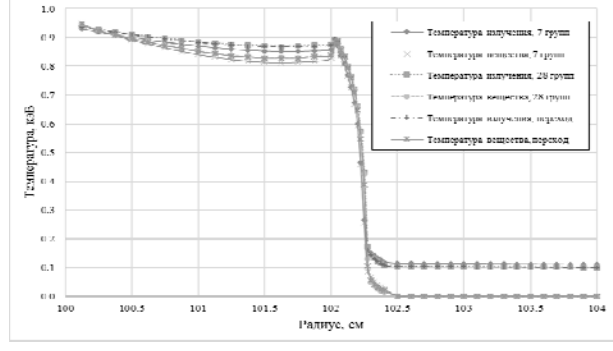


Рис. 3. Пространственные распределения температур на момент времени ct = 15

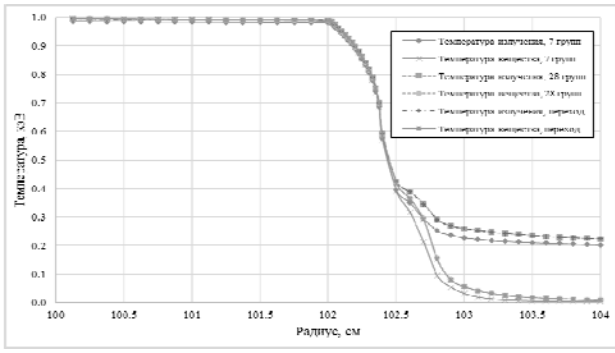


Рис. 4. Пространственные распределения температур на момент времени $ct = 50$

В табл. 1–3 представлены интегральные характеристики проведенных расчетов на различные моменты времени: энергия вещества и излучения в системе (суммарно по всем областям), входящие и выходящие потоки через границы, дисбаланс в расчетах.

Таблица 1

Энергетические характеристики 7-группового расчета

E, 10 МДж	$ct = 6$	$ct = 15$	$ct = 50$
E излучения	491,43	1099,39	1840,18
E вещества	548,66	970,07	1260,06
Вход, поток	1040,04	2070,34	3117,42
Выш, поток	0,14	1,04	17,24
Дисбаланс, %	0,02	0,01	0,00

Таблица 2

Энергетические характеристики 28-группового расчета

E, 10 МДж	$ct = 6$	$ct = 15$	$ct = 50$
E излучения	521,95	1179,62	1905,51
E вещества	554,80	988,90	1282,94
Вход, поток	1076,63	2169,02	3212,52
Выш, поток	0,08	0,66	24,14
Дисбаланс, %	0,02	0,01	0,00

Таблица 3

Энергетические характеристики расчета с переходом

E, 10 МДж	$ct = 6$	$ct = 15$	$ct = 50$
E излучения	510,16	1169,39	1905,05
E вещества	550,04	985,47	1281,66
Вход. поток	1059,98	2155,59	3210,53
Выш. поток	0,20	1,31	24,18
Дисбаланс, %	0,04	0,02	0,01

Прокомментируем полученные результаты.

На все моменты времени температуры как вещества, так и излучения во всех сериях расчетов отлично согласуются друг с другом. Небольшие отличия, наблюдаемые в температурах во внешней оптически прозрачной области на первый и последний моменты времени, находятся в пределах расчетной погрешности, т. к. суммарная энергия этой области к моменту окончания расчета составляет всего 2,8 % от энергетики всей системы. В первой оптически прозрачной области и второй области температуры вещества и излучения во всех расчетах идеально совпали.

Анализируя энергетические характеристики расчетов, мы видим подобную же картину. В каждом из трех расчетов дисбаланс по полной энергии[1] не превысил 0,04 % (максимальный – в расчете с переходом), причем везде прослеживается легко объяснимая тенденция к падению дисбаланса к моменту окончания расчетов. Отметим также тот весьма логичный факт, что энергии вещества и излучения в расчете с автоматическим переходом лежат между значениями соответствующих энергий 7- и 28-группового расчетов, тяготея к последнему из-за большего времени, посчитанному в 28-групповом приближении.

Задача о распространении тепла в шаровом слое

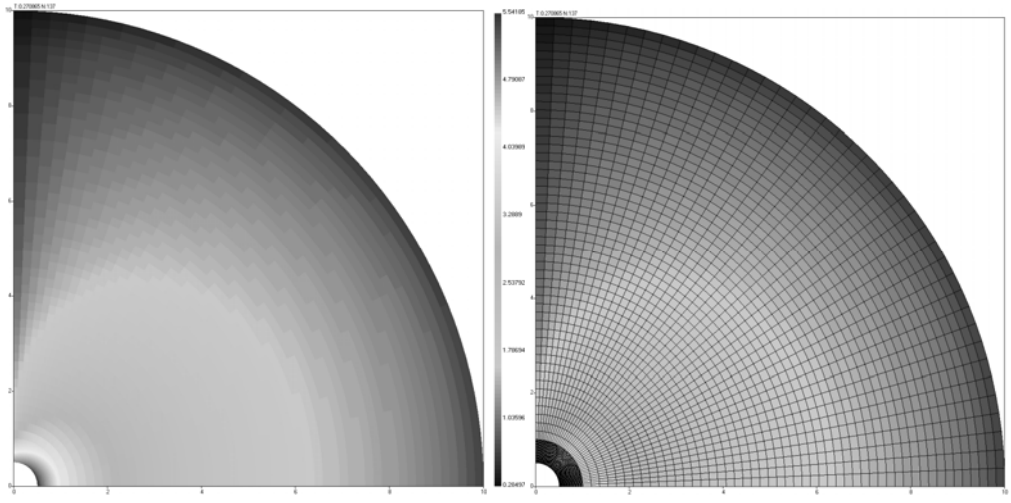
Рассмотрим задачу на определение поля температур внутри однородного шарового слоя ($0{,}5 \le r \le 1{,}0$ см) в результате прохождения излучения. На внутренней поверхности ($r = 0{,}5$) задано граничное условие $T^4 = T_0^4\left[1 + \cos\theta\right]$. На вертикальной оси ($\theta = \pi/2$) задавалось граничное условие $T^4 = T_0^4\left[a*\left(1/r - b\right)\right]$., где θ – угол между осью $o\vec{z}$ и вектором, соединяющим центр с точкой внутренней поверхности, r – радиус рассматриваемой точки. На внешней поверхности ($r = 1$) задано условие свободной поверхности. Пробег излучения в расчете задавался одинаковым для всех энергий фотонов и равен величине $l = 0{,}15$ см (оптически прозрачная система).

Задача эта, имеющая аналитическое решение, была ранее численно решена в диффузионном 48-групповом приближении. Авторы модифицировали эту задачу в своих интересах, надстроив над шаровым слоем дополнительную протяженную оптически прозрачную область ($1{,}0 \le r \le 10{,}0$ см) и задав T_0 в граничном условии равным 5 кэВ (в первоисточнике $T_0 = 1$).

Пространственная сетка состояла из 50-ти равномерных интервалов по радиусу для внешней области и 40 равномерных интервалов для шарового слоя. По пространственному углу задавалось 40 равномерных интервалов. Расчеты проводились на угловой квадратуре ES_{16} на различном числе энергетических групп: 53 и 33. Разбиение энергии фотонов по спектру задавалось следующим образом.

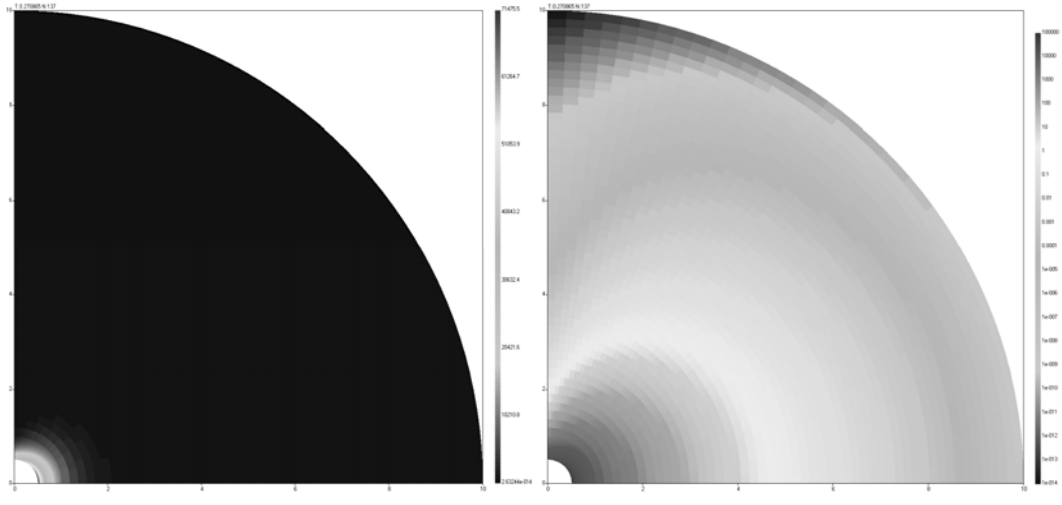
53 группы: 0.0-0.3-0.6-1.0-1.5-2.0-2.5-3.0-3.5-4.0-4.5-5.0-5.5-6.0-6.5-7.0-8.0-9.0-10.0-11.0-12.0-13.0-14.0-15.0-16.0-17.0-18.0-19.0-20.0-21.0-22.0-23.0-24.0-25.0-26.0-27.0-28.0-29.0-30-32-34-36-38-40-44-48-52-56-60-70-80-100-150-200.

[1] Дисбаланс по полной энергии рассчитывается как отношение вошедшего полного потока к сумме энергий излучения и вещества системы и вышедшего потока.



а б

Рис. 5. Температура вещества в системе на момент перехода: а – без наложения пространственной сетки, б – с наложением пространственной сетки



а б

Рис. 6. Плотность излучения в 39-й энергетической группе в системе на момент перехода: а – с энергией больше 30 кэВ, что соответствует сверхжесткому РИ; б – в логарифмическом масштабе

33 групп: 0.0-0.3-0.6-1.0-1.5-2.0-2.5-3.0-3.5-4.0-4.5-5.0-5.5-6.0-6.5-8.0-10.0-12.0-14.0-16.0-18.0-20.0-22.0-24.0-26.0-28.0-30-34-38-44-52-60-100-200.

Как и выше, все расчеты проводились с переменным шагом по времени с использованием КМ-метода ускорения сходимости итераций.

Для осуществления перехода с 53-группового разбиения к 33-групповому в процессе счета использовался критерий малого изменения[2] дифференциальной индикатрисы РИ, накапливаемой для диапазона от 30 кэВ (39-я группа) на линии вблизи внешней границы системы (88-я строка). Переход произошел на момент времени $0{,}27 \cdot 10^{-7}$ сек.

На рис. 5 приведена температура вещества в системе на момент перехода без наложения и с наложением пространственной сетки.

На рис. 6 показана плотность излучения в 39-й энергетической группе на момент перехода.

На рис. 7 приведен спектральный поток излучения, выходящего из системы, для трех расчетов: 53-группового, 33-группового и расчета с переходом на момент окончания расчетов ($2 \cdot 10^{-7}$ сек).

Из рис. 7 видно совпадение потоков для проведенных расчетов.

На рис. 8 приведена интегральная по времени и спектру индикатриса рентгеновского излучения для всех расчетов, выданная на момент времени, наступающий сразу после автоматического перехода.

[2] Критерий малого изменения: на текущем шаге по времени значение индикатрисы, проинтегрированной по угловым направлениям, отличается от значения на предыдущем шаге меньше, чем EPS_SPECTR = 0,01.

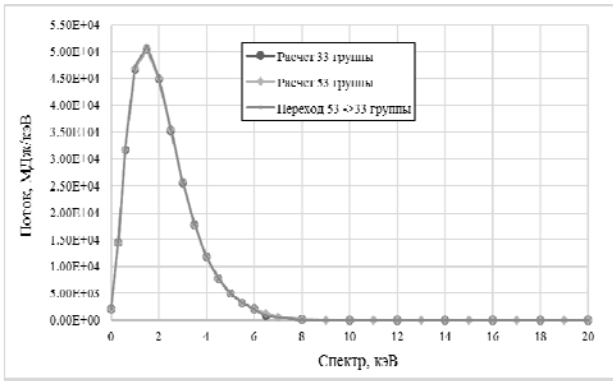


Рис. 7. Спектр потока излучения, выходящего через внешнюю границу области (обрезан до 20 кэВ)

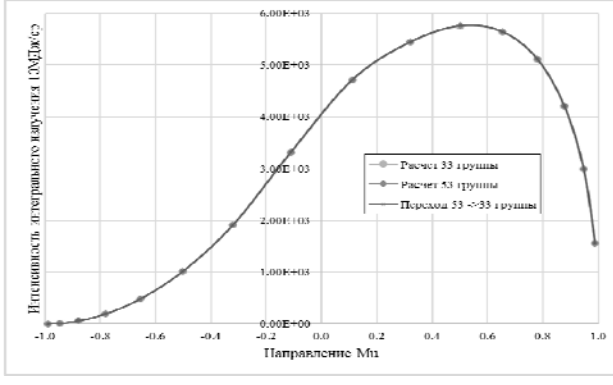


Рис. 8. Индикатриса РИ через 88-ю строку области

Из рис. 8 видно, что индикатрисы для всех расчетов идеально совпали. Это совпадение, по-видимому, объясняется тем, что система в момент перехода уже находилась практически в стационарном состоянии и рассогласования между плотностью излучения при переинтерполяции и температурой вещества не возникло.

Таким образом, по результатам двух расчетов можно сделать вывод о практической возможности применения обоих критериев автоматической смены числа энергетических групп. Также следует добавить, что на данных задачах выигрыш в общем времени решения от использования разного энергетического разбиения на различных этапах счета составил 1,4 раза по сравнению с расчетами на одном числе групп.

Заключение

В отчете описана технология автоматической смены границ энергетических интервалов в процессе счета без его прерывания. Приведены примеры использования технологии, изменения, внесенные в методику для ее реализации. Представлены результаты первых исследований применения автомата перехода.

Предложены два критерия инициирования перехода с одного числа энергетических групп на другое:

– по возникновению энергии излучения в одной из счетных областей;

– по прекращению изменения дифференциальной индикатрисы для одной из групп жесткой части спектра через одну из внешних линий наружной оболочки системы.

Полученные результаты (температуры вещества и излучения, балансные энергетические величины, потоки выходящего излучения) говорят о работоспособности обоих примененных критериев.

По желанию заказчиков расчетов легко могут быть запрограммированы и опробованы любые другие предложенные критерии.

В дальнейшем предполагается дополнить созданную технологию возможностью смены в процессе счета числа угловых направлений.

Ожидается, что созданная технология в случае ее грамотного применения (подбора критериев перехода) поможет существенно сократить календарные сроки проведения расчетов распространения излучения в многогрупповом приближении.

Литература

1. Алексеев А. В., Беляков И. М., Бочков А. И., Евдокимов В. В., Ириничев Е. А., Морозов В. Ю., Москвин А. Н., Нуждин А.А., Пепеляев М. П., Резчиков В. Ю., Сучкова В. В., Шарифуллин Э. Ш., Шемякина Т. В., Шумилин В. А. Методика САТУРН-2005. Математические модели, алгоритмы и программы решения многомерных задач переноса частиц и энергии // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов. 2013. Вып. 4. С. 17–30.

2. Fleck J.A., Cummings J. D. An implicit Monte-Carlo scheme for calculating time and frequency dependent nonlinear radiation transport // Journal of Comput. Phys. 1971. Vol. 8, N 3. P. 313–342.

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ПОРИСТОСТИ ВВ НА ОСНОВЕ ОКТОГЕНА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА В РАМКАХ ВЯЗКОУПРУГОЙ МОДЕЛИ МАКСВЕЛЛА – ВИХЕРТА С РАЗРУШЕНИЯМИ

Т. Б. Григорьева, С. Ю. Седов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

В практике обращения со взрывчатыми веществами (ВВ) приходится сталкиваться с проблемой взрывов, возникающих при незапланированном механическом воздействии на конструкции, содержащие энергетические материалы. В связи с этим важное значение имеет разработка надежных критериев взрывов при механических нагрузках с достаточно малыми скоростями деформирования материала ВВ. В ИТМФ (ВНИИЭФ) ведется работа по созданию феноменологических моделей кинетики и критериев инициирования ВВ, которые калибруются и верифицируются с учетом имеющихся экспериментальных данных.

Изменение начальной плотности (пористости) взрывчатого состава на основе октогена может приводить к изменению его чувствительности и образованию дополнительных горячих пятен, особенно при низкоскоростном воздействии, где механизмы инициирования определяются не ударно-волновыми процессами, а условиями деформации и процессами прочностного разрушения. Поэтому, при численном моделировании низкоскоростного воздействия в реологических моделях и критериях взрыва необходимо учитывать вариацию начальной плотности ВС.

Данная работа проведена в целях развития модели реологии пластифицированных взрывчатых веществ, основанной на вязкоупругих элементах Максвелла. Эта модель используется в настоящее время в расчетах критериев начала взрыва при низкоскоростных воздействиях на ВВ методике МИМОЗА[1].

В работе проведено исследование корректировки параметров модели Максвелла – Вихерта с опорой на экспериментальные данные по исследованию деформирования и разрушения образцов ВВ из флегматизированного октогена с различной плотностью, нагружаемых по методу составных стержней Гопкинсона. С помощью модифицированного критерия взрыва удалось описать имеющуюся совокупность опытов экспериментов (ИФВ группы Белова Геннадия Викторовича) [2] по воздействию сферическими ударниками различного размера на образцы с номинальной и пониженной плотностью и получить единый порог критерия взрыва.

В докладе рассказывается о проделанной работе по введению в модель Максвелла – Вихерта учета пористости ВВ и модификации единого порового критерия взрыва, о котором будет рассказано чуть ниже.

Общее описание модели Максвелла – Вихерта с разрушениями

При моделировании напряженного состояния твердого тела напряжение представляется в виде суммы девиаторной части, отвечающей за сдвиговые нагрузки материала, при которых не изменяется объем образца, и шаровой части:

$$\sigma_{ij} = s_{ij} + \delta_{ij}\frac{\sigma_{kk}}{3}.$$

Здесь s_{ij} – девиатор напряжений, σ_{ij} – полное напряжение, давление $p = -\frac{\sigma_{ii}}{3}$. Тензор деформации образца записывается так: $e_{ij} = \varepsilon_{ij} + \frac{1}{3}\delta_{ij}\cdot e_{kk}$. Здесь ε_{ij} – девиатор деформации, e_{ij} – полная деформация. В модели предполагается, что в каждом элементарном объеме сдвиговые напряжения описываются вязкоупругой моделью Максвелла, состоящей из пяти элементов (см. рис. 1), действующих параллельно друг другу.

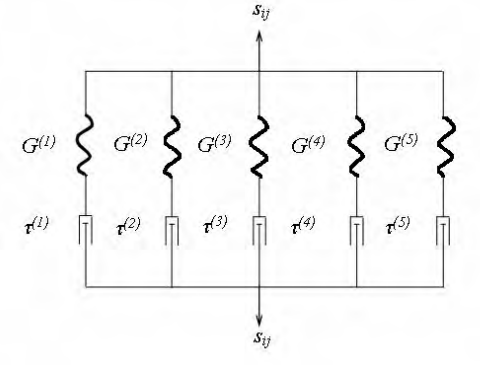


Рис. 1. Схема вязкоупругой модели Максвелла, состоящей из пяти элементов

Каждый k-ый элемент состоит из двух компонент, которые моделируют сопротивление сдвигу (модуль сдвига $G^{(k)}$) и вязкость (время релаксации $\tau^{(k)}$).

При записи определяющих уравнений среды на основе элементов Максвелла будем пользоваться уравнением Гука, записанным в дифференциальной форме. Тогда для каждого из N параллельно соединенных элементов Максвелла выполняется соотношение

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{(k)} = 2G^{k}\dot{\varepsilon}_{ij}^{(k)} - 2G^{(k)}\dot{\varepsilon}_{ij}^{(k)(visc)},$$

где $\dot{\varepsilon}_{ij}^{(k)}$ – скорость общих деформаций, для параллельного соединения элементов $\dot{\varepsilon}_{ij}^{(k)} = \dot{\varepsilon}_{ij}$, $\dot{\varepsilon}_{ij}^{(k)(visc)}$ – скорость вязких деформаций, $2G\dot{\varepsilon}_{ij}^{(k)(visc)} = \dfrac{\dot{s}_{ij}^{(k)}}{\tau^{(k)}}$.

Итак, скорость изменения девиатора напряжений одного элемента Максвелла определяется формулой:

$$\dot{s}_{ij} = 2G^{(k)}\varepsilon_{ij} - \frac{s_{ij}}{\tau^{(k)}},$$

где k – индекс $(k = 1, \ldots, 5)$, который указывает, к какому элементу Максвелла относится величина.

Учтем сдвиговое разрушение среды. Тогда в уравнении Гука из скорости сдвиговой деформации надо вычесть часть, связанную с разрушением:

$$\dot{s}_{ij}^{(k)} = 2G^{(k)}\dot{\varepsilon}_{ij} - 2G^{(k)}\dot{\varepsilon}_{ij}^{(k)(visc)} - 2G^{(k)}\dot{\varepsilon}_{ij}^{(c)}.$$

Для компонент тензора деформаций сдвигового разрушения $\varepsilon_{ij}^{(c)}$ нужно свое отдельное определяющее соотношение. Предполагаем изотропию материала, то есть изначально трещины равномерно распределены по всему объему образцу, и их средний размер не зависит от направления. Логично связать $\varepsilon_{ij}^{(c)}$ с компонентами напряжения соотношением типа:

$$2G^{(k)}\varepsilon_{ij}^{(c)} = f \cdot s_{ij}^{(k)},$$

где f – некоторая функция параметров среды. Вид этой функции может быть различным, зависящим от модели разрушения. Выберем ее здесь как это сделано в модели Аддезио – Джонсона – Дайниса. Это связано с тем, что константы этой модели известны для PBX 9501, который является аналогом российского состава на основе октогена. В модели $f = \left(\dfrac{c}{a}\right)^3$, где c – текущий размер трещин, a – нормирующий, характерный размер трещин.

Итак, $$2G \cdot \varepsilon_{ij}^{(c)} = \left(\frac{c}{a}\right)^3 \cdot s_{ij},$$

и $$\dot{\varepsilon}_{ij}^{(s)} = \frac{1}{2G}\left\{3\left(\frac{c}{a}\right)^2 \frac{\dot{c}}{a} \cdot s_{ij} + \left(\frac{c}{a}\right)^3 \cdot \dot{s}_{ij}\right\}.$$

Учтем выделение энергии вследствие диссипативных процессов в среде из максвелловских элементов. Они в принятой модели определяются процессами вязкости и разрушения. Для каждого параллельно соединенного максвелловского элемента нужно отдельно вычислять мощность вязкой диссипации на единицу массы:

$$w_{visc} = \frac{1}{\rho}\sum_{k=1}^{5} s_{ij}^{(k)}\dot{\varepsilon}_{ij}^{(k)} = \sum_{k=1}^{5} \frac{s_{ij}^{(k)} s_{ij}^{(k)}}{2G^{(k)}\tau^{(k)}},$$

и мощность выделения энергии из-за сдвигового разрушения

$$w_{shear} = \frac{1}{\rho} s_{ij}\dot{\varepsilon}_{ij}^{(c)} = \frac{1}{2G\rho}\left\{3\left(\frac{c}{a}\right)^2 \frac{\dot{c}}{a} \cdot s_{ij}s_{ij} + \left(\frac{c}{a}\right)^3 \cdot \dot{s}_{ij}s_{ij}\right\}.$$

Таким образом, суммарный вклад диссипативных процессов во внутреннюю энергию определяется суммой удельных мощностей

$$w_{diss} = w_{shear} + w_{visc}.$$

Отметим, что искусственная вязкость при счете не должна давать вклад, сравнимый с w_{diss}. В противном случае, при вычислении внутренней энергии E будут вноситься значительные погрешности.

Полная величина модуля сдвига равна:

$$G = \sum_{k=1}^{5} G^{(k)}.$$

Для параллельного соединения элементов Максвелла полный девиатор напряжений s_{ij}:

$$s_{ij} = \sum_{k=1}^{5} s_{ij}^{(k)},$$

а полный девиатор деформаций ε_{ij} равен:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^{(c)} + \varepsilon_{ij}^{(k)},$$

так как при параллельном соединении деформации всех элементов одинаковы. Итак,

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{(k)} = 2G^{(k)}\dot{\varepsilon}_{ij} - \frac{s_{ij}^{(k)}}{\tau^{(k)}} - \frac{G^{(k)}}{G}\left[3\left(\frac{c}{a}\right)^2 \frac{\dot{c}}{a} s_{ij} + \left(\frac{c}{a}\right)^3 \cdot \dot{s}_{ij}\right].$$

Скорость изменения девиатора напряжений s_{ij} находится суммированием по всем элементам Максвелла:

$$\dot{s}_{ij} = \frac{2G\dot{\varepsilon}_{ij} - \sum_{k=1}^{5} \dfrac{s_{ij}^{(k)}}{\tau^{(k)}} - 3\left(\dfrac{c}{a}\right)^2 \dfrac{\dot{c}}{a} s_{ij}}{1 + \left(\dfrac{c}{c_a}\right)^3}.$$

Предполагается, что скорость роста трещин происходит по двум режимам, медленному и быстрому:

$$\dot{c} \equiv \frac{dc}{dt} \begin{cases} v_{\max} \left(\frac{K}{K_1} \right)^m, K \le K_2 \\ v_{\max} \left(1 - \left(\frac{K_0}{K} \right)^2 \right), K > K_2 \end{cases},$$

где $v_{\max}$, m, K_0 – константы. Величина $v_{\max}$ есть максимальная скорость роста трещины, K_0 – трещиностойкость, m – константа степенного роста трещины. Переход между медленным и быстрым режимами скорости роста трещин происходит при достижении порогового значения K_2, равного: $K_2 = K_0 \sqrt{1 + \frac{2}{m}}$.

Значение величины K_1 вычисляется как:

$$K_1 = K_2 \left(1 + \frac{m}{2} \right)^{\frac{1}{m}}.$$

Критериальное значение разрушения K связано с эффективным напряжением в соответствии с теорией Гриффитса хрупкого разрушения следующим образом:

$$K \sim \sqrt{\pi c}\, \sigma_{eff\ crack},$$

где $\sigma_{eff\ crack}$ – эффективное напряжение вдоль берегов трещины, c – текущая длина трещины. На основе теории Гриффитса в модели используется такое соотношение:

$$K^2 = \frac{3\pi a}{2} \frac{c}{a} s_{ij} s_{ij},$$

в предположении $\sigma^2_{eff\ crack} \sim s_{ij} s_{ij}$.

Опыты группы Г. В. Белова с образцами ВВ пониженной плотности

В данном разделе представлена схема проведения экспериментов группы Г. В. Белова (рис. 2) по воздействию стальными сферическими ударниками 4-х диаметров (массой 2, 12, 25 и 100 г соответственно), которые проводились с образцами из флегматизированного октогена с пониженной на 5,9–7,2 % плотностью (относительно номинальной 1,88 г/см^3) [2].

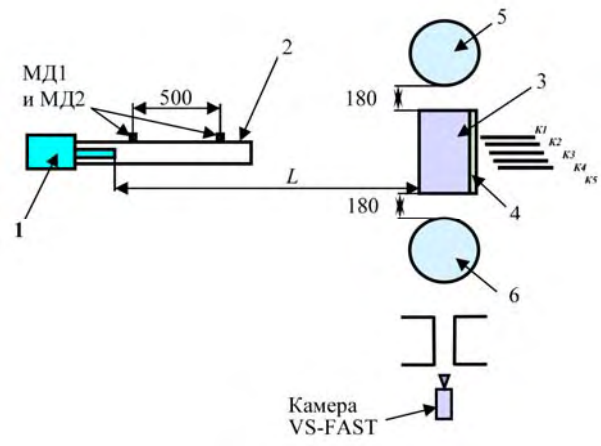


Рис. 2. Схема проведения экспериментов:1 – метательное устройство (БМУ-14,5); 2 – ствольная насадка с датчиками МД1 и МД2 для измерения скорости ударника; 3 – образец ВВ; 4 – пластинка-индикатор; К1, К2, К3, К4, К5 – игловые контактные датчики (контактный приемник); 5, 6 – импульсомеры (d = 90 мм; $m \approx$ 2,9 кг)

Постановка и исходные данные эксперимента следующие: образцы из флегматизированного октогена, армированного волокном СВМ, представляли собой цилиндры диаметром 120 мм и толщиной 60 мм, со средней плотностью 1,745–1,769 г/см^3, изготовленные в отделе 0310 ИФВ. В дополнение к этим образцам было изготовлено 3 контрольных образца такой же плотности для определения физико-механических свойств. Размеры этих образцов: ∅20×30 мм. Нагружение образцов ВВ осуществлялось стальными сферическими ударниками диаметром 29 мм (масса 99,66 г ≈ 100 г). Разгон ударников производился с помощью взрывного ствольного метательного устройства калибра 30 мм, которое располагалось на расстоянии ~0,8–1 м от образца ВВ. Погрешность измерения скорости удара не превышала 1 %.

Определение физико-механических характеристик образцов ВВ пониженной плотности проведено на трех цилиндрических образцах (п. 107, ч/п 42, ∅ 20 мм, h = 30 мм, плотность: ρ = = 1,74–1,75 г/см^3).

Результаты по определению физико-механических характеристик ВВ на образцах пониженной и номинальной плотности представлены в табл. 1 и рис. 3.

Полученные значения физико-механических характеристик (предела прочности и модуля упругости) ВВ при сжатии на образцах пониженной плотности на 30 % и 20 % соответственно ниже полученных на образцах ВВ номинальной плотности.

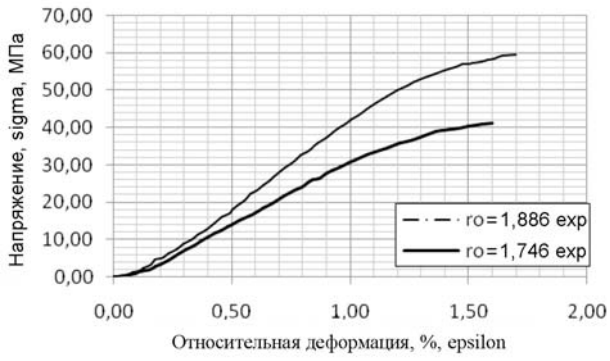


Рис. 3. Диаграмма нагружения образцов номинальной и пониженной плотности

Таблица 1

Физико-механические характеристики ВВ при сжатии на образцах пониженной плотности

№ образца	Плотность, ρ, г/см^3	Модуль упругости, E, МПа	Предел прочности, σ, МПа	Отн. деф-я, ε, %
1	1,746	33	41,3	1,6
2	1,749	38	41,8	1,5
3	1,751	40	42,5	1,4
Ср. знач.	1,749	37	41,9	1,5±0,1
4	1,886	47	59,6	1,7

Численное моделирование опытов с составными стержнями Гопкинсона

При прогнозировании последствий ударного воздействия на ВВ и тестировании физических моделей происходящих при этом процессов необходимо учитывать факторы, влияющие на инициирование и развитие взрыва. Одним из таких факторов является плотность ВВ. В области низкоскоростного ударного воздействия механизмы инициирования определяются не ударно-волновыми процессами, а условиями деформации и процессами прочностного разрушения образца ВВ. Поэтому выявление зависимости условий инициирования и динамики развития взрывчатого превращения из первичного очага при вариации плотности ВВ важно для понимания физики процессов и построения адекватных предсказательных моделей.

Была поставлена задача: в комплексе программ МИД ввести в модель Максвелла учет пористости ВВ и изучить ее влияние на порог инициирования.

Для проверки правильности внедрения модели по понижению плотности и ее параметров выполнено численное моделирование экспериментов по исследованию деформирования и разрушения образцов ВВ, нагружаемых по методу составных стержней Гопкинсона. Основным результатом данных опытов является диаграмма напряжения–деформации $\sigma(\varepsilon)$ цилиндрического образца ВВ при его одноосном сжатии.

На рис. 4 представлена двумерная осесимметричная геометрия задачи (x – ось симметрии). Расчетные области (физические) представляют собой цилиндры: I – ударная болванка, II – нагружающий стержень, III – исследуемый образец, IV – опорный стержень. Материал областей I, II, IV – титановый сплав, материал области III – ВВ на основе октогена. В начальный момент времени задается скорость U_1 болванки (обл. I). Болванка I ударяет с заданной скоростью по нагружающему стержню II, формируя в нем прямоугольный импульс упругой волны. Геометрические параметры эксперимента:

a) радиусы цилиндров: $R_1 = 0,3175$ см, $R_2 = 0,47$ см;

b) линейные размеры: $X_1 = 20$ см, $X_2 = 75$ см, $X_3 = 75,635$ см, $X_4 = 225,635$ см.

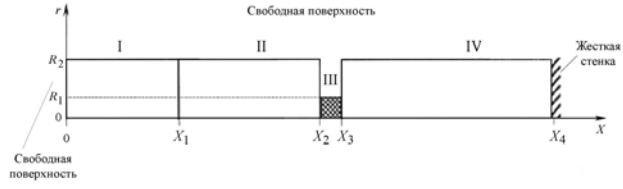


Рис. 4. Геометрия задачи

Для моделирования ВВ в расчетах используется трехчленное уравнение состояния с параметрами ВВ на основе октогена. Были проведены расчеты как с номинальной плотностью 1,886 г/см^3, так и с пониженной 1,746 г/см.^{3} Параметры для уравнений состояния приведены в табл. 2. Поведение ВВ в области III описывается вязкоупругой моделью с трещинами.

Таблица 2

Параметры трехчленного уравнения состояния

Вещество (номер области)	ρ_0, г/см^3	c_0, км/с	n	γ
Титан (I, II, IV)	4,39	4,9	3	2,2
ВВ на основе октогена (III)	1,875	2,52	7,003	2

Было проведено большое число тестовых расчетов для подбора оптимальных параметров вязкоупругой модели с трещинами. В итоге для дальнейшего численного моделирования были выбраны параметры № 1 и № 2, представленные в табл. 3 и 4. Наборы № 1и № 2 являются значениями для американского ВВ, подобранными в гидрокоде MESA. Для описания в соответствии с пониженной плотностью потребовалось изменение параметра трещиностойкости K_0 и коэффициентов G_i.

Таблица 3

Параметры № 1 вязкоупругой модели ВВ на основе октогена

k	1	2	3	4	5
$G^{(k)}$, ГПа	1,1328	0,2088	0,62544	1,0908	0,8256
$1/\tau^{(k)}$, 10^{-1}мкс	0	$7{,}32 \cdot 10^{-2}$	$7{,}32 \cdot 10^{-1}$	7,32	20,0
a, см	c_0, см	$v_{\max}$, км/с	K_0, ГПа·см$^{1/2}$		m
0,1	0,003	0,3	$1{,}1 \cdot 10^{-2}$		10

Таблица 4

Параметры № 2 вязкоупругой модели ВВ на основе октогена

k	1	2	3	4	5
$G^{(k)}$, ГПа	0,849	0,156	0,469	0,818	0,619
$1/\tau^{(k)}$, 10^{-1}мкс	0	$7{,}32 \cdot 10^{-2}$	$7{,}32 \cdot 10^{-1}$	7,32	20.0
a, см	c_0, см	$v_{\max}$, км/с	K_0, ГПа·см$^{1/2}$		m
0,1	0,003	0,3	$7{,}0 \cdot 10^{-3}$		10

На рис. 5 представлена итоговая диаграмма напряжения-деформации для образца ВВ номинальной и пониженной плотности в расчетах составного стержня Гопкинсона с набором параметров № 1 и № 2 и результаты экспериментов группы Белова. Как видно из табл.5 физико-механических характеристик ВВ, результаты расчета и эксперимента имеют удовлетворительное согласие. В основном в параметрах модели варьировались G_i и величина K_0 – трещиностойкость. Хорошо удалось смоделировать участок возрастающей ветви. Эти расчеты были бы точнее, если бы экспериментаторы приводили бы не только графики $\sigma(\varepsilon)$, но и зависимость $\varepsilon(t)$.

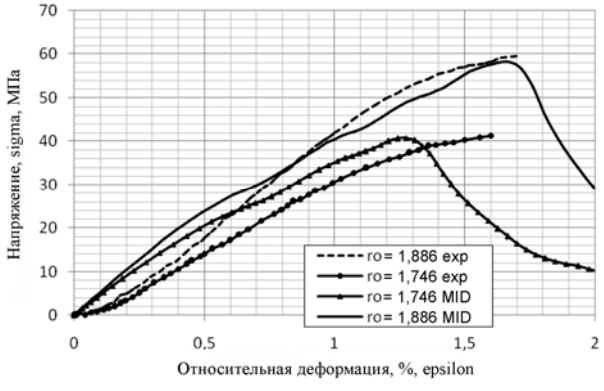


Рис. 5. Итоговая диаграмма напряжения–относительной деформации эксперимента и расчета с параметрами № 1

Таблица 5

Физико-механические характеристики ВВ

№ образца	Плотность, ρ, г/см^3	Предел прочности, σ, МПа	Отн. деф-я, ε %
Эксперимент	1,746	41,3	1,6
Расчет МИД	1,746	40,78	1,3
Эксперимент	1,886	59,6	1,7
Расчет МИД	1,886	58,21	1,67

По результатам численных экспериментов нами предложены аппроксимационные формулы для вычисления величины параметра трещиностойкости $\boldsymbol{K}_0$ с учетом плотности ВВ: где ρ – плотность пористого ВВ. При $\rho = 1{,}746$ г/см^3 $k = k_1 = 0{,}007$.

$$\boldsymbol{K}_0(\rho_0) = -0{,}03039 + 0{,}02142$$

$$G_i = G_i * \alpha(\rho_0),$$

где: $\alpha(\rho_0) = 1{,}428 * \rho_0 - 1{,}593$.

Постановка расчетов в комплексе МИД опытов группы Г. В. Белова с образцом ВВ номинальной и пониженной плотности

Для модификации критерия взрыва с учетом пористости в комплексе программ МИД были проведены расчеты экспериментов группы Белова как с номинальной, так и пониженной плотностью. Результаты экспериментов группы Белова приведены в табл. 6–7.

Таблица 6

Результаты экспериментов Г. В. Белова и соавторов с образцом ВВ номинальной плотности ρ = 1,886 г/см^3

№	Масса ударника, (г)	$V_{\text{удара}}$, (м/с)	Результат эксперимента
1	2	73	Реакция в образце отсутствует
		78	Инициирование ВП
2	12	49,2	Реакция в образце отсутствует
		52,25	Инициирование ВП
3	25	46	Реакция в образце отсутствует
		54	Инициирование ВП
4	100	32	Реакция в образце отсутствует
		35	Инициирование ВП

Таблица 7

Результаты экспериментов Г. В. Белова и соавторов с образцом ВВ пониженной плотности $\rho = 1{,}746$ г/см^3

№	Масса ударника, (г)	$V_{\text{удара}}$, (м/с)	Результат эксперимента
1	12	76	Реакция в образце отсутствует
		82	Инициирование ВП
2	100	64	Реакция в образце отсутствует
		69	Инициирование ВП

По результатам опытов с двумя диаметрами ударников и пониженной на 6,9–7,3 % и 5,9–7,2 % плотностью (относительно номинальной: 1,886 г/см^3), авторами был сделан вывод, что снижение плотности образца ВВ приводит к увеличению предельной скорости:

1. Для ударника массой 100 г при снижении плотности на 6–7 % (с 1,88 г/см^3 до 1,745–1,769 г/см^3) предельная скорость увеличивается с 32–35 м/с до 66–67 м/с.

2. Для массы ударника 12 г получено увеличение предельной скорости с 50–52 м/с до 60–65 м/с при снижении плотности на 4–5 % (с 1,88 г/см^3 до 1,788–1,8 г/см^3) и до 77–81 м/с при снижении плотности на 7 % (с 1,88 г/см^3 до 1,747–1,754 г/см^3).

Далее представлены результаты расчетов в методике МИМОЗА с использованием модификации модели Максвелла с учетом пористости и образцом ВВ пониженной плотности **1,746 г/см^3** (на 7 % относительно номинальной 1,886 г/см^3). Для расчетов брались параметры № 2 вязкоупругой модели из табл. 4. Для описания экспериментов с ВВ номинальной плотности был использован набор параметров № 1 из табл. 3.

Критерий с единым пороговым значением

Для лучшей предсказательности ситуации «взрыв-не взрыв» может служить критерий с единым пороговым значением. Данная функция была подобрана эмпирическим путем на основе расчетов по моделированию большого набора опытов с ВВ на основе октогена [3].

На данный момент до введения учета пористости ВВ критерий выглядел следующим образом [3]:

$$\varphi = \varphi_0 \cdot f \cdot g\left(\frac{c}{c_a}\right)$$

где: φ_0 – базовый критерий (1), функция f – функция, учитывающая динамический масштабный эффект, определенная с помощью интенсивности напряжения (2); g – функция, характеризуемая разрушенностью среды ВВ (3). Величина φ_0 рассчитывается по формулам:

$$\frac{d\varphi_0}{dt} = G\left(p, \rho, E, \varepsilon, \dot{\varepsilon}, \ldots\right) - \frac{\varphi_0}{\tau_0},$$

где G – скорость генерации дефектов

$$\frac{d\varphi_0}{dt} = \left(\frac{1}{W_0}\frac{\sigma_{ij}}{\rho}\frac{d\varepsilon_{ij}}{dt}\right)^m \cdot \theta\left(\dot{\gamma} - \dot{\gamma}_{0cr}\right) \cdot \left(1 + \left(\frac{p}{p_0}\right)^n\right) \cdot \theta\left(p\right) - \frac{\varphi_0}{\tau_0},$$

$$\theta(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$f = \left(\int_0^t \left(\sigma - \sigma_0\right)^m \theta\left(\sigma - \sigma_0\right)\theta\left(p\right) dV\right)^\alpha \quad m = 1; \alpha = 1{,}3 \quad (2)$$

$$g\left(\frac{c}{c_a}\right) = 1 - 0{,}0001 \cdot \frac{c}{c_a} \quad (3)$$

где: W_0, m, $\dot{\gamma}_{0cr}$, n, τ_0 – параметры критерия φ_0, $\sigma_0 = 0{,}5$ ГПа, $\frac{\sigma_{ij}}{\rho}\frac{d\varepsilon_{ij}}{dt}$ – мощность общих деформаций, $\dot{\gamma}$ – скорость общих деформаций (инвариант), c – текущая длина, c_a – характерный размер трещины.

Модификация критерия с единым пороговым значением с учетом пористости

Авторами была проведена работа по модификации критерия φ: в него был введен учет пористости в виде функций $\beta(\rho)$ и $A(\rho)$:

$$\varphi = \varphi_0 \cdot g \cdot f^{\beta(\rho)} \cdot A(\rho)$$

где: $A(\rho)$ и $\beta(\rho)$ – функции плотности.

Опишем подробнее вид данных функций:

$$\beta(\rho) = \left(\beta_0 - \mu \cdot x\right)$$

где $\mu = 5{,}38$; $\beta_0 = 0{,}8$; $x = \frac{\rho_{nom} - \rho}{\rho_{nom}}$ (ρ_{nom} – номинальная начальная плотность образца ВВ, ρ_{low} – пористая начальная плотность образца ВВ, $\rho_{low} \leq \rho \leq \rho_{nom}$).

Окончательно получаем формулу:

$$A(\rho) = 0{,}1428 * \rho + 0{,}0006.$$

На основе результатов проведенных расчетов опытов группы Белова с набором параметров № 1 и № 2, с ВВ номинальной и пониженной плотности, удалось построить критерий φ с единым порогом с учетом пористости ВВ. Его вид представлен

на рис. 6. Значения критерия пористого ВВ отмечены круглым маркером, а значения критерия непористого ВВ – маркером типа «треугольник» (закрашенный маркер описывает ситуацию «взрыв», незакрашенный маркер– «не взрыв»).Превышение критерия φ значения 1 означает взрыв.

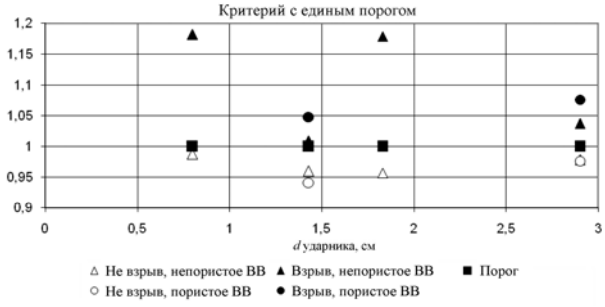


Рис. 6. Критерий с единым порогом

Заключение

Выполнено численное моделирование экспериментов по исследованию деформирования и разрушения образцов ВВ, нагружаемых по методу составных стержней Гопкинсона для учета влияния пористости ВВ на параметры модели Максвелла – Вихерта и подобраны оптимальные константы модели. Данный набор параметров позволил удовлетворительно описать диаграмму напряжения-деформации для опытов группы Г. В. Белова (ИФВ) по воздействию сферическими стальными ударниками четырех диаметров на образцы ВВ номинальной и пониженной на 6–7 % плотности.

На основе проведенного численного моделирования предложены формулы зависимости параметра трещиностойкости и модулей сдвига от начального значения плотности ВВ.

Выполнена модификация вязкоупругой модели Максвелла – Вихерта и критерия взрыва φ: введен учет плотности ВВ. Опыты группы Г. В. Белова показали существенное влияние пористости ВВ на порог взрыва.С помощью модифицированного критерия с единым порогом взрыва удалось описать имеющуюся совокупность экспериментов группы Г. В. Белова по соударению сферических ударников с ВВ на основе октогена и получить единый порог критерия для нагружения образцов номинальной и пониженной плотности.

Это позволяет сделать вывод о возможности использования модифицированной модели Максвелла – Вихерта и критерия взрыва с единым пороговым значением для оценки взрывобезопасности конструкций, содержащих ВВ.

Литература

1. Софронов И. Д., Винокуров О. А, Змушко В. В. и др. Комплекс программ МИМОЗА. Решение многомерных задач гидродинамики // Вопросы математического моделирования вычислительной математики и информатики. Сборник научных трудов. Москва – Арзамас-16, 1994.

2. Белов Г. В., Базаров Ю. Б. и др. Влияние предварительного механического повреждения и пористости взрывчатого вещества на условия инициирования и параметры взрыва при низкоскоростном ударе // Физика горения и взрыва, 2017. Т. 53, № 2.

3. Седов С. Ю., Мицура М. Н. Критерий начала взрыва при низкоскоростном воздействии на взрывчатые составы на основе октогена / Международная конференция «XII Забабахинские научные чтения» // Сборник тезисов. Снежинск: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ», 2014. С. 116.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ ПО МЕТОДИКЕ УП С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БИБЛИОТЕКИ DAKOTA И МЕТОДА BOX

М. А. Десятникова, Ю. Е. Дудник, Г. Г. Иванова

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В настоящее время во ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» ведутся работы по расчетно-теоретическому сопровождению физических экспериментов: создаются и развиваются модели вещества, ведется работа по модернизации конструкции рассматриваемых систем с целью улучшения их характеристик и обеспечения более надежной работы, ведется работа по восстановлению условий нагружения в экспериментах. При выполнении данных работ активно используется методика УП [1], предназначенная для численного решения уравнений механики сплошной среды в одномерном приближении с учетом эффектов, сопровождающих поведение конденсированных сред при воздействии ударных и тепловых нагрузок.

При решении задач обработки экспериментальных данных (калибровки и подбора параметров моделей, геометрии систем) часто возникает необходимость поиска минимума некоторой функции, позволяющей оценить близость расчетных и экспериментальных данных. Решение данной задачи вручную, как правило, сопряжено с большими временными затратами. Для проведения разнообразных серий расчетов по обработке экспериментальных данных в автоматическом режиме была разработана оптимизационная версия методики УП.

В настоящее время область применения оптимизационного комплекса:

– отработка и калибровка параметров моделей вещества (целью расчетов является определение оптимального набора значений параметров функций веществ, таких как уравнение состояния, коэффициент теплопроводности, кинетика разрушения, модель компактирования, модель упругопластического деформирования и т. д.),

– модернизации геометрии систем с целью улучшения их характеристик и обеспечения более надежной работы,

– восстановление условий нагружения экспериментов (целью расчетов является определение постоянного значения граничного условия, набора значений в табличной зависимости граничного условия или параметров формулы, определяющей нагрузку на границе).

Целью всех оптимизационных расчетов является определение минимума оценочной функции (задача определение максимума оценочной функции сводится к задаче определения минимума оценочной функции противоположного знака). В результате проведения анализа основных типов экспериментальных данных, в настоящее время реализована возможность расчета следующих видов оценочной функции:

– минимум отклонения скалярной величины от экспериментально зафиксированного значения: например, определение минимума отклонения между расчетным и экспериментальным значением толщины первого откольного слоя;

– минимум (максимум) скалярной величины: например, определение минимума (максимума) времени прихода возмущения на определенный радиус системы;

– минимум отклонения (или вектора отклонений) расчетной табличной зависимости от экспериментальной. В этот вид вычисления оценочной функции входит, например, определение минимума отклонения расчетной и экспериментальной зависимостей скорости движения свободной поверхности, давления от времени в некоторой точке образца, распределения плотности в некоторый момент времени;

– минимум суперпозиции функций: данный вид вычисления оценочной функции необходим, например, для задачи определения параметров кинетических моделей разрушения, используя одновременно данные по значению толщин первых откольных слоев и по зарегистрированным скоростям движения свободной поверхности.

В настоящее время при проведении оптимизационных расчетов реализована возможность поиска минимума оценочной функции с помощью следующих методов оптимизации:

– комплекс-метода BOX [2] – не градиентный метод в основе которого лежит определение набора случайных точек из множества определения (комплекса) с дальнейшей заменой точек с текущими наибольшими значениями функций (минимизируемой) с помощью алгоритмов, использующих координаты центра комплекса и координаты «наихудшей» точки;

– программ свободной библиотеки DAKOTA [3] как в последовательном, так и в параллельном режиме (с возможностью определения доверительных интервалов изменения оптимальных значений параметров).

Общая структура и последовательность выполнения оптимизационного расчета с помощью метода оптимизации BOX продемонстрирована на рис. 1.

На первом этапе происходит создание файла начальных данных для оптимизации *file_optim*, содержащего информацию о типе и методе оптимизации,

об общих параметрах выбранного метода оптимизации, о начальных и дополнительных параметрах для выбранного типа оптимизации, об именах файлов с подстановками задач для счетной методики УП, о выбранном виде и параметрах расчета оценочной функции. На втором этапе происходит запуск задачи оптимизации: в ведущей программе оптимизационной процедуры осуществляется чтение файла начальных данных, формирование дополнительных файлов:*file_optim_in* (двоичный файл со значениями оптимизационных параметров), *file_optim_info* (текстовый файл, содержащий параметры выбранного типа оптимизации) и запуск счетной методики УП. На этапе расчета начальных данных в счетной методике УП происходит их корректировка в соответствии с файлами *file_optim_info*, *file_tdf_optim_in*. По завершению расчета задачи происходит формирование дополнительных файлов с результатами расчета, необходимыми для определения оценочной функции. Далее в рамках ведущей программы оптимизационной процедуры проводиться расчет оценочной функции и передача полученного значения в комплекс BOX. В комплексе BOX осуществляется проверка сходимости полученного решения и получение новых значений варьируемых параметров (с дальнейшей передачей полученных значений в ведущую программу оптимизационной процедуры) или выход из программы по одному из критериев завершения счета и формирование отчетной выдачи.

Общая структура и последовательность выполнения оптимизационного расчета с помощью программ свободной библиотеки DAKOTA продемонстрирована на рис. 2.

Рис. 1. Общая структура и последовательность выполнения оптимизационного расчета с помощью метода BOX

Рис. 2. Общая структура и последовательность выполнения оптимизационного расчета с помощью программ свободной библиотеки DAKOTA

Особенностью выполнения расчета является то, что ведущая программа оптимизационной процедуры осуществляет только чтение файла начальных данных, формирование дополнительных файлов для счетной методики УП и библиотеки DAKOTA и запуск программы DAKOTA с драйвером УП-DAKOTA. Драйвер программы DAKOTA осуществляет формирование файлов со значениями оптимизационных параметров, запуск счетной методики УП и определение на основе полученных результатов расчета величины оценочной функции для ее передачи одной из программ оптимизации библиотеки DAKOTA.

В качестве тестовых примеров, демонстрирующих работоспособность программ связи счетной методики УП с методами оптимизации, в рамках данной работы рассмотрим задачу оптимизации параметров кинетической модели разрушения ДРК-L [4] для свинца на основе опытов по нагружению образцов взрывчатым веществом [5], задачу восстановления таблицы давления, заданного на левой границе системы, по известной скорости движения правой границы системы и задачу оптимизации размера слоя мгновенной детонации для описания движения границ области.

Оптимизация параметров кинетической модели откольного разрушения и компактирования ДРК-L

Оптимизация модели откольного разрушения и компактирования ДРК-L [4] предусматривает возможность определения параметров модели, при которых наблюдается наилучшее согласие расчетных и экспериментальных толщин первого откольного слоя. В работе [5] приведены результаты экспериментов, в которых определены толщины отколов, образовавшихся в свинцовых пластинах, нагруженных взрывчатым веществом (ВВ).

В оптимизационных расчетах проводилась вариация шести параметров модели ДРК-L – $R_{\min}$, N, C_1, $\omega_{кр}$, σ_0, μ_0. Диапазон изменения оптимизируемых параметров приведен в табл. 1. В качестве оценочной функции использовалось среднее абсолютное отклонение между расчетными и экспериментальными величинами толщин первого откольного слоя.

В табл. 2, 3 представлены результаты оптимизационных расчетов, проведенных по методике УП с использованием программ свободной библиотеки DAKOTA и метода BOX. Первая оптимизационная серия была проведена с применением не градиентного метода оптимизации *coliny direct* библиотеки DAKOTA, вторая – с использованием метода наименьших квадратов *n2sol* библиотеки DAKOTA, третья – с использованием метода BOX. В табл. 2 приведено сравнение экспериментально зафиксированных толщин первого откольного слоя для каждого опыта с расчетными величинами, полученными с использованием найденных программой оптимизации значений параметров модели ДРК-L. В табл. 3 представлены полученные в результате оптимизации параметры модели ДРК-L.

Таблица 1

Параметры оптимизационных расчетов

Оптимизируемый параметр	Минимальное значение	Максимальное значение
$R_{\min,}$ (см)	10^{-9}	10^{-5}
N, (1/см^3)	10^4	10^{10}
C_1	0,8	1,2
$\omega_{кр}$	0,2	0,45
σ_0, (мН/м)	400	880
μ_0, (10^{-3}Па·с)	3	300

Таблица 2

Результаты оптимизации

$\Delta_{Обр}$, см	$\Delta_{ВВ}$, см	$\Delta_{Отк_Э}$, см	DAKOTA				BOX	
			Метод оптимизации – *colinydirect*		Метод оптимизации – *n2sol*			
			$\Delta_{Отк_Р}$, см	δ, %	$\Delta_{Отк_Р}$, см	δ, %	$\Delta_{Отк_Р}$, см	δ, %
2,5	10	0,130±0,02	0,1345	3,46	0,1305	0,38	0,1295	0,38
	5,1	0,110±0,02	0,1065	3,18	0,1035	5,91	0,1065	3,18
	3,81	0,105±0,02	0,1045	0,48	0,1025	2,38	0,1045	0,48
	2,5	0,100±0,02	0,1075	7,5	0,1055	5,5	0,1045	4,5
	1,27	0,120±0,01	0,1295	7,92	0,1300	8,33	0,1215	1,25
1,2	1,9	0,075±0,02	0,0545	27,33	0,0555	26	0,0555	26
	1,27	0,080±0,01	0,0795	0,625	0,0805	0,625	0,0795	0,625

Таблица 3

Параметры модели ДРК-L, полученные в результате оптимизации

	R_{min}, см	N_0, 1/см^3	C_1	σ_0, мН/м	μ_{0L}, 10^{-3}·Па·с	$\omega_{крит}$
DAKOTA, *coliny_direct*	$1{,}396 \cdot 10^{-7}$	$0{,}979071 \cdot 10^{5}$	1,022075	463,017	3,9	0,4
DAKOTA, *n2sol*	$1{,}3869 \cdot 10^{-7}$	10^{5}	1,009648	453,58	3,9	0,4
BOX	$1{,}7537 \cdot 10^{-7}$	$2{,}482648 \cdot 10^{4}$	1,1356862	635,38	10,6	0,3736

Анализ табл. 2 показывает, что с помощью полученных процедурой оптимизации значений параметров модели ДРК-L удалось с хорошей точностью описать результаты исследуемых экспериментов – отклонение расчетных и экспериментальных значений толщин откольного слоя находятся в пределах экспериментальной погрешности и среднее относительное отклонение между экспериментальными и расчетными значениями величин первых откольных слоев для первой серии оптимизации составляет ~ 7,21 %, для второй серии оптимизации ~ 7,02 %, для третьей серии оптимизации ~ 5,2 %.

Восстановление таблицы граничного давления

В качестве тестовых задач рассмотрен процесс деформирования цилиндрических оболочек из тантала толщиной $\Delta_1 = 0{,}092$ см и $\Delta_2 = 0{,}063$ см под действием давления, заданного на внутренней границе. В результате оптимизационных расчетов необходимо восстановить таблицу давления, заданного слева, по известной скорости движения правой границы оболочки. Математическая постановка расчета включает только учет газодинамики. Предполагается, что параметры уравнения состояния для тантала известны.

Для получения «эталонной» скорости движения правой границы использовалась табличная зависимость граничного условия, график которой продемонстрирован на рис. 3.

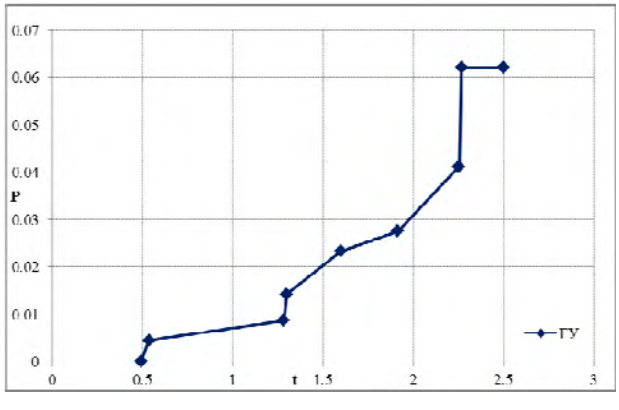
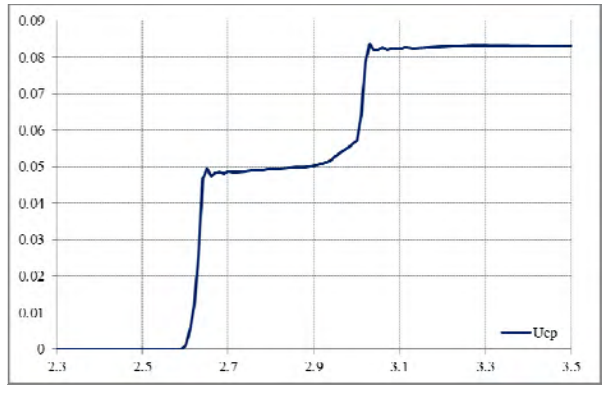
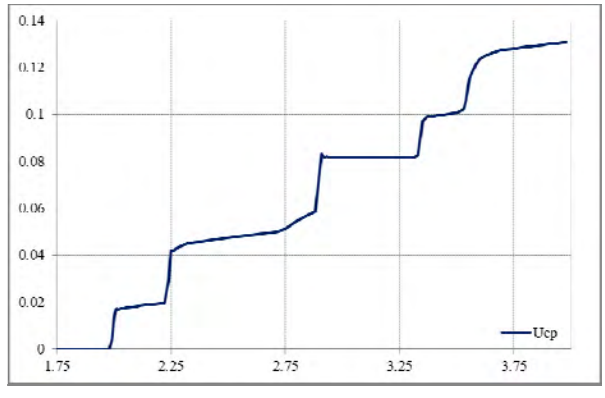


Рис. 3. Эталонная табличная зависимость граничного условия

На рис. 4 представлены графики скорости движения свободной поверхности, получаемые в расчетах по нагружению цилиндрических оболочек разных толщин. Следует отметить, что при одинаковых нагружающих условиях в рассматриваемых образцах волновая конфигурация решения сильно различна.



а



б

Рис. 4. Эталонные скорости движения свободной поверхности при нагружении: а – оболочки толщиной $\Delta_1 = 0{,}092$ см, б – оболочки толщиной $\Delta_2 = 0{,}063$ см

Для поиска минимума отклонения результатов расчета от эталонных значений использовался метод наименьших квадратов *n2sol* библиотеки DAKOTA. Решение данной задачи с использованием библиотеки DAKOTA обусловлено возможностью нахождения не только конкретных значений искомых параметров, при которых наблюдается наилучшее согласие экспериментальных и расчетных данных, но и доверительного интервала изменения каждого из них.

Для оценки зависимости решения от начальных данных проведено два оптимизационных расчета по

восстановлению таблицы граничного давления при нагружении образца толщиной 0,092 см, начальные данные для которых приведены в табл. 4.

В табл. 5 и 6 приведены результаты двух серий оптимизационных расчетов по восстановлению таблицы граничного давления при нагружении оболочки толщиной 0,092 см: расчетные и«эталонные» значения оптимизируемых параметров, доверительный интервал вариации расчетных значений и абсолютное отклонение результата оптимизационного расчета от «эталонного». Анализ таблиц показывает, что найденные значения табличной зависимости граничного условия с достаточно хорошей точностью согласуются с «эталонными» значениями в независимости от выбранного начального приближения. Наибольшие отклонения между «эталонными» и расчетными значениями получены для второго, третьего и четвертого параметров. Однако неточность в задании данных параметров не отразилась на расчетной скорости движения свободной поверхности. Оценочная функция для первого расчета составила $7{,}69 \cdot 10^{-9}$, для второго – $3{,}72 \cdot 10^{-7}$.

Таблица 4

Начальные данные оптимизационных расчетов по восстановлению таблицы граничного давления при нагружении образца толщиной 0,092 см

№ о.п	Минимальное значение	Максимальное значение	Начальное значение № 1	Начальное значение № 2
1	0	0,0001	0,0	0,0
2	0	0,062088	0,003	0,003
3	0	0,062088	0,007	0,006
4	0	0,062088	0,01	0,01
5	0	0,062088	0,02	0,017
6	0	0,062088	0,024	0,02
7	0	0,062088	0,039	0,03
8	0,052	0,064	0,055	0,046
9	0,052	0,064	0,06	0,05

Таблица 5

Результат первого оптимизационного расчета по восстановлению таблицы граничного давления при нагружении оболочки толщиной 0,092 см

№	$P_{эталон}$	Результат оптимизации		Доверительный интервал	
		$P_{оптим}$	ΔP	P_{min}	P_{max}
1	0	4,92E-08	4,92E-08	–1,42E-5	1,43E-05
2	0,004533	0,003658	0,000875	3,62E-03	3,70E-03
3	0,008654	0,009632	0,000978	9,37E-03	9,89E-03
4	0,014286	0,013397	0,000889	1,29E-02	1,39E-02
5	0,023352	0,023368	1,6E-05	2,33E-02	2,34E-02
6	0,02761	0,027549	6,1E-05	2,75E-02	2,76E-02
7	0,041209	0,041044	0,000165	4,10E-02	4,11E-02
8	0,062088	0,062196	0,000108	6,21E-02	6,23E-02
9	0,062088	0,062088	0	6,19E-02	6,21E-02
ΔP_{max}= 1,58 %; $\Delta P_{ср}$= 0,55 %				ΔP_{max}= 1,61 %; $\Delta P_{ср}$ = 0,42 %	

Таблица 6

Результат второго оптимизационного расчета по восстановлению таблицы граничного давления при нагружении оболочки толщиной 0,092 см

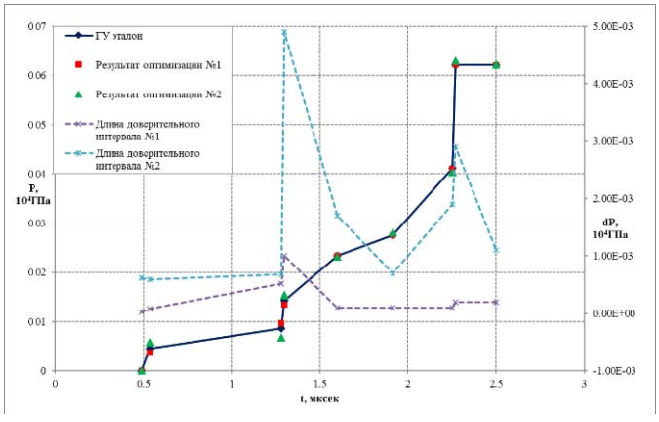
№	$P_{эталон}$	Результат оптимизации		Доверительный интервал	
		$P_{оптим}$	ΔP	P_{min}	P_{max}
1	0	3,01E-06	3,01E-06	–3,04E-4	3,10E-04
2	0,004533	0,00574	0,00121	5,45E-03	6,04E-03
3	0,008654	0,006682	0,001972	6,34E-03	7,02E-03
4	0,014286	0,015385	0,0011	1,29E-02	1,78E-02
5	0,023352	0,023209	0,000143	2,24E-02	2,41E-02
6	0,02761	0,028145	0,00054	2,78E-02	2,85E-02
7	0,041209	0,040372	0,000837	3,94E-02	4,13E-02
8	0,062088	0,062934	0,00085	6,15E-02	6,44E-02
9	0,062088	0,062261	0,00017	6,16E-02	6,27E-02
ΔP_{max} = 3,18 %; $\Delta P_{ср}$ = 1,22 %				ΔP_{max}= 7,89 %; $\Delta P_{ср}$= 2,7 %	

Следует отметить, что найденные программной оптимизации значения параметров по начальному приближению № 1 получены с достаточно хорошей точностью, так как отклонения максимально допустимого от минимально допустимого значения для параметров не превышает 1,61 % (среднее отклонение 0,42 %). Однако в оптимизационном расчете № 2 получены достаточно широкие доверительные интервалы для вариации параметров: при использовании начального приближения № 2 среднее отклонение максимально допустимого оптимального значения от минимально допустимого значения 2,7 %, максимальное значение данного отклонения – 7,89 %.

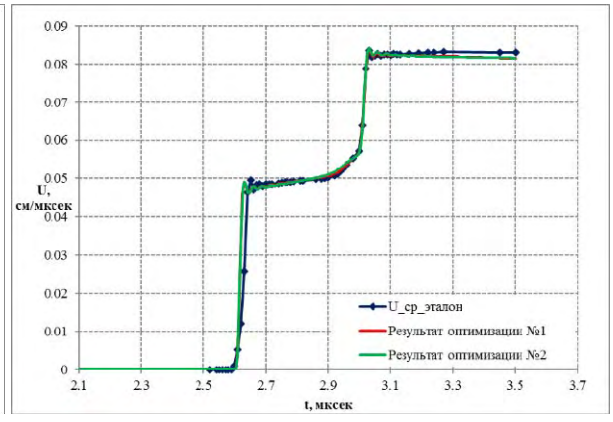
На рис. 5а продемонстрированы графики функций табличной зависимости граничного условия, полученные в результате оптимизации, в сравнении с «эталонной». На рис. 5б – скорость движения свободной поверхности в результирующих оптимизационных расчетах в сравнении с «эталонной».

В табл. 7 приведены результаты оптимизационного расчета по нагружению образца толщиной 0,063 см: расчетные и «эталонные» значения оптимизируемых параметров, доверительный интервал вариации расчетных значений и абсолютное отклонение результата оптимизационного расчета от «эталонного».

Анализ табл. 7 показывает, что найденные программной оптимизации значения в табличной зависимости нагружающего давления с хорошей точностью согласуются с «эталонными» значениями. Оценочная функция для данного расчета составила $1{,}335 \cdot 10^{-6}$. Следует отметить, что найденные программной оптимизации значения параметров получены с хорошей точностью, так как отклонения максимально допустимого от минимально допустимого значения параметров оптимизации не превышает 1,29 % (среднее отклонение 0,58 %), «эталонные» значения параметров входят в доверительные интервалы.



а



б

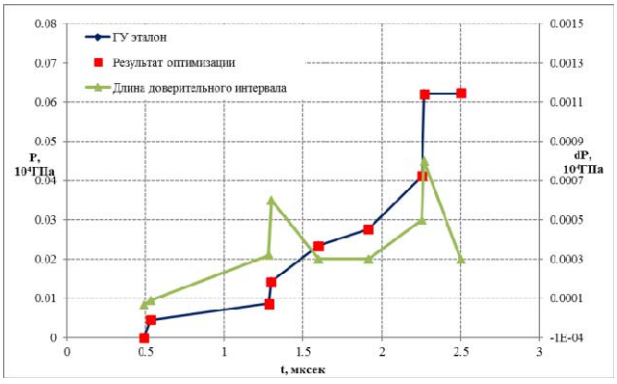
Рис. 5. Результаты оптимизационного расчета по восстановлению таблицы граничного давления при нагружении оболочки толщиной 0,092 см: а – табличная зависимость граничного условия, б – скорость движения свободной поверхности при нагружении оболочки

Таблица 7

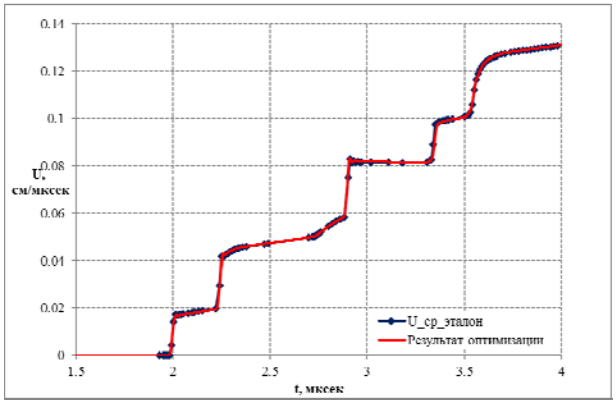
Результат оптимизационного расчета по нагружению образца толщиной 0,063 см

№	Рэталон	Результат оптимизации		Доверительный интервал	
		$P_{оптим}$	ΔP	P_{min}	P_{max}
1	0	4,66E-06	4,66E-06	–2,91E-05	3,84E-05
2	0,004533	0,004511	2,2E-05	4,47E-03	4,56E-03
3	0,008654	0,008574	8E-05	8,41E-03	8,73E-03
4	0,014286	0,01419	9,6E-05	1,39E-02	1,45E-02
5	0,023352	0,023347	5E-06	2,32E-02	2,35E-02
6	0,02761	0,027629	1,9E-05	2,75E-02	2,78E-02
7	0,041209	0,041121	8,8E-05	4,09E-02	4,14E-02
8	0,062088	0,062	8,8E-05	6,16E-02	6,24E-02
9	0,062088	0,062238	0,00015	6,20E-02	6,23E-02
ΔP_{max}= 0,24 %; $\Delta P_{ср}$ = 0,098 %				ΔP_{max}= 1,29 %; $\Delta P_{ср}$= 0,58 %	

На рис. 6а продемонстрированы графики функций табличной зависимости граничного условия, полученные в результате оптимизации, в сравнении с «эталонной». На рис. 6б – скорость движения свободной поверхности в результирующих оптимизационных расчетах в сравнении с «эталонной».



а



б

Рис. 6. Результаты оптимизационного расчета по восстановлению таблицы граничного давления при нагружении оболочки толщиной 0,063 см: а – табличная зависимость граничного условия, б – скорость движения свободной поверхности при нагружении оболочки

Анализ проведенных оптимизационных расчетов по нагружению цилиндрических оболочек разной толщины показывает, что для получения наилучших результатов расчета необходимо корректно выбирать параметры оптимизации в соответствии с имеющимися экспериментальными данными. Скорость движения свободной поверхности оболочки меньшей толщины позволила в хорошей степенью точности восстановить исходную таблицу нагружающих граничных условий. Возникающие в рассматриваемой оболочке волны успевали достигнуть и отразиться от ее свободной поверхности, что отражено в самой скорости ее движения. В свою очередь, скорость движения свободной поверхности оболочки большей толщины не отражала всех скачков давления в исходной таблице граничных условий. Восстановить нагружающую таблицу с хорошей точностью удалось только при условии, что ее начальное приближение близко к «эталонному». Это обусловлено тем, что экспериментальная кривая могла быть описана с практически одинаковой степенью точности при различных значениях части параметров в таблице граничных условий.

Оптимизация размера слоя мгновенной детонации

Типовая схема большого ряда экспериментальных устройств, предназначенных для исследования термодинамических и прочностных свойств материалов продемонстрирована на рис. 7. Расчетная геометрия данного типа устройств представляет собой набор следующих областей: область I – воздушный зазор; область II – оболочка из исследуемого материала, взрывчатое вещество (ВВ) и слой мгновенной детонации (СМД), который представляет собой слой мгновенно прореагировавшего ВВ относительно небольшой толщины, и применяется для моделировании инициирования детонации ВВ. При газодинамической отработке экспериментальных устройств рассмотренного типа регистрируется положение границ исследуемой оболочки(область II) во времени (зависимости движения внутреннего $R_1(t)$ и внешнего $R_2(t)$ радиусов от времени).

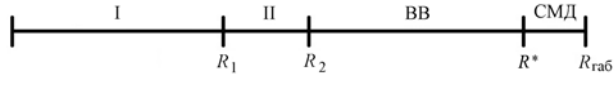


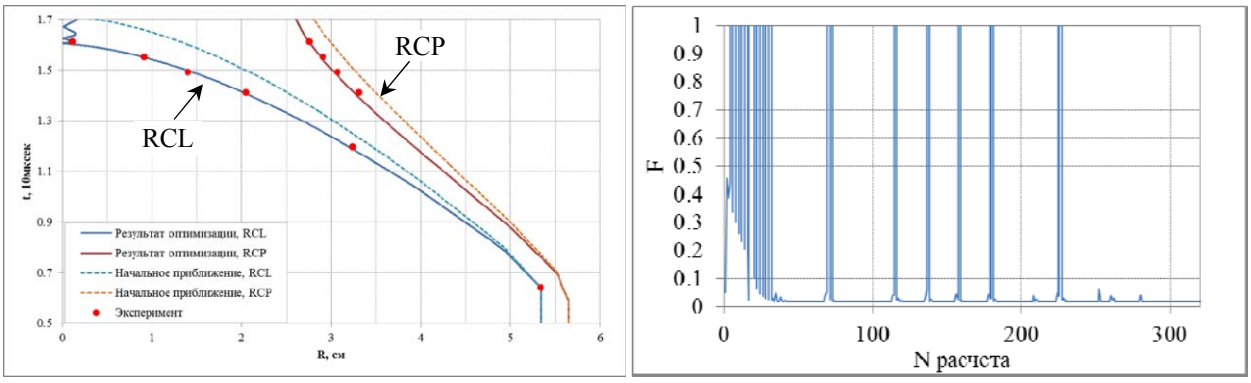
Рис. 7. Типовая схема моделируемого устройства

Рассмотрим задачу оптимизации толщины слоя мгновенной детонации на основании результатов газодинамической отработки экспериментального устройства по исследованию прочностных свойств стали. Толщина исследуемой оболочки 0,31 см, величина воздушного зазора 5,34 см, габариты рассматриваемой системы 11,1 см. Целью оптимизационных расчетов является определение значения одного параметра: внутреннего радиуса области СМД – $R*$, при котором достигается наилучшее согласие расчетных кривых с экспериментальными зависимостями $R_1(t)$ и $R_2(t)$, при условии, что минимальное значение толщины СМД 0,05 см, максимальное – 1,6 см, радиус внешней границы области СМД $R_{\text{габ}}$ зафиксирован.

В качестве оценочной функции использовалось среднеквадратичное отклонение между расчетными и экспериментальными табличными зависимостями движения внутренней и внешней границ области II:

$$F = \sqrt{\frac{1}{2n}\sum_{i=1,n}\left[\left(\frac{Rcl(t_i)-R_1(t_i)}{R_1(t_i)}\right)^2+\left(\frac{Rcp(t_i)-R_2(t_i)}{R_2(t_i)}\right)^2\right]}$$

где $Rcl(t_i)$, $Rcp(t_i)$ – расчетное значение внутреннего и внешнего радиуса области в момент времени



а б

Рис. 8. Результаты оптимизационного расчета: а – расчётная $R-t$ диаграмма движения второй области в сравнении с экспериментальными данными, б – оценочная функция

$t=t_i$, $i=1,\ n$; n – количество точек в экспериментальных зависимостях $R_1(t)$ и $R_2(t)$.

На рис. 8 представлены результаты оптимизационного расчета, проведенного по методике УП с использованием метода BOX: на рис. 8а приведены расчетные $R-t$ диаграммы движения оболочки в сравнении с экспериментальными данными, на рис. 8б – поведение оценочной функции F в зависимости от номера расчета по методике УП. Оптимальная толщина СМД составила 0,579479 см ($R^*=10,5280521$), минимальное значение оценочной функции $F=0,001613268$. Таким образом, задача оптимизации ширины слоя мгновенной детонации по экспериментальным данным движения границ оболочки решена с хорошей точностью.

Заключение

В рамках данной работы приведено описание оптимизационной версии счетной методики УП и продемонстрированы примеры ее использования.

Оптимизационная версия счетной методики УП, безусловно, облегчит проведение методической отработки разрабатываемых газодинамических систем, моделей вещества, путем проведения разнообразных серий оптимизационных расчетов в автоматическом режиме.

Литература

1. Гаврилов Н. Ф., Иванова Г. Г., Селин В. И., Софронов В. Н. Программа УП-ОК для решения одномерных задач механики сплошной среды в одномерном комплексе // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов. 1982. Вып. 3. С. 11–14.

2. Box M. T. New method of constrained optimization and comparison with other methods // The Computer Jornal. 1965.

3. Adams B. M., Dalbey K. R., Eldred M. S., Gay D. M., Swiler L. P. DAKOTA, A Multilevel Parallel Object-Oriented Framework for Design Optimization, Parameter Estimation, Uncertainty Quantification, and Sensitivity Analysis. Version 6.6 User's Manual. [Electronic resource] Mode of access: http://www.cs.sandia.gov/ Dakota.

4. Десятникова М. А., Игнатова О. Н., Раевский В. А. Динамическая модель откольного разрушения в жидкостях и твердых телах // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Теоретическая и прикладная физика. 2016. Вып. 4. С. 46–54.

5. Breed B. R., Mader C. L., Venable D. Technique for the determination of dynamic-tensile-strength characteristics // Journal of Applied Physics. 1967. Vol. 38, N 8. P. 3271–3279.

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ПОДВИЖНОСТИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В КРЕМНИЕВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУРАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПРОНИКАЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

И. Ю. Забавичев, К. А. Насеткин, А. А. Потехин, А. С. Пузанов

Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю. Е. Седакова», г. Нижний Новгород

Введение

Известно, что дефектообразование приводит к изменению электрофизических параметров полупроводниковых материалов под действием проникающих излучений, в частности, потоков мгновенных нейтронов спектра деления. Нейтроны при упругом взаимодействии с атомами вещества выбивают их из узлов кристаллической решетки, что приводит к образованию разупорядоченных областей, называемых кластерами радиационных дефектов (КРД), которые являются эффективными центрами рассеяния основных носителей заряда в полупроводниковых структурах. На макроскопическом уровне это приводит к снижению подвижности, численные значения которой в зависимости от флюенса нейтронов широко представлены в литературе, например, в монографии [1]. В свою очередь КРД можно рассматривать как совокупность субкластеров радиационных дефектов (СКРД) произвольной формы и размеров, расположенных на разных расстояниях друг от друга.

Уменьшение размеров полупроводниковых структур приводит к усилению эффектов, связанных с «горячими» носителями заряда, подвижность которых значительно превышает равновесное значение, в условиях квазибаллистического переноса [2]. В этом случае носители заряда рассеиваются не на КРД в целом, а на отдельных СКРД. В этих условиях значительную роль начинает играть форма потенциала отдельных СКРД из состава КРД.

Экспериментально процесс формирования разупорядоченной области радиационных дефектов на начальной стадии еще не изучен [3], хотя предложены оригинальные способы для решения данной задачи на основе анализа спектра излучения в терагерцовом диапазоне частот [4] или при помощи фемтосекундной съемки в режиме реального времени [5]. Таким образом, единственной возможностью анализа данного процесса является теоретическое моделирование образования кластера радиационных дефектов и представляет значительный интерес для построения математических моделей реакции приборов микро- и наноэлектроники на радиационное воздействие. В настоящее время существует широкий спектр методов моделирования развития каскадов атомных столкновений в веществе [3], которые можно разделить на 4 класса: квантово-механические методы «из первых принципов», методы классической молекулярной динамики [6], методы парных взаимодействий (алгоритмы Монте-Карло) и континуальные методы, основанные на законах тепломассопереноса в сплошной среде. Однако необходима разработка методики анализа пространственного распределения субкластеров радиационных дефектов, позволяющей оценивать средние размеры и расстояния между субкластерами. Точная оценка данных параметров позволит корректно моделировать изменение подвижности носителей заряда в субмикронных полупроводниковых структурах после радиационного воздействия.

Математическая модель

Предлагаемый в данной работе метод исследования структуры КРД включает в себя моделирование процесса образования дефектов с последующим анализом пространственного распределения радиационных дефектов внутри кластеров, образованных при воздействии потока нейтронов. Общий алгоритм анализа топологии дефектов отображен в блок-схеме на рис. 1.

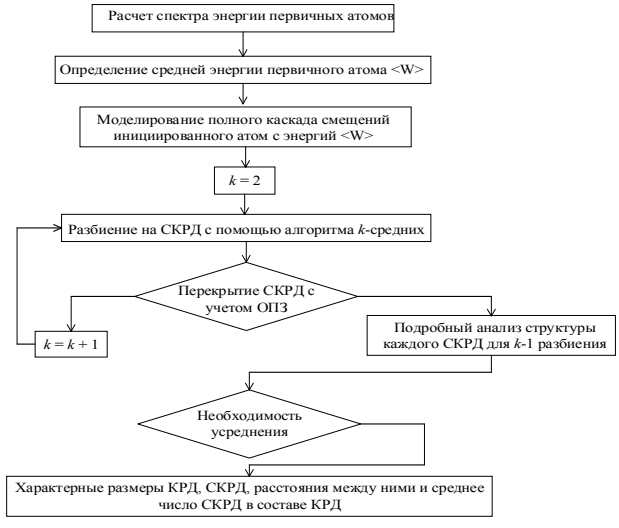


Рис. 1. Блок-схема алгоритма анализа топологии кластера радиационных дефектов

Спектр мгновенных нейтронов спектра деления является непрерывным и простирается от единиц килоэлектронвольт до 18 МэВ со средней энергией около 2 МэВ. На основании экспериментальных измерений Кранбергом [7] была предложена следующая формула, описывающая спектр мгновенных нейтронов деления:

$$\phi(E_n) = 0{,}453 \cdot \left[sh\left(2{,}29E_n\right)^{0{,}5} \right] \exp\left(\frac{-E_n}{0{,}965} \right) \quad (1)$$

Расчет спектра энергии первичных атомов отдачи проводится в приближении упругого взаимодействия быстрого нейтрона с веществом. В этом случае частица передает часть энергии кинетической энергии ядру атома, в результате чего ядро смещается из равновесного положения, увлекая за собой электронную оболочку атома. Однако, в случае, если скорость атома окажется больше скорости орбитальных электронов, может произойти его ионизация. Спектр энергий ядер отдачи зависит от углового распределения рассеиваемых нейтронов. На основании законов сохранения энергии и момента количества движения (модель твердых шаров) кинетическая энергия T_A, передаваемая ядрам атомов, определяется следующим выражением [8]:

$$T_A = \frac{4M_nM_A}{\left(M_n + M_A\right)^2} T_n \sin^2\left(\frac{\vartheta}{2}\right) = \frac{4A}{\left(1+A\right)^2} T_n \sin^2\left(\frac{\vartheta}{2}\right) \quad (2)$$

где M_n и M_A – массы нейтрона и атома вещества, T_n – кинетическая энергия налетающего нетрона, ϑ – угол отдачи между направлением движения нейтрона до и после столкновения, A – атомный вес.

При лобовом столкновении ($\vartheta = 180^\circ$) происходит передача максимальной энергии $T_{A\max}$.

$$T_{A\max} = \frac{4M_nM_A}{\left(M_n + M_A\right)^2} T_n = \frac{4A}{\left(1+A\right)^2} T_n \quad (3)$$

При изотропном рассеянии нейтронов все значения энергий отдачи от 0 до $T_{A\max}$ равновероятны. Тогда средняя энергия, передаваемая нейтроном атомам вещества при столкновении

$$< T_A >= \frac{T_{A\max}}{2} \quad (4)$$

Так, при средней энергии быстрых нейтронов порядка T_n = 2 МэВ, что имеет место при облучении в стационарном атомном реакторе, для кремния ($A = 28$) будем иметь $T_A = 268$ кэВ, для GaAs ($A \approx 72$) – 110 кэВ. На рис. 2 представлены энергетические спектры первичных атомов в Ge и Si, образованных потоком мгновенных нейтронов спектра деления, который описывается выражением (1).

Моделирование образования каскада атомных смещений, инициированного первичным атомом отдачи, проводилось в приближении парного взаимодействия с помощью программы TRIM [9]. Результатом работы программы является массив, содержащий информацию о пространственных координатах

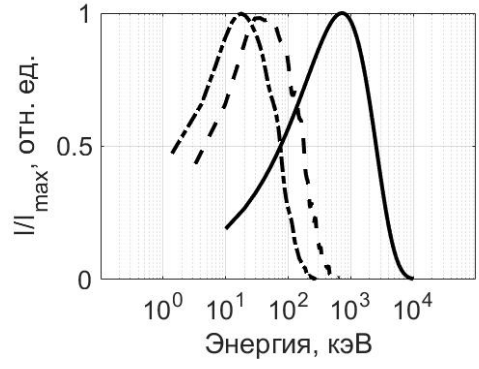


Рис. 2. Энергетические спектры первичных атомов Ge (–*–) и Si (– – –), образованных воздействием потока мгновенных нейтронов спектра деления (——)

точечных дефектов, сгенерированных вдоль трека прохождения первичного атома. К полученному массиву данных применяется алгоритм кластеризации k-средних [10], с помощью которого кластер радиационных дефектов разбивается на k субкластеров. Затем полученное распределение оценивается на предмет пересечений с учетом размеров области пространственного заряда, которая окружает каждый субкаскад. Если отдельные субкаскады не перекрываются, то процесс повторяется для большего значения k. Данная процедура повторяется до тех пор, пока выше указанное условие не перестает выполняться. В этом случае для $k-1$ разбиения оценивается детальная информация о пространственном распределении субкластеров: их общее число в одном каскаде, геометрические размеры и расстояния между ними. Эти параметры оцениваются для каждой отдельной реализации кластера радиационных дефектов с последующим усреднением по всем реализациям. Полученные таким образом информация необходима для моделирования транспорта носителей заряда, в том числе, с учетом вариации размеров и концентрации рассеивающих областей.

Стандартным методом решения кинетического уравнения Больцмана является непрямой метод, основанный на процедуре статистических испытаний (метод Монте-Карло). Метод позволяет учесть все особенности взаимодействия электронного газа с кристаллической решеткой полупроводникового материала: особенности дисперсионной картины (многодолинность, непараболичность долин), все механизмы рассеяния носителей заряда для широкого интервала значений напряженности электрического поля и энергий частиц. Учет радиационного воздействия в данном методе моделирования происходит через дополнительный механизм рассеяния на

заряженных скоплениях точечных дефектов. Для расчета частоты рассеяния на кластерах радиационных дефектов, учитывающий форму потенциала рассеяния, заключается в следующем.

Дифференциальное сечение рассеяния $\sigma(E,\theta)$ в приближении независимых рассеивающих центров [11] описывается следующим выражением:

$$\sigma(W,\theta)=\left|f(W,\theta)\right|^2,$$

$$f(W,\theta)=\frac{2qm^*}{\hbar^2}\int_0^{\infty}\frac{\sin(Kr)}{Kr}r^2V(r)dr, \qquad (5)$$

$$K=\frac{4m^*W}{\hbar^2}\sin\left(\frac{\theta}{2}\right),$$

где $f(E,\theta)$ – амплитуда рассеяния, W – энергия электрона, θ – угол рассеяния, m^* – эффективная масса электрона, $\hbar$ – постоянная Планка, r – расстояние от рассеивающего центра до носителя заряда, q – заряд электрона $V(r)$ – потенциал рассеяния.

Для дальнейших преобразований предположим, что функция $V(r)$ является сферически симметричной. Тогда полное сечение рассеяния определяется после интегрирования во всем диапазоне возможных углов рассеяния как:

$$\sigma(W)=2\pi\int_0^{2\pi}\sigma(W,\theta)\sin(\theta)d\theta. \qquad (6)$$

Тогда частота рассеяния $\lambda(W)$ в зависимости от энергии электрона рассчитывается по следующей формуле:

$$\lambda(W)=\sigma(W)N_{dr}v_e. \qquad (7)$$

где N_{dr} – концентрация рассеивающих центров, v_e – скорость электрона.

В итоге, выбрав для расчетов функциональную зависимость потенциала рассеяния от расстояния и используя изложенный выше алгоритм, можно оценить деградацию подвижности носителей заряда под действием потока нейтронов. В данной работе были рассчитаны частоты рассеяния для потенциалов рассеяния жесткой сердцевины и потенциала из оригинальной работы Флеминга [12].

Потенциал жесткой сердцевины имеет следующий вид

$$V(r)=\begin{cases}\infty, r<a\\ 0, r>a\end{cases} \qquad (8)$$

где a – радиус сферы бесконечного потенциала. Использование для вычислений потенциала жесткой сердцевины позволяет существенно облегчить расчеты, так как в объемном полупроводнике носители заряда имеют максвеловское распределение по энергии, то есть большинство обладают энергией $\sim\frac{3}{2}k_BT$. В том случае СКРД можно представить как абсолютно непрозрачный рассеивающий центр.

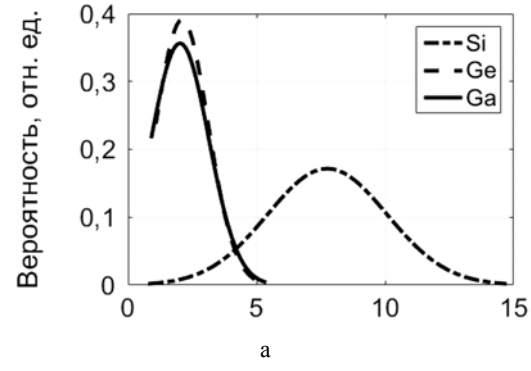
Потенциал Флеминга имеет следующий вид:

$$V(r)=\begin{cases}-\frac{eN_dr_2^2}{3\chi\chi_0}\left(\frac{r_1}{r}+\frac{r_2r^2}{2r_1^3}-\frac{3}{2}\left(1-\frac{r_2}{r_1}-\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2\right)\right), & r<r_1\\ -\frac{eN_dr_2^2}{3\chi\chi_0}\left(\frac{r_2}{r}+\frac{r^2}{2r_2^2}-\frac{3}{2}\right), & r_1<r<r_2\\ 0, & r>r_2\end{cases} \qquad (9)$$

где r_1 – размер отрицательно заряженной области, r_2 – размер области пространственного заряда, N_d – концентрация донорной примеси, χ – диэлектрическая проницаемость среды, χ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума. Использование при расчетах потенциала Флеминга позволяет учесть структуру СКРД, который состоит из отрицательно заряженного ядра, содержащего малоподвижные дивакансии, и окружающей его области пространственного заряда, образованной ионизированной примесью.

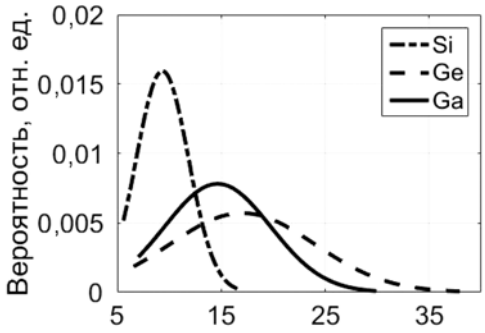
Результаты расчетов

Предложенный алгоритм анализа пространственного распределения субкластеров использовался для исследования характеристик разупорядоченных областей в Si, Ge и GaAs [13]. Среднее число субкластеров в одном кластере (рис. 3а), их размеры (рис. 3б) и расстояния между ними (рис. 3в) в Si, Ge и GaAs при энергиях первичных атомов, соответствующих облучению нейтронами с энергией 2 МэВ представлены на рис. 3.

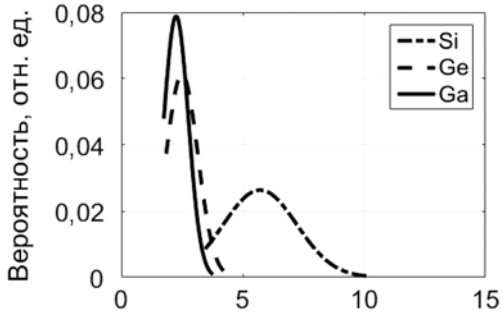


а

Рис. 3. Параметры разупорядоченных областей при энергиях первичных атомов, соответствующих облучению нейтронами с энергией 2 МэВ: в Si(– – –), Ge (–*–),GaAs (——); а – среднее число субкластеров в одном кластере, б – их размеры, в – расстояния между ними



б



в

Рис. 3. (Окончание)

Первичный атом Ge и Ga образуют преимущественно плотные каскады атомных смещений, которые не распадаются на отдельные субкластеры, о чем свидетельствуют большие значения размера субкластеров и маленькое среднее расстояние между ними. Согласно полученным теоретическим оценкам, средние размеры ядра субкластера для Si, Ge и GaAs составляют 9, 14 и 17 нм соответственно. Для объемного кремния (удельное сопротивление $\rho_0 = 3$ Ом·см$^{-1}$) были проведены расчеты частот рассеяния на заряженных кластерах радиационных дефектов для различных моделей потенциала рассеяния с последующим анализом изменения подвижности носителей заряда после радиационного воздействия. Результаты расчета с использованием потенциала рассеяния жесткой сердцевины, Флеминга, а также литературные данные по изменению подвижности носителей заряда в кремнии при облучении быстрыми нейтронами с разной величиной потока частиц [1] представлены на рис. 4.

Из зависимостей, представленных на рис. 4, следует, что оба потенциала качественно одинаково описывают изменение подвижности при радиационном воздействии, несмотря на кардинальные различия между рассматриваемыми потенциалами. Это связано с тем, что в объемном полупроводниковом материале носители заряда подчиняются максвелоскому распределению по энергии, при котором большинство носителей заряда имеют сравнительно маленькую энергию. В этом случае при усреднении

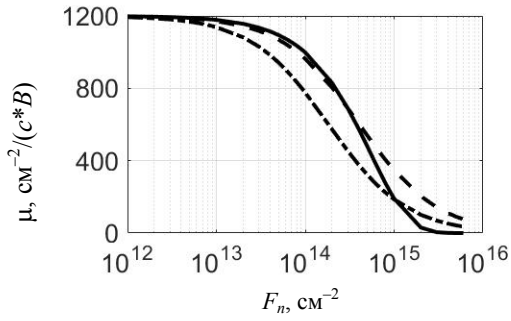


Рис. 4. Изменение подвижности в кремнии после радиационного воздействия: —— – литературные данные [1], – – – – результаты моделирования с помощью потенциала жесткой сердцевины, —— – результаты моделирования с помощью потенциала из работы [12]

влияние внутренней структуры СКРД становится незначительным, так как для подавляющего большинства носителей заряда он представляет собой абсолютно непрозрачную область. Однако использование потенциала жесткой сердцевины для расчета частот рассеяния на субкластерах радиационных дефектов все же позволяет добиться лучшего согласования с экспериментальными данными. Расхождение в области большого потока частиц (10^{15}–10^{16} см$^{-2}$) объясняется тем, что при таких значениях флюенса нейтронов происходит перекрытие отдельных кластеров радиационных дефектов, что приводит к более резкому уменьшению подвижности носителей заряда в материале.

Заключение

При оценке деградации подвижности в слоях полупроводникового материала, где транспорт в основном описывается динамикой «горячих» носителей заряда, вид функции потенциала рассеяния может играть существенную роль. Поэтому для большей достоверности дальнейших расчетов необходимо использовать потенциал, полученный с помощью численного решения уравнения Пуассона для разупорядоченной области полупроводникового материала.

Литература

1. Ладыгин Е. А. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники. М.: Советское радио, 1980.

2. Забавичев И. Ю., Потехин А. А., Пузанов А. С., Оболенский С. В., Козлов В. А. Деградация характеристик биполярных транзисторов на основе GaAs с тонкой базой при возникновении в них нанометровых кластеров радиационных дефектов под действием нейтронного облучения // Физика и техника полупроводников, 2017. Т. 51, № 11. С. 1520–1524.

3. Калин Б. А. Физическое материаловедение. Том 4. Физические основы прочности. Радиационная

физика твердого тела. Компьютерное моделирование. М.: МИФИ, 2008.

4. Пузанов А. С., Оболенский С. В., Козлов В. А., Волкова Е. В., Павельев Д. Г. Высокочастотное детектирование процессов формирования и стабилизации кластера радиационных дефектов в полупроводниковых структурах // Физика и техника полупроводников. 2015. Т. 49, № 12. С. 1585–1592.

5. Liang J., Zhu L., Wang L.V. Single-shot real-time femtosecond imaging of temporal focusing // Light: Science & Applications. 2018. Vol. 7, N 42. P. 1–10.

6. Забавичев И. Ю., Потехин А. А., Пузанов А. С., Оболенский С. В., Козлов В. А. Моделирование образования каскада смещений и переходных ионизационных процессов в кремниевых полупроводниковых структурах при нейтронном воздействии // Физика и техника полупроводников. 2019. Т. 53, № 9. С. 1279–1284.

7. Крамер-Агеев Е. А. Экспериментальные методы нейтронных исследований. М.: Энергоиздат, 1990.

8. Вавилов В. С. Действие излучений на полупроводники. М.: Физматгиз, 1963.

9. Ziegler J. F., Biersak J. P., Littmark U. Thestopping and range of ions in solids. Pergamon, N.Y., 1996.

10. Steinhaus H. (1956). Sur la division des corps materielsen parties. Bull. Acad. Polon. Sci., C1. III Vol. IV. P. 801–804.

11. Зеегер К. Физика полупроводников. М.: Мир, 1977.

12. Fleming R. M., Seager C. H., Lang D. V., Cooper P. J., Bielejec E. and Campbell J. M.Effects of defect clustering in neutron irradiated silicon // Journal of Applied Physics. 2007. Vol. 401. P. 491–494.

13. Забавичев И. Ю., Оболенская Е. С., Потехин А. А., Пузанов А. С., Оболенский С. В., Козлов В. А. Транспорт горячих носителей заряда в Si, GaAs, InGaAs и GaN субмикронных полупроводниковых структурах с нанометровыми кластерами радиационных дефектов// Физика и техника полупроводников. 2017. Т. 51, № 11. С. 1489–1492.

АЛГОРИТМЫ ГЕОМЕТРИЧЕСКО-ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ НЕСТРУКТУРИРОВАННОЙ СЕТКИ ДЛЯ СЛУЧАЯ РАСПРЕДЕЛЕННОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДАННЫХ, РЕАЛИЗОВАННЫЕ В МЕТОДИКЕ ТИМ

Ю. Н. Кащеев, И. Г. Новиков, А. А. Пушкарёв

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В докладе приводится описание алгоритмов геометрическо-топологической декомпозиции, реализованных в методике ТИМ [1], с использованием графа на основе распределенного представления математических областей. В методике ТИМ счет ведется в многообластном приближении, каждая деталь конструкции – отдельная математическая область. Чтение информации о математической области производится в память одного вычислительного узла. В связи с этим встает вопрос о максимально возможном размере математической области. Представление математической области в распределенном между всеми процессами виде снимает ограничение на объем оперативной памяти вычислительного устройства при чтении информации и позволяет использовать сетки порядка нескольких сотен миллионов ячеек в одной математической области.

Алгоритм распределенной геометрическо-топологической декомпозиции состоит из двух этапов: геометрического и топологического. На первом этапе отбираются все ячейки, центры которых находятся в пределах ограничивающей сферы. На втором этапе выполняется проверка топологической связности списка ячеек.

Представление информации о математических областях

Чтение из файла информации о математических областях в методике ТИМ является двухпроходным. При первом проходе управляющим MPI-процессом зачитывается минимальная информация о математической области, необходимая для выполнения декомпозиции. Этот этап называется чтение «минимальной математической области», при котором зачитывается топология и координаты узлов сетки, необходимой для геометрическо-топологической декомпозиции. После декомпозиции, на основе этой полученной информации выполняется формирование параобластей. Далее выполняется второй проход чтения, когда управляющий процесс математической области зачитывает счетные величины и осуществляется их распределение в соответствующие параобласти. Такой подход позволил проводить трехмерные расчеты до 100 млн. ячеек в одной математической области. При зачитывании данных из математических областей, число ячеек в которых превышает 100 млн. ячеек, происходило переполнение памяти, доступной на одном вычислительном узле. Для снятия ограничений на количество ячеек в математической области необходимо проводить чтение информации в распределенном между MPI-процессами режиме. Для этого были разработаны алгоритмы чтения файла-разреза на всех этапах в полностью распределенном виде. В этом случае чтение данных математических областей осуществляется не одним, а всеми MPI-процессами. Распределение между MPI-процессами делается по номерам элементов сетки. При этом весь набор элементов сетки распределяется между выделенными MPI-процессами. Для равномерного использования оперативной памяти процессов, количество элементов сетки между ними распределяется максимально равномерно. Например, если математическая область состоит из 100 ячеек и в ее расчете участвуют 5 процессов в рамках одинаковых по производительности вычислительных устройств, то распределение ячеек между ними будет следующим:

- на нулевом с 1 по 20;
- на первом с 21 по 40;
- на втором с 41 по 60;
- на нулевом с 61 по 80;
- на нулевом с 81 по 100.

Данный подход позволяет полностью снять ограничение на количество ячеек в одной математической области, связанное с нехваткой оперативной памяти на узлах.

Однако, существуют и недостаток, в виде увеличения времени поиска информации о топологическом соседстве элементов сетки, по причине выполнения дополнительных MPI-обменов.

Геометрическо-топологическая декомпозиция

Геометрическо-топологическая декомпозиция основана на топологическом соседстве ячеек между собой. Помимо соседства ячеек сетки используется еще и геометрический критерий, ограничивающий попадание ячеек в параобласть при их наборе. При построении декомпозиции геометрическо-топологическим алгоритмом гарантирована односвязанность параобластей, относительная гладкость границ.

Декомпозиция области проводится с учетом топологического соседства ячеек с использованием координат центров ячеек и координат узлов сетки таким образом, чтобы число ячеек в каждой параоб-

ласти было примерно одинаковым, либо сбалансированным по вычислительной нагрузке.

Алгоритм разбиения области на параобласти строится следующим образом. Зная количество ячеек сетки N, можно получить количество ячеек *NPar* в каждой параобласти $p = 1, nP$:

$NPar(p) = \frac{N}{nP} + 1$, для первых m параобластей, где m – остаток деления $\frac{N}{nP}$, nP – итоговое количество параобластей, $NPar(p) = \frac{N}{nP}$, для остальных $nP - m$ параобластей.

Определяются Xmin и Xmax, Ymin и Ymax, Zmin и Zmax, – глобальные максимумы и минимумы координат узлов исходной области. Находится ближайший к вершине параллелепипеда узел области {Xmin, Ymax, Zmax}. Этот узел становится начальным (опорным) в разбиении.

Затем определяется стартовая ячейка, одной из вершин которой является начальный (опорный) узел, и ее центр r_0. Для этой ячейки определяется максимальная диагональ (расстояние между самыми удаленными друг от друга вершинами ячейки). Вычисляется некоторый максимальный параметр ΔR, с которым будет увеличиваться радиус сферы, в пределах которого будут набираться ячейки в параобласть итерационно. Этот параметр выбран эмпирически и составляет четыре-пять максимальных диагоналей стартовой ячейки. После чего, по топологическому соседству ячеек, начиная от стартовой ячейки, производится набор ячеек-претендентов в параобласть, которые попадают в сферу радиуса $R = \Delta R \cdot i : \left|\vec{r}_k - \vec{r}_0\right| < R$, где $\vec{r}_k$ – центр k-той ячейки-претендента, $i = 1,...$ – номер итерации увеличения радиуса при наборе параобласти.

Если центр ячейки находится в пределах заданной сферы, то ячейке k ставится признак принадлежности к параобласти p. И счетчик количества ячеек K увеличивается на единицу. Если больше нет ячеек, попадающих в сферу радиуса R, а количество ячеек $K < NPar(p)$, тогда переходим к следующей итерации по увеличению радиуса сферы: $i = i + 1$. Количество итераций по увеличению радиуса ограничено пятью пустыми итерациями подряд для экономии времени. Под пустой итерацией понимается итерация, на которой не произошло добавление ячеек в рассматриваемую параобласть.

Завершается набор ячеек в параобласть p тогда, когда будет выполнено условие $K \geq NPar(p)$ или выполнены все итерации по увеличению радиуса.

Данный подход к разбиению области на параобласти не обладает недостатками чисто геометрического подхода и является наиболее подходящим для декомпозиции данных по процессам в методике ТИМ.

После завершения построения очередного компакта формируются его граничные признаки, а также определяются угловые ячейки между компактами. Из списка угловых ячеек выбирается первая, среди соседей которой есть ячейка, не входящая ни в один компакт. Данная ячейка будет стартовой (опорной) при построении нового компакта.

Алгоритм построения компактов будет выполняться до тех пор, пока всем ячейкам математической области не будет выставлен признак принадлежности компактам.

Из-за разномасштабности формы ячеек и сильного отличия их «весов» количество сформированных компактов может быть больше запланированного. Для приведения количества компактов к запланированному значению, выполняется операция объединения компактов. Для этого компакты перенумеровываются в порядке возрастания «весов», и для компакта с наименьшим «весом» ищется соседний наименьший компакт. После чего эти компакты объединяются в один. Операция объединения выполняется до тех пор, пока количество компактов не будет приведено к изначальному разбиению.

Операция объединения допускает возможность появления компактов, «веса» которых значительно превышают допустимый «вес». Это приведет к разбалансировке по вычислительной нагрузке. Если дисбаланс составляет более 10 %, в этом случае выбирается другая угловая ячейка математической области и выполняется повторное формирование компактов. Итерации по выбору наиболее оптимальной декомпозиции выполняются до тех пор, пока разбалансированность между компактами не составит менее 10 %. Количество итераций ограничено количеством угловых ячеек математической области. В случае если все итерации построения декомпозиции завершились, то для получения итоговой декомпозиции выбирается угловая ячейка, при которой разбалансированность вычислительной нагрузки минимальна.

На рис. 1 продемонстрирован результат работы геометрическо-топологической декомпозиции в двумерном случае.

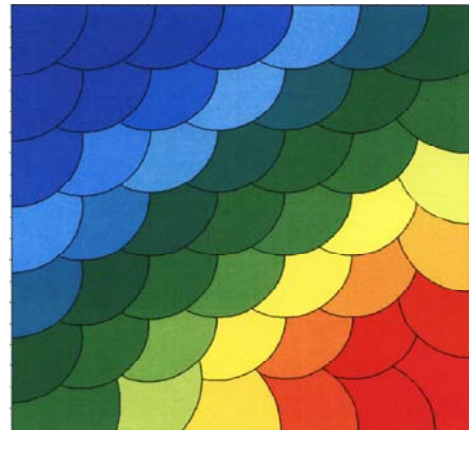


Рис. 1. Результат работы геометрическо-топологической декомпозиции

Геометрическо-топологическая декомпозиция в распределенном виде

В случае распределенного представления математических областей, каждый MPI-процесс хранит информацию только о диапазоне номеров элементов сетки. В методике ТИМ в качестве формата хранения топологии сетки используется формат по граням, который имеет следующий вид:

– для ячейки хранится неупорядоченный список всех ее граней;

– для грани хранятся номера двух формирующих эту грань ячеек; для грани, которая лежит вдоль границы, первым номером является номер граничного условия. Также для грани хранится список узлов ее формирующих, причем со стороны первой, формирующей грань ячейки узлы упорядочены против часовой стрелки, а со стороны второй – по часовой стрелке (рис. 2);

– для узла хранится номер одной из граней, сходящихся в данном узле. Для граничного узла хранится номер одной из граничных граней.

Связь между элементами сетки можно представить следующим образом:

ячейка ↔ грани → узлы → грань.

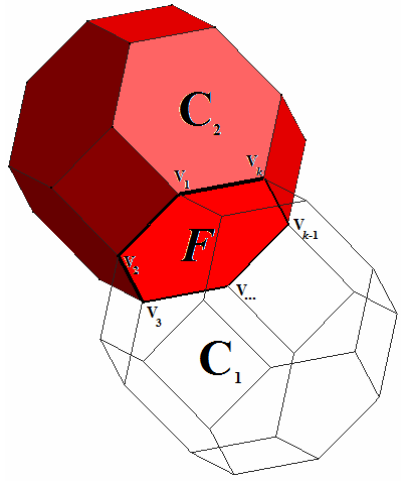


Рис. 2. Обход узлов грани относительно формирующих ее ячеек

Таким образом, получение соседних ячеек для данной ячейки идет через топологию граней и необходим MPI – обмен между процессами, так как информация о гранях может храниться на других процессах.

В алгоритмах геометрическо-топологической декомпозиции одной из наиболее часто используемых операций является поиск соседних ячеек для ячейки. Получение этой информации выполняется из распределенного графа.

Граф устроен следующим образом: вершины графа соответствуют ячейкам сетки, а ребра – соседству между ячейками. Учитывается только соседство через грань (в двумерном случае – ребро) и граничные условия.

Одно из главных отличий в работе блока декомпозиции для распределенного случая от блока декомпозиции нераспределенного случая – использование всех процессов задачи для каждой математической области. Если для нераспределенного случая декомпозиция выполнялась на управляющем процессе математической области, то для распределенного случая участвуют все процессы задачи.

На первом этапе алгоритма распределенной геометрическо-топологической декомпозиции выполняется первоначальное разбиение математической области на компакты «по весам». Каждый MPI-процесс из своего диапазона элементов вычисляет глобальные максимумы и минимумы математической области (XMin и XMax, YMin и YMax, ZMin и ZMax). Далее формируется единый список угловых ячеек математической области. В качестве стартовой ячейки, от которой начнется формирование первого компакта, выбирается угловая ячейка, центр которой максимально близок к точке с координатами {XMin, YMax, ZMax}. Список угловых ячеек формируется следующим образом: сначала каждый MPI-процесс формирует его локально из диапазона принадлежащих ему ячеек, затем локальные списки отсылаются на управляющий MPI-процесс математической области, на котором формируется единый список угловых ячеек области. Управляющий процесс математической области рассылает этот список остальным процессам с помощью функции широковещания. После чего на каждом процессе определяется стартовая ячейка.

Алгоритм распределенной геометрическо-топологической декомпозиции является итерационным, т. е. формирование компакта происходит в несколько итераций, пока не достигнет необходимого «веса». Отбор ячеек в компакт осуществляется в рамках сферы с заранее определенным радиусом, значение которого увеличивается при каждой итерации. Однако необходимо отметить, что время выполнения декомпозиции данных математической области зависит от количества выполненных итераций, поэтому желательно определить такой радиус, при котором будет выполнено минимальное количество итераций. В данной работе значение радиуса сферы определяется по формуле 1, которая подобрана эмпирически:

$$r = \frac{L}{\sqrt{nP}} \quad (1),$$

где L – расстояние между точками, с координатами {XMax, YMax, ZMax} и {XMix, YMin, ZMin}, а nP – количество исходных компактов.

Опишем работу алгоритма. Вначале каждый процесс «проходит» по своему диапазону элементов и отбирает среди них не промаркированные (не принадлежащие ни одному компакту) ячейки, которые находятся в пределах радиуса определяемой сферы (геометрический этап). После формирования локального списка ячеек-претендентов в набираемый компакт, каждый процесс отсылает его на управляющий процесс математической области, на котором и про-

исходит формирование общего списка ячеек-претендентов. После сбора локальных списков в единый список, при первой итерации в него добавляется стартовая ячейка (при последующих итерациях, кроме стартовой ячейки добавляются и все промаркированные ячейки текущего компакта). Общий список в дальнейшем будет использоваться всеми процессами, участвующими в декомпозиции данных математической области, для этого применяется функция библиотеки MPI. Для исключения возможности набора несвязных компактов, выполняется топологический этап, который заключается в отборе не промаркированных ячеек, имеющих единую группу связности со стартовой ячейкой. Формирование списка групп связности для ячеек-претендентов выполняется на управляющем процессе, который рассылается всем, участвующим в декомпозиции области MPI-процессам. Затем, при помощи алгоритма быстрого поиска, ищется в общем списке стартовая (исходная) ячейка компакта и определяется ее группа связности. Каждый MPI-процесс отбирает из общего списка ячеек-претендентов те ячейки, которые принадлежат его диапазону, а также находятся в одной группе связности со стартовой ячейкой. Для отобранных ячеек на каждом MPI-процессе формируются два дополнительных массива. В первом хранится расстояние от центра стартовой ячейки компакта до центра каждой ячейки. Во втором – «вес» каждой ячейки. После формирования необходимых массивов, на управляющем процессе математической области выполняется сравнение суммы «весов» отобранных связных ячеек с теоретическим «весом» компакта. В случае, если сумма «весов» ячеек не превышает заданный «вес» компакта или это превышение незначительно, в пределах допустимого отклонения, не промаркированные ячейки добавляются в компакт. Если «вес» формируемого компакта меньше его допустимого «веса», то выполняется следующая итерация, с последовательностью действий, описанных выше. При каждой новой итерации радиус сферы, в пределах которой строится компакт, увеличивается в 1,5 раза.

Когда сумма «весов» отобранных по связности ячеек превышает допустимый предельный «вес» компакта, выполняется сортировка этих ячеек в порядке увеличения расстояния от их центров до центра стартовой ячейки. Из отсортированного списка ячеек отбираются ячейки, сумма «весов» которых удовлетворяет предельному «весу» формируемого компакта. После чего выполняется проверка топологической связности.

Алгоритм поиска групп связности

Одним из важнейших этапов в работе распределенной декомпозиции является поиск групп связности для распределенного списка ячеек. Так как на практике размерность списка ячеек, для которого необходимо найти связные группы, не очень большая относительно общего числа ячеек (не более десяти миллионов в задачах с общим числом в математической области порядка нескольких сотен миллионов ячеек), то используется следующий подход. Сначала по распределенному графу области строится на управляющем процессе нераспределенный граф, в котором участвуют только ячейки из заданного списка. Далее, для построенного графа, выполняется алгоритм Сомана [2] поиска связных компонент графа.

Алгоритм основан на распространении меток по соседям и в общем виде описывается следующим образом. На первом этапе всем вершинам графа проставляется метка, равная номеру данной вершины. Далее, итерационно, для каждой вершины ставится метка, равная наименьшей метке из соседей данной вершины или самой этой вершины. Таким образом, через определенное количество итераций, граф разобьется по меткам на один или несколько звездообразных подграфов, форма которого представлена на рис. 3. Количество таких графов и есть число групп связности.

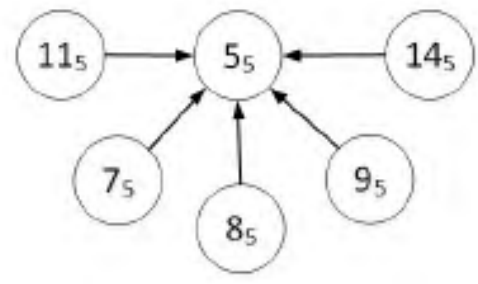


Рис. 3. Форма связной компоненты графа

В алгоритме Сомана используются итерации двух видов: по ребрам и узлам. Узлы ребра должны принадлежать одной связной компоненте. Поэтому в цикле по ребрам проверяется, одинаковые ли метки имеют узлы ребра. Если метки разные, то для узла с большей меткой ставится меньшая метка. После работы цикла по ребрам получается картина, изображенная на рис. 4.

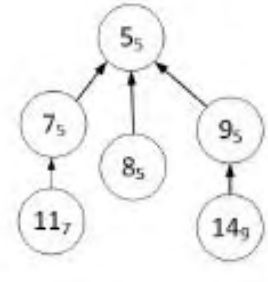


Рис. 4. Граф, получающийся после работы цикла по ребрам

Далее, в цикле по узлам для каждого узла рекурсивно вычисляется его метка по правилу $\mathrm{Label}(u) = \mathrm{Label}(\mathrm{Label}(u))$. После этого граф примет вид, изображенный на рис. 3 и будет состоять из отдельных подграфов, являющихся связными компонентами.

Алгоритм построения нераспределенного графа из распределенного и алгоритм Сомана поиска групп связности графа распараллелены на общей памяти с применением интерфейса OpenMP.

Сортировка

В процессе работы алгоритмов геометрическо-топологической декомпозиции достаточно часто используется операция поиска элемента в массиве. Для использования быстрого поиска необходимо, чтобы список был отсортирован. Ранее в методике ТИМ использовалась быстрая сортировка с выбором центрального элемента. Для ускорения выполнения процедуры сортировки была проведена ее модификация, заключающаяся в следующем:

- ✓ При малом числе элементов использование сортировки вставками;
- ✓ изменение алгоритма для выбора сравниваемого значения;
- ✓ OpenMP-распараллеливание с использованием механизма подзадач.

Хотя число операций быстрой сортировки составляет в общем случае $O(n\log n)$, а для сортировки вставками оно составляет $O(n^2)$, на практике для массивов малой размерности выгоднее использовать именно сортировку вставками из-за меньшей константы при множителе порядка. Поэтому на последних уровнях рекурсии, когда число элементов в сортируемом массиве не превышает 20, используется сортировка вставками.

Для более равномерного разбиения массива на две части с целью уменьшения числа рекурсивных вызовов был модифицирован алгоритм определения значения, с которым сравниваются элементы массива. Был реализован динамический выбор сравниваемого значения, описанный в работе [3]. На первом вызове в качестве сравниваемого значения берется значение последнего элемента, а на всех последующих рекурсивных вызовах подсчитываются четыре числа – количество и сумма элементов, меньших сравниваемого значения, количество и сумма элементов, больших или равных сравниваемому значению: CountLess, SumLess и CountLarger, SumLarger. И в качестве сравниваемого значения для левого массива берется $\frac{\text{SumLess}}{\text{CountLess}}$, а для правого массива $\frac{\text{SumLarger}}{\text{CountLarger}}$. Такая процедура с динамическим выбором сравниваемого значения позволяет последовательно разбивать списки на приблизительно равные по количеству элементов части.

Быстрая сортировка относится к иррегулярным приложениям, для которых не существует на сегодняшний день шаблона распараллеливания с хорошей эффективностью на общей памяти для многоядерных процессоров. Это связано с тем, что в таких приложениях, как правило, отсутствуют простые циклы, которые могут быть легко распараллелены с помощью интерфейса OpenMP. К таким приложениям относятся, например, обработка связанного списка, в котором следующий элемент определяется через указатель в текущем элементе, множество алгоритмов на графах и деревьях, где требуется проход от вершины к дочерним вершинам или листьям. Чаще всего для таких алгоритмов характерен принцип «разделяй и властвуй» («*divide and conquer*»), в котором задача бьется на подзадачи, находятся решения каждой из подзадач и сливаются в одно решение. При этом для подзадач обычно происходит рекурсивный вызов, пока подзадача не окажется простой для ее прямого решения.

В стандарте OpenMP, начиная с версии 3.0, появился механизм для работы с вложенными подзадачами, который позволяет выполнять данные действия параллельно несколькими нитями.

Формат вызова в общем случае такой:

```
!$OMP TASK
 Подзадача 1
!$OMP END TASK
.....
!$OMP TASK
 Подзадача N
!$OMP END TASK
!$OMP TASKWAIT
```

Каждая подзадача, выполняемая одной нитью, заключается между директивами !$OMP TASK и !$OMP END TASK. Если для общего решения задачи необходимо, чтобы все подзадачи были выполнены, добавляется директива синхронизации для подзадач !$OMP TASKWAIT (аналог !$OMP BARRIER для нитей). На примере псевдокода быстрой сортировки покажем принцип работы данного механизма.

```
!$OMP PARALLEL
!$OMP SINGLE
call QuickSort(A, 1, N)
!$OMP END SINGLE
!$OMP END PARALLEL

subroutine QuickSort(1, p, r)
  if (r-p <= 1) then
    return
  else
    q = partition(A, p, r)
  endif
  !$OMP TASK SHARED(A)
  call QuickSort(A,p,q-1)
  !$OMP END TASK
  !$OMP TASK SHARED(A)
  call QuickSort(A,q,r)
  !$OMP END TASK
  !$OMP TASKWAIT
end subroutine QuickSort
```

Алгоритмы сортировки, используемые в геометрическо-топологической декомпозиции, были распараллелены с использованием описанного выше подхода на общей памяти с использованием интерфейса OpenMP.

Примеры декомпозиции

В качестве первого примера выбрана многообластная задача, суммарное число ячеек в которой ~307 млн. Запуск задачи выполнен на 40 вычислительных узлах (в конфигурации 1 MPI × 10 OpenMP). Время выполнения декомпозиции составило 183 сек.

В качестве второго примера выбрана однообластная задача, суммарное число ячеек в которой ~330 млн. Запуск задачи выполнен на 50 вычислительных узлах (в конфигурации 1 MPI × 10 OpenMP). Время выполнения декомпозиции составило 528 сек.

Результаты декомпозиции представлены на рис. 5–6.

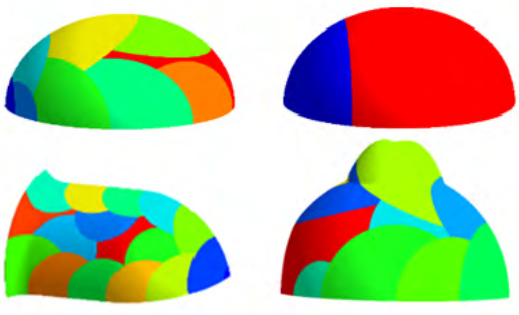


Рис. 5. Декомпозиция многобластной задачи, различные математические области разбиты на компакты

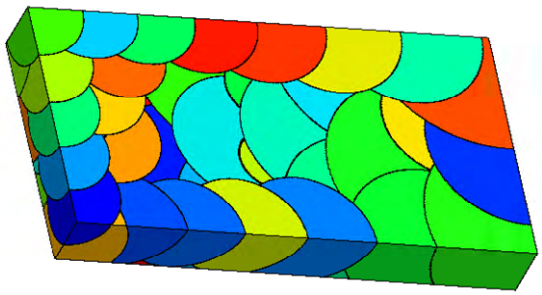


Рис. 6. Декомпозиция однообластной задачи

Заключение

Представленный в данной работе модифицированный геометрическо-топологический алгоритм позволяет выполнять декомпозицию математических областей порядка нескольких сотен миллионов ячеек за приемлемое время в полностью распределенном режиме.

Это позволило, для методики ТИМ, снять ограничение на максимально возможное количество точек в одной математической области, связанное с доступной в рамках одного узла вычислительной системы оперативной памяти. Данные алгоритмы могут быть использованы и для других методик, базирующихся на неструктурированных сетках, где вопросы декомпозиции данных по пространству стоят довольно остро.

Алгоритм распараллелен с использованием функций библиотеки MPI и с использованием интерфейса OpenMP**.**

Литература

1. Соколов С. С., Панов А. И., Воропинов А. А. и др. Методика ТИМ расчета трехмерных задач механики сплошных сред на неструктурированных многогранных лагранжевых сетках // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2005. Вып. 3. С. 37–52.

2. Soman, Kishore and Narayanan. A fast GPU algorithm for graph connectivity, 2010.

3. Abdel latif Abu Dalhoum, Thaer Kobbay, Azzam Sleit, Manuel Alfonseca, Alfonso Ortega. Enhancing QuickSort Algorithm using a Dynamic Pivot Selection Technique // Wulfenia. 2012. Vol. 19, N 10. P. 543–552.

ВАЛИДАЦИЯ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕЧЕНИЙ С НИЗКИМИ ЧИСЛАМИ ПРАНДТЛЯ

О. Л. Крутякова, В. В. Курулин, О. В. Денисова, Н. В. Мелешкин, М. А. Сизова

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородская обл.

Введение

Процесс валидации выявляет границы применимости физико-математических моделей и численных схем, которые позволяют моделировать физическое явление, протекающее в естественных условиях, до проведения численного эксперимента. Достоверность физико-математической модели, предназначенной для описания того или иного процесса, можно определить, оценив уровень вносимой ею погрешности и неопределенности по сравнению с натурным экспериментом или расчетами по прямому численному моделированию. Процедура валидации, состоящая из стадии оценки сходимости итераций, стадии проверки решения на непротиворечивость, стадии сравнения с экспериментом, а также содержащая уровни классов задач представлена в [1, 2].

С точки зрения численного моделирования течений с низкими числами Прандтля основной особенностью является описание турбулентности и учет переноса тепла, вносимого как за счет конвективного перемешивания потока, так и за счет молекулярной теплопроводности самого теплоносителя. Интенсивное изменение температуры жидкости за счет большой теплопроводности может быть на том же уровне что и изменение температуры вследствие турбулентного перемешивания [3, 4]. Этот факт определяет достаточно существенную долю тепла, переносимого за счёт молекулярной теплопроводности, и обеспечивает лучшие теплоотводящие свойства жидких металлов, Вследствие чего встает вопрос правильного разрешения турбулентных характеристик [5–7].

Целью данной работы является формирование валидационного базиса задач течения жидкометаллических теплоносителей (ЖМТ). Для относительной полноты валидационный базис должен включать задачи течения в каналах различной формы, имеющие надежные экспериментальные, либо численные данные. В [8] представлены численные данные, полученные путем прямого численного моделирования, о распределении безразмерной температуры по высоте канала. На данной задаче показано влияние применения корреляций для турбулентного числа Прандтля. Задачи о неравномерном охлаждении и нагревании труб с различного вида ЖМТ, имеющие экспериментальные данные или вычисленные аналитически, носят высокий прикладной характер [9, 10] и в достаточной степени анализируют турбулентный теплообмен в жидкометаллической среде. Представлены результаты численного моделирования эксперимента TEFLU [11], где рассматривается смешение разнотемпературных потоков натрия при различных режимах течения. На задаче перемешивания трех струй натриевого теплоносителя определяются нестационарные характеристики потока, результаты сравниваются с экспериментальными данными [12, 13]. Характерной особенностью атомноэнергетических установок является теплообмен в пучках труб, в расчете эксперимента TEGENA рассматривается распределение температуры вблизи обогреваемых труб, обтекаемых потоком натриевого теплоносителя [14]. Учет закрученности потока был рассмотрен в задаче о гидродинамике и теплообмене в потоке ртутного теплоносителя в кольцевом канале, имеющей экспериментальные данные [15].

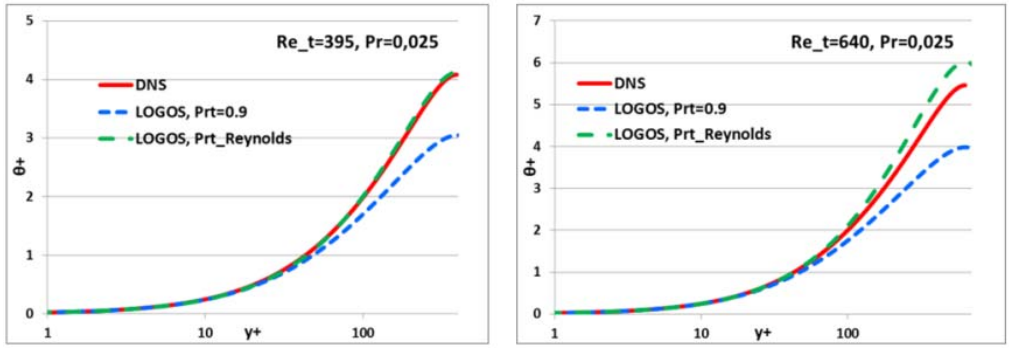
Для решения задач используется пакет программ ЛОГОС [16]. Пакет программ ЛОГОС – отечественный пакет программ инженерного анализа, предназначенный для решения сопряженных трехмерных задач конвективного тепломассопереноса, аэродинамики, гидродинамики и прочности на высокопараллельных ЭВМ.

Описание задач базиса валидации

В данном разделе приводится детальное описание задач базиса валидации и результаты валидации пакета программ ЛОГОС для данного класса задач. Полученное численное решение сравнивается с результатами экспериментальных и теоретических исследований.

Развитое турбулентное течение с теплообменом в канале, ограниченном обогреваемыми параллельными плоскими пластинами

Задача о развитом турбулентном течении вязкой несжимаемой жидкости в канале, образованном двумя бесконечными параллельными плоскими пластинами, дает фундаментальное представление о природе жидкости со свойствами ЖМТ, имеет подробные данные DNS (Direct Numerical Simulation) моделирования [8]. Пластины обогреваются равномерным тепловым потоком и находятся на расстоянии h друг от друга. Число Рейнольдса, рассчитанное по средней динамической скорости $U\tau$ и полувысоте канала, для двух режимов составляет Re_τ = 395и Re_τ = 640, что



а б

Рис. 1. Распределение безразмерной температуры: а – Re_τ = 395, б – Re_τ = 640

соответствует условиям DNS расчетов. В табл. 1 представлены значения источников импульса и энергии, заданные в соответствии с режимом течения.

Таблица 1

Источники импульса и энергии

Режим №	Значение Re_τ	Источник импульса, Па/м	Источник энергии, Вт/м^3
1	395	3,95	40,5
2	640	10,24	25

Существует несколько способов вычисления турбулентного числа Прандтля при расчете течений ЖМТ, включая специализированные модели турбулентности [5]. В расчетах использована корреляция Рейнольдса для вычисления турбулентного числа Прандтля []:

$$\mathrm{Pr}_t = \frac{1+100\cdot Pe^{-0,5}}{1+120\cdot \mathrm{Re}^{-0,5}} \qquad (1)$$

На рис. 1 представлены профили безразмерной температуры, полученные из расчетов по пакету программ ЛОГОС для режима № 1 и № 2 с турбулентным числом Прандтля, рассчитанным по корреляции Рейнольдса (1), которое составило Pr_t = 3,145, в сравнении со значением, традиционно используемом в вычислительных кодах Pr_t = 0,9. Полученные результаты сравниваются с данными DNS.

Из анализа представленных профилей видно, что результаты, полученные из расчета с Pr_t = 0,9, неудовлетворительно описывают распределение температуры жидкости с гидродинамическим числом Прандтля Pr = 0,025. Безразмерная температура по высоте канала существенно занижена, относительная погрешность по ее максимуму составила более 26 % для режима № 1 и 27 % для режима № 2. При использовании корреляций Рейнольдса для режима течения № 1, достигнуто хорошее согласие, погрешность составила около 1 %, в сравнении с результатами DNS. Для режима № 2 профиль безразмерной температуры лежит чуть выше, несмотря на это, удалось снизить относительную погрешность, она составила 7 %.

Течение ртути в трубе с неравномерным подогревом

Задача о течении ртути в трубе с неравномерным подогревом является базовой для верификации CFD-кодов применительно к проблеме турбулентного теплообмена в жидкометаллической среде [9].

Расчетной областью является отрезок трубы длиной 1,75 м (92,1d, где d – диаметр канала, который составил 19 мм), при этом 50d – участок предварительной гидродинамической стабилизации, на котором обогрев отсутствует. Остальное расстояние 42,1d – обогреваемый постоянным тепловым потоком участок, на котором происходит термическая стабилизация уже при развитом турбулентном течении.

Граничные условия на входе, а также величина плотности теплового потока заданы в соответствии с табл. 2.

Таблица 2

Параметры потока

Сечение, x/d	2,0	9,0	15,0	35,0
Число Рейнольдса	51440	49010	49180	49580
Скорость набегающего потока, м/с	0,29781	0,27811	0,2782	0,2772
Температура набегающего потока, K	306,46	306,05	305,52	306,22
Расход, Вт/м^2	28700	28800	29500	28100

Расчетная область представляет собой простую трубу постоянного сечения, поэтому для моделирования турбулентности была выбрана модель линейной вихревой вязкости SST, Турбулентное число Прандтля вычислялось с помощью корреляции Рейнольдса (1) и составило Pr_t = 2,066 для всех расчётных случаев.

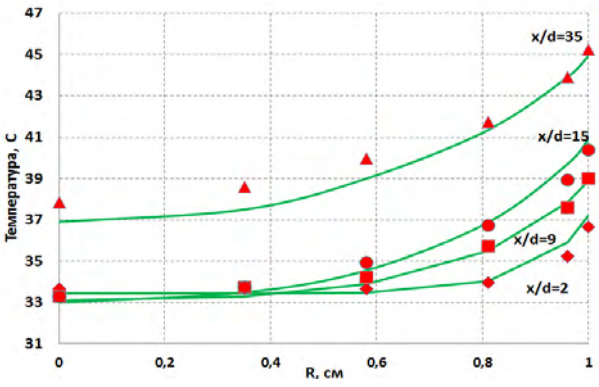


Рис. 2. Распределение температур по радиусу в различных сечениях (сплошными линиями обозначен расчет, маркером – экспериментальные данные)

На рис. 2 приведено сопоставление данных расчёта с экспериментом для четырех контрольных сечений с относительными координатами :x/d = 2 (x = 0,988 м), x/d = 9 (x = 1,121 м), x/d = 15 (x = 1,235 м), x/d = 35 (x = 1,615 м). Наибольшая разница расчетной и экспериментальной температуры видна для первых двух точек сечения x/d = 35, расчетные значения несколько занижены относительно экспериментальных. Максимальная относительная погрешность составила 3 %. В целом, результаты численного моделирования течения ртути в трубе с заданным потоком тепла на части поверхности в высокой степени согласуются с экспериментальными данными.

Турбулентное течение натриевого теплоносителя в трубе с охлаждением

Рассматривается развитое турбулентное течение натриевого теплоносителя в круглой трубе, постановка задачи и аналитическое решение описаны в [10]. Снаружи труба омывается средой с бесконечно большим расходом и бесконечно большим коэффициентом теплоотдачи. В этом случае температуру наружной стенки трубы можно принять постоянной. Расчетной областью является отрезок трубы длиной 2,5 м (50d, где d – диаметр канала, который составил 0,05м), при этом 40d – участок предварительной гидродинамической стабилизации, на котором обогрев отсутствует. Остальное расстояние, 10d– охлаждаемый участок, на котором происходит термическая стабилизация уже при развитом турбулентном течении.

Граничные условия: на входе задана среднемассовая скорость и температура (см. табл. 3). На первом участке внешней поверхности трубы задается адиабатическое условие, это сделано для получения на входе во вторую часть стабилизированного распределения скорости потока. На охлаждаемой части трубы задается граничное условие первого рода T = 423.

Таблица 3

Режима расчета

№	Расход теплоносителя, кг/с	Скорость на входе, м/с	Турбулентное число Прандтля
1	0,63	0,3913	4,7
2	1,26	0,7826	3,9
3	2,1	1,3043	3,4
4	3,151	1,9571	3
5	5,253	3,2626	2,6
6	7,353	4,5669	2,4
7	10,505	6,5246	2,2

При моделировании турбулентности использовалась модель SST, турбулентное число Прандтля рассчитано с помощью корреляции Рейнольдса (1), приведено в табл. 3 в соответствии с режимом течения.

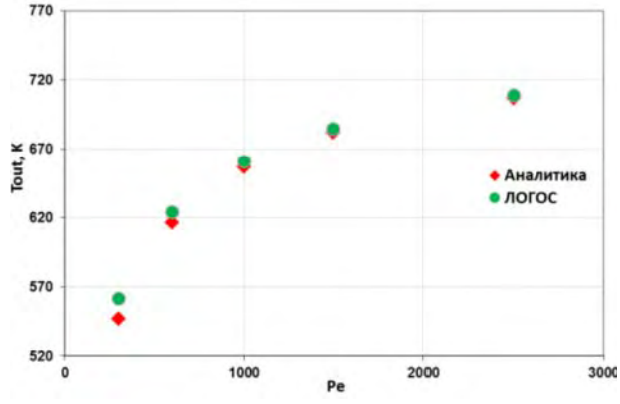


Рис. 3. Зависимость осредненной температуры на выходе от числа Пекле

Сравниваются расчетные значения температуры, осредненные по расходу на выходе из трубы с аналитическими данными. Из рис. 3 видно, что результаты согласуются с аналитическим решением. Для режима № 1 относительная погрешность составила 2,7 %, отметим, что ее значение уменьшается с увеличением числа Рейнольдса.

Перемешивание разнотемпературных потоков натриевого теплоносителя на стенде TEFLU

Стенд TEFLU [11] предназначен для моделирования процессов перемешивания разнотемпературных потоков натриевого теплоносителя. Экспериментальная установка состоит из вертикальной трубы с внутренним диаметром 110 мм и подвижной в продольном направлении решетки.

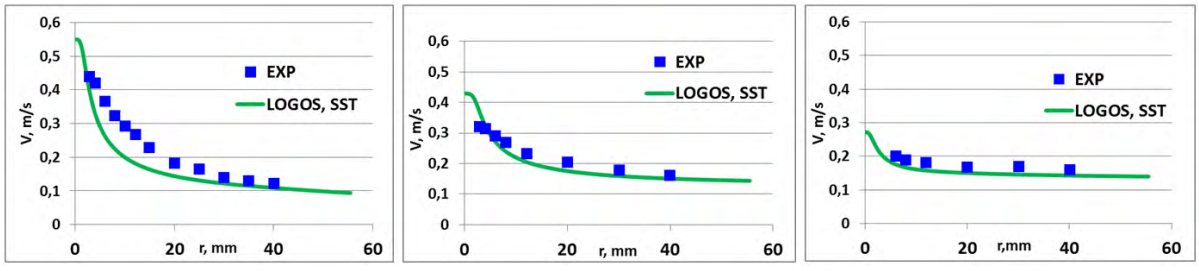
Геометрическая модель представляет собой сектор трубы с углом 5 градусов, Длина расчетной модели 400 мм, радиус 55 мм. Построена сетка с количеством ячеек 3200 ($N_r \times N_x$ = 80×400 – количество ячеек в радиальном и осевом направлениях, соответственно), с измельчением к центру и к входу трубы.

Таблица 4

Параметры потока

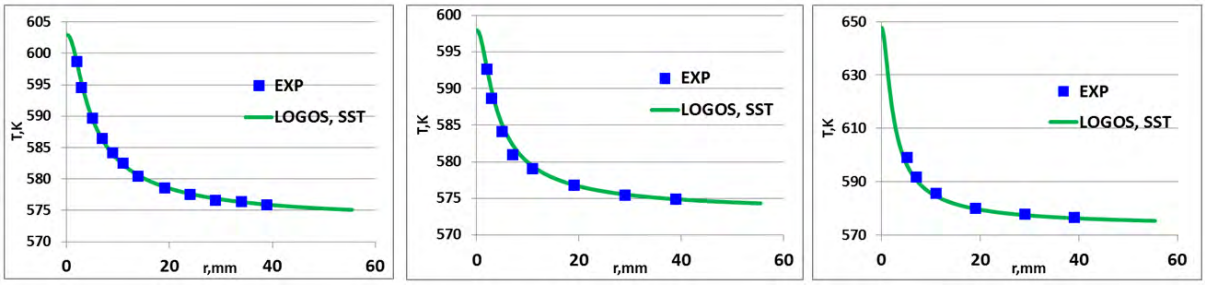
Параметры потока (экспериментальный режим)	Вынужденная конвекция (forced)	Переходной режим (buoyant)	Свободная конвекция (plume)
Средняя скорость основного потока, м/с	0,05	0,1	0,1
Средняя температура основного потока, K	573	573	573
Разность скоростей между горячей и холодной струями, м/с	0,5	0,33	0,17
Разность температур между горячей и холодной струями, K	30	25	75
Общий расход основного потока, кг/с	0,436	0,848	0,842
Турбулентное число Прандтля	6,5	6,9	7,6

На рис. 4, 5 представлены распределение скорости и температуры по оси симметрии для трех режимов течения.



а б в

Рис. 4. Распределение скорости на оси трубы: а –вынужденная конвекция, б – переходной режим, в – свободная конвекция



а б в

Рис. 5. Распределение температуры на оси трубы: а – вынужденная конвекция, б – переходной режим, в – свободная конвекция

Теплофизические свойства натрия заданы зависящими от температуры [11].

Задача решается в режимах: вынужденная конвекция, переходный режим, свободная конвекция. Граничные условия: на входе задана среднемассовая скорость, и температура струи и основного потока (см. табл. 4).

Расчетные профили температуры совпадают с экспериментальными значениями с высокой точностью. В распределении скорости есть отличия в случае вынужденной конвекции, где разница между температурой горячей и холодной струи максимальны. Расчетные профили лежат ниже экспериментальных, погрешность составила 19 %. Для переходного режима и режима свободной конвекции отличия менее значительны, максимум относительной погрешности для распределении температуры составил 2 %.

Перемешивание трех разнотемпературных струй натриевого теплоносителя

Задача моделирует проведение эксперимента смешения трех разнотемпературных струй натриевого теплоносителя [12, 13]. В ходе экспериментального исследования установлен турбулентный характер течения, определена амплитуда и частота темпера-

турных колебаний, средние значения нормированной температуры в контрольных точках.

Через три прямоугольных параллельных отверстия толщиной 20 мм и длинной 180 мм проходят разнотемпературные потоки натрия, Входные отверстия и область смешения потоков заключены между пластинами из нержавеющей стали толщиной 12 мм. Геометрическая модель расчетной области соответствовала упрощенной конфигурации выхода из активной зоны реактора [13]. Расчетная сетка содержала 9,3 млн. ячеек.

Граничные условия: на входах задана среднемассовая скорость и температура, в центре моделировалась холодная струя (Vx, Tx), по бокам – горячие (Vг, Tг), параметры режима представлены в табл. 5. На боковой границе установлено условие симметрии, на выходе градиенты всех величин предполагаются равными нулю.

Таблица 5

Скорость и температура потока

Параметры горячего натрия		Параметры холодного натрия	
Скорость, м/с	Температура, °С	Скорость, м/с	Температура, °С
0,51	347,7	0,51	304,5

Поскольку геометрия расчетной области предполагает наличие двугранных углов в районе истечения струй, для моделирования турбулентности была выбрана алгебраическая модель напряжений Рейнольдса EARSM. Турбулентное число Прандтля вычислялось с помощью корреляции Рейнольдса (1) и составило $Pr_t = 5{,}4$.

Исследуются временные зависимости температуры, а также проводится сравнение средней температуры в контрольных точках (КТ).КТ1 располагается в центре расчетной области (–15 мм, 90 мм, $z = 100$ мм), КТ2 находится вблизи стальной пластины ($x = -15$ мм, $y = 0{,}5$ мм, $z = 100$ мм), ось z совпадает с плоскостью выхода струй из направляющих каналов. Сравнение проводится по величине безразмерной температуры, которая определяется по формуле [18]:

$$T^* = \frac{T - T_x}{\Delta T},$$

где $\Delta T = T_г - T_x$.

На рис. 6 представлены временные зависимости безразмерной температуры в контрольных точках, в сравнении с экспериментальными колебаниями температур. Как видно из рисунка, максимум амплитуды колебаний совпадает с экспериментальными значения как для КТ1, так и для КТ2.

В табл. 6 приведены средние значения нормированной температуры за момент времени, равный $t = 0$–60 сек.

Таблица 6

Среднее значение температуры в сенсорах

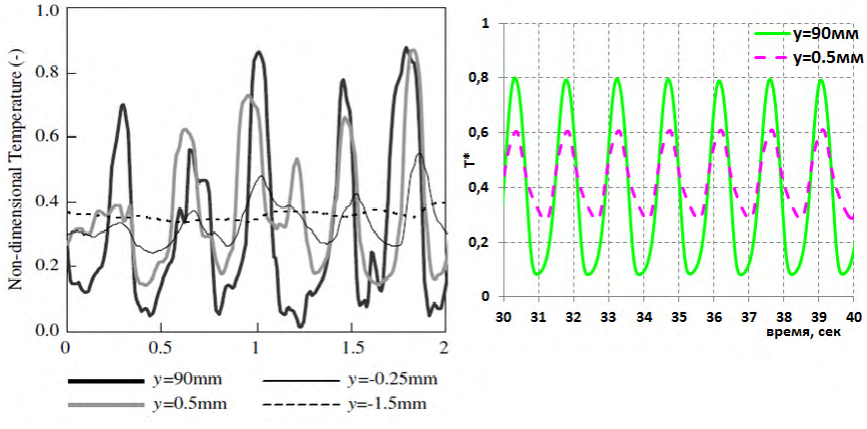
	Среднее значение безразмерной температуры		Относительная погрешность	
	$Y = 90$ мм	$Y = 0{,}5$ мм	$Y = 90$ мм	$Y = 0{,}5$ мм
Эксперимент	0,33	0,417	-	-
Расчет	0,34	0,422	3,4 %	1 %

Максимальная относительная погрешность составила 3,4 % для находящейся в центре контрольной точки, для КТ2составила около 1 %.

Гидродинамика и теплообмен в потоке натриевого теплоносителя в пучке обогреваемых стержней, эксперимент TEGENA

В эксперименте TEGENA [14] исследуется температурное распределение при течении натрия вдоль четырех электрообогреваемых стержней, тем самым моделируется обтекание теплоносителем пучка стержней в атомных реакторах.

Расчетная модель представляет собой область с исключенными отверстиями для стержней, на



а б

Рис. 6. Колебания температуры в контрольных точках: а – эксперимент, б – расчет LOGOS

стенках которых будут заданы соответствующие тепловые характеристики течения, которая включает в себя все 4 стержня без учета дистанцианирующих решеток. Расчетная сетка имеет блочную структуру и состоит из 9,8 млн. гексагональных элементов.

На входе заданы постоянная скорость и температура, значения теплового потока на каждом из стержней имеют разную величину (см. табл. 7). Данные параметры соответствуют значению числа Пекле Pe = 352,52. На выходной границе задается свободный выход, все стенки приняты адиабатическими. Теплофизические свойства натрия определялись функциональными зависимостями от температуры, согласно [14].

На рис. 7 представлено распределение температуры по высоте канала между третьим и четвертым стержнями в установке TEGENA.

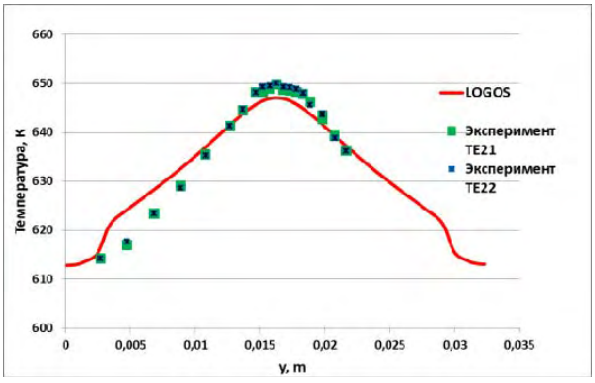


Рис. 7. Распределение температуры между третьим и четвертым стержнем

Отличие наблюдается вблизи одной из стенок, где происходит завышение температуры, с противоположной стороны экспериментальные данные отсутствуют. Температура по центру канала оказалась несколько занижена, относительная погрешность по ее максимуму не более 2 %, данное значение входит в допустимый диапазон экспериментальных погрешностей.

Гидродинамика и теплообмен в потоке ртутного теплоносителя в закрученном кольцевом канале

Экспериментальный стенд [15] представляет собой герметизированный контур циркуляции теплоносителя. Рабочим участком является кольцевой канал, расположенный вертикально, образованный двумя трубами длиной 1000 мм. К наружной поверхности внутренней трубы приварено ребро. Во внутренней трубе располагается электрический нагреватель, изготовленный из нихромовой проволоки диаметром 1,0 мм. Теплоноситель поступает через входной патрубок в нижней камере, затем проходит через рабочий участок и выходит через выходной патрубок в верхней камере.

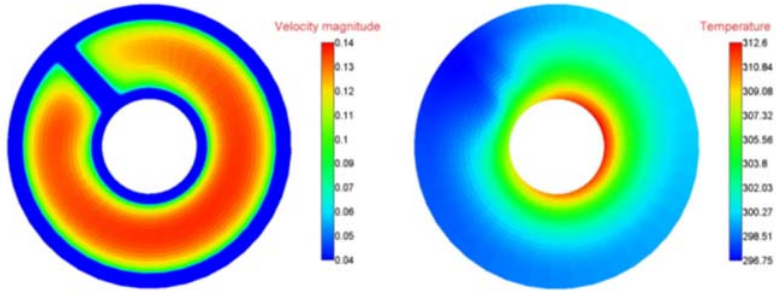
В качестве расчетной модели кольцевого канала рассматривается канал длиной 1000 мм, включающий в себя внутреннюю и наружную трубы, а также витое ребро, состоящие из стали. Расчетная сетка имеет блочную структуру и состоит из гексагональных элементов, суммарное количество контрольных объемов расчетной сетки составило 3,9 млн. ячеек.

Граничные условия: на входе задана среднемассовая скорость V = 0,12 м/с, температура T = 290,15 К; на выходе градиенты всех величин предполагаются равными нулю, На твердой стенке (внутренний цилиндр) задан поверхностный тепловой поток q_w = 50465,38 Вт/м^2 (погрешность экспериментального определения энерговыделения составляет 5 %); на всех твердых, необогреваемых по-

Таблица 7

Параметры течения

] Число Рейнольдса	Массовый поток, кг/с	Температура на входе, °С	Поток тепла на стержне 1, Вт/см^2	Поток тепла на стержне 2, Вт/см^2	Поток тепла на стержне 3, Вт/см^2	Поток тепла на стержне 4, Вт/см^2
60100	3,12	257,98	49,38	49	48,42	49,74



а б

Рис. 8.Поля распределения: а – амплитуды скорости, б – температуры в сечении z = 900 мм

верхностях задано адиабатическое граничное условие.

Ввиду наличия закрутки потока имеет место несимметричность распределения скорости относительно ребра, поэтому моделирование турбулентности производилось с помощью модели EARSM. Турбулентное число Прандтля, вычисленное с помощью корреляций Рейнольдса (1), составило $Pr_t = 2{,}5$.

На рис. 8 представлены поля скорости и температуры в сечении z = 900 мм, недалеко от выхода из расчетной области. Наличие витого ребра, по аналогии с распределением скорости, приводит к деформации поля температуры потока теплоносителя в поперечном сечении модели. Температурный максимум на внутренней, обогреваемой трубе смещается в сторону направления тангенциальной компоненты скорости. Большие значения скорости наблюдаются по направлению навивки ребра. На рис.9 показаны экспериментальное и расчетное распределения безразмерной температуры по радиусу кольцевого канала, которая определяется:

$$\theta = \frac{\lambda\left(T_w - T_{\text{тн}}\right)}{q_w d_г}$$

Здесь T_w и $T_{\text{тн}}$ – температура стенки и теплоносителя, соответственно, λ – коэффициент теплопроводности, $d_г$ – гидравлический диаметр канала, q_w– поверхностный тепловой поток.

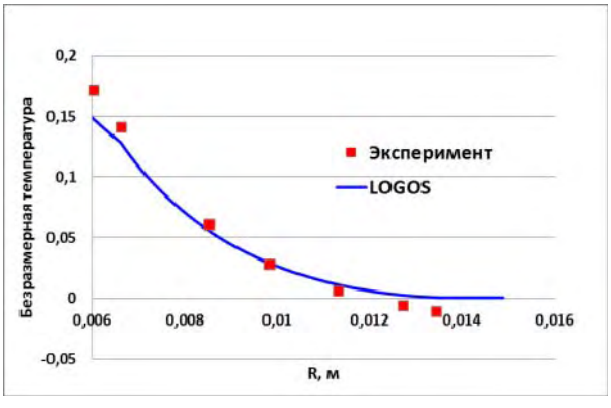


Рис. 9. Распределение безразмерной температуры по радиусу канала в сечении z = 900 мм, φ = 291°

Наибольшее отклонение наблюдается при измерении температуры в окрестности внутренней трубы и составляет порядка 13 %, допустимая погрешность измерений при проведении эксперимента 5 %.

Заключение

В докладе собран минимальный базис задач валидации методов моделирования течений жидкометаллических теплоносителей, характеризующихся низкими числами Прандтля. В базис задач вошли наиболее известные тесты, имеющие надежные экспериментальные, либо численные данные. Рассмотрены задачи о внутренних течениях в трубах и каналах различной формы, смешении разнотемпературных потоков, а также течении в пучке стрежней. Для каждой задачи приведено описание постановки и имеющиеся для нее опорные данные.

Также в докладе представлены результаты численного моделирования рассматриваемых задач по пакету программ ЛОГОС в рамках RANS моделей турбулентности. Затронут вопрос об уточнении решения путем использования корреляций для определения турбулентного числа Прандтля.

Литература

1. AIAA, Guide for the Verification and Validation of Computational Fluid Dynamics Simulations // AIAA. 1998.G-077.

2. Deryugin Yu., Zhuchkov R., Zelenskiy D., Kozelkov A., Sarazov A., Kudimov N., Lipnickiy Yu., Panasenko A. Validation results for the LOGOS multifunction software package in solving problems of aerodynamics and gas dynamics for the lift-off and injection of launch vehicles // Mathematical Models and Computer Simulations.2015. Vol. 7, N 2. P. 144–153.

3. Menghini F. Advanced Computational Fluid Dynamics models for liquid metal flows // Esame finale anno accademico. 2014-2015. P. 218.

4. Grotzbach G. Challenges in simulation and modeling of heat transfer in low-Prandtl number fluids // The 14 th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, NURETH-14. Toronto, Canada.2011. P. 33.

5. Козелков А. С., Куркин А. А., Курулин В. В., Легчанов М. А. Тятюшкина Е. С., Циберева Ю. А. Исследование применения RANS моделей турбулентности для расчета неизотермических течений с низкими числами Прандтля // Механика жидкости и газа. 2015. Т. 4.С. 44–58.

6. Козелков А. С., Куркин А. А., Крутякова О. Л., Курулин В. В., Тятюшкина Е. С. Зонный RANS–LES подход на основе алгебраической модели Рейнольдсовых напряжений // Известия РАН. Механика жидкостиигаза. 2015. № 5.С. 24–33.

7. Bricteux L., Duponcheel M., Manconi M., Bartosiewicz Y. Numerical prediction of turbulent heat transfer at low Prandtl number // Proc. 6th European Thermal Sciences Conference (Eurotherm), France, 2012.

8. Abe H., Kawamura H. A study of turbulence thermal structure in a channel flow through DNS up to Re_tau = 640 with Pr = 0,025 and 0,71// Proc. of 9th European Turbulence Conference. 2002.P. 399-402.

9. Ковалев С. И. Влияние продольного магнитного поля и термогравитационной конвекции на теплоотдачу при течении жидкого металла // Диссертация кандидата технических наук. МЭИ. 1988.

10. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. М.: Энергоиздат, 1981.

11. Carteciano L., Grotzbach G. Validation of turbulence models in the computer code FLUTAN for

a free hot sodium jet in different buoyancy flow regimes // FZKA 6600. 2003.

12. Kimura N., Miyakoshi H., Kamide H. Experimental investigation on transfer characteristics of temperature fluctuation from liquid sodium to wall in parallel triple-jet // International Journal of Head and Mass Transfer. 2007. Vol. 50. P. 2024–2036.

13. Рогожкин С. А., Аксёнов А. А., Жлуктов С. В., Осипов С. Л., Фадеев И. Д., Шапоренко Е. В., Шепелев С. Ф., Шмелев В. В. Использование URANS подхода для определения пульсаций температуры при перемешивании трех разнотемпературных струй натрия // Компьютерные исследования и моделирование 2014. Т. 6, № 6. С. 923–935.

14. Möller R. TEGENA: Detaillierte experimentelle untersuchungen der temperatur- und geschwindigkeitsverteilungen in stabbündel-geometrien mit turbulenter natriumströmung // KfK 4491. Karlsruhe, Germany, 1989.

15. Генин Л. Г., Крылов С. Г., Листратов Я. И., Захаров А. Г. Исследование полей скорости и температуры в кольцевом канале с винтовым оребрением применительно к созданию тепловыделяющей сборки реактора БРЕСТ-ОД-300 / Конференция «Инновации в атомной энергетике» // Сборник докладов. М.: Изд-во АО «НИКИЭТ». 2015. С. 300–311.

16. Погосян М. А., Савельевских Е. П., Стрелец Д. Ю., Корнев А. В., Шагалиев Р. М., Козелков А. С. Использование отечественных суперкомпьютерных технологий при проектировании новых образцов авиационной техники // Авиационная промышленность. 2013. № 3. С. 3–7.

МОДУЛЬ ЛОГОС-ТЕПЛО. РАСЧЕТ ТЕПЛООБМЕНА ИЗЛУЧЕНИЕМ В СИММЕТРИЧНЫХ ОБЛАСТЯХ

А. А. Ларионова, А. К. Меньшикова, В. А. Глазунов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Одной из составляющих компонент комплекса программ ЛОГОС [1] является модуль ЛОГОС-ТЕПЛО, предназначенный для численного моделирования процессов теплопроводности в твердых телах и/или неподвижных жидкостях и газах с учетом широкого набора физических процессов. Одним из важнейших механизмов передачи энергии при исследовании высокотемпературных процессов является процесс распространения тепла излучением в оптически прозрачных средах.

В текущей версии модуля ЛОГОС-ТЕПЛО при решении задач с излучением невозможно получить истинное распределение температуры при отсекании части конструкции. Таким образом, пользователь вынужден считать на полной модели, даже если она симметрична, что, естественно, замедляет время расчета, приводит к излишнему потреблению вычислительной ресурсов. Для решения данной проблемы предложен подход, который позволяет решать задачи переноса тепла излучением в теплопроводных средах в симметричной постановке.

Постановка задачи

Будем рассматривать задачу теплопроводности в симметричной относительно некоторой плоскости трехмерной конструкции, стенки которой обмениваются теплом за счет излучения (см. рис. 1).

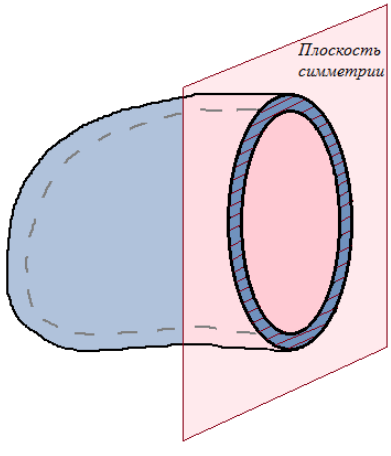


Рис. 1. Пример симметричной расчетной модели

Как известно [1], теплоперенос в твердотельных областях G с границами ∂G описывается уравнением теплопроводности:

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} = div\left(\chi \cdot grad(T)\right) + \rho Q_T \,, \qquad (1)$$

где ρ – плотность вещества, E – удельная внутренняя энергия, T – температура, χ – коэффициент теплопроводности вещества, Q_T – мощность внутренних источников теплоты. На границах ∂G области G могут быть заданы граничные условия (фиксированная температура, тепловой поток, конвективный теплообмен, излучение или комбинации этих граничных условий).

Для решения поставленной задачи в модуле ЛОГОС-ТЕПЛО используется метод конечного объема [2]. Область G разбивается на элементарные объемы – ячейки, ограниченные линейчатыми поверхностями – гранями. Наборы граней формируют границы ∂G с заданными граничными условиями.

Расчет теплообмена излучением

Постановка граничных условий при решении связанных задач теплообмена излучением зависит от радиационных свойств материала и окружающей среды. В общем случае для определения тепловых потоков необходимо решать многомерное уравнение переноса излучения. Мы ограничиваемся более простыми моделями, которые основаны на следующих допущениях: окружающая среда является прозрачной для излучения, радиационные свойства поверхности постоянны и не зависят от направления, поверхность испускает и отражает излучение диффузно.

Интегральная плотность потока излучения определяется законом Стефана – Больцмана:

$$J = \varepsilon\sigma T^4 \,. \qquad (2)$$

В случае, когда на элемент поверхности падает только внешнее излучение, а собственное излучение не взаимодействует с другими элементами поверхности, граничное условие теплообмена записывается в виде:

$$-\left(\chi \frac{\partial T}{\partial n}\right)_{\vec{R}_i} = \varepsilon\sigma T^4 - \varepsilon\sigma T_{\partial G}^4\left(\vec{R},t\right), \left(\vec{R}_i,t\right) \in \Delta S_i \qquad (3)$$

В случае расчета радиационного теплообмена многих тел, разделенных прозрачной для излучения средой, падающий тепловой поток на границе области определяется не только температурой окружающей среды, но и излучением других тел. Также, при радиационном теплообмене одного тела, имеющего прозрачные для излучения полости или невыпуклые поверхности, необходимо учитывать собственное излучение поверхности тела по всем видимым направлениям. Результирующий поток излучения в точке поверхности равен разности эффективного излучения и падающего излучения. Интегральное уравнение, выражающее закон сохранения энергии и описывающее перенос излучения через оптически прозрачную область, ограниченную поверхностью ∂G , излучающую по закону Ламберта, записывается в виде:

$$q\left(\vec{R}_i,t\right)=\varepsilon\sigma T^4\left(\vec{R}_i,t\right)-\frac{1}{\pi}\int\limits_{\partial G'}\varepsilon\sigma T^4\left(\vec{R}_j,t\right)\times$$
$$\times\frac{\cos\left(\vec{n}_i,\Delta\vec{R}_{ij}\right)\cos\left(\vec{n}_i,\Delta\vec{R}_{ji}\right)}{\left|\Delta\vec{R}_{ij}\right|^2}dS\ , \qquad (4)$$

где $\cos\left(\vec{n}_i,\Delta\vec{R}_{ij}\right)$ – косинус угла между нормалью в точке i и отрезком $\left|\Delta\vec{R}_{ij}\right|$, соединяющим точки j и i; $\cos\left(\vec{n}_j,\Delta\vec{R}_{ji}\right)$ – косинус угла между нормалью в точке j и отрезком; $\left|\Delta\vec{R}_{ij}\right|$ – расстояние между точками i и j. В (4) интегрирование ведется по части поверхности $\partial G'$, которая является частью граничных поверхностей ∂G, видной из точки i.

Таким образом, связанная задача теплопроводности и теплообмена излучением сводится к определению теплового поля внутри тел на основе решения уравнения теплопроводности (1) с граничным условием:

$$-\left(\chi\frac{\partial T}{\partial n}\right)_{\vec{R}_i}=q\left(\vec{R}_i,t\right),\ \left(\vec{R}_i,t\right)\in\Delta S_i \qquad (5)$$

где тепловой поток $q\left(\vec{R}_i,t\right)$ определяется по (4).

При численном решении выражение для теплового потока (4) на грани удобно представить в виде разности двух потоков

$$q\left(\vec{R}_i,t\right)=J_i^+-J_i^- \qquad (6)$$

где $J^+\left(R,t\right)$ – односторонний поток излучения в направлении внешней нормали к поверхности, $J^-\left(R,t\right)$ – односторонний поток излучения в направлении внутренней нормали к поверхности. В приближении абсолютно черного тела односторонний поток J^+ в любой точке на поверхности определяется по значению температуры в этой точке по формуле (2). Односторонний поток поглощенного излучения J^-, определяется по формуле:

$$J_i^-\left(\vec{R}_i,t\right)=$$
$$=\frac{1}{\pi}\int\limits_{\partial G'}J^+\left(\vec{R}_j,t\right)\frac{\cos\left(\vec{n}_i,\Delta\vec{R}_{ij}\right)\cos\left(\vec{n}_j,\Delta\vec{R}_{ji}\right)}{\left|\Delta\vec{R}_{ij}\right|^2}dS\ , \qquad (7)$$

где суммирование ведется по участкам поверхности, находящейся в пределах прямой видимости.

Аппроксимируя интеграл (7) квадратурной формулой прямоугольников, получим следующее выражение для падающего излучения:

$$J_i^-\left(\vec{R}_i,t\right)=\sum_j A_{ij}J_j^+\left(\vec{R}_i,t\right), \qquad (8)$$

где A_{ij} – так называемые угловые коэффициенты, определяемые по формуле:

$$A_{ij}=\frac{1}{\pi}\frac{\cos\left(\vec{n}_i,\Delta\vec{R}_{ij}\right)\cos\left(\vec{n}_j,\Delta\vec{R}_{ji}\right)}{\left|\Delta\vec{R}_{ij}\right|^2}\Delta S_j\ . \qquad (9)$$

Для реальных тел элементы поверхности поглощают излучение с учетом коэффициента степени черноты поверхности $\varepsilon_i=\varepsilon\left(R_i\right)$ и отражают падающее излучение с коэффициентом отражения, определяемого как:

$$\rho_i=1-\varepsilon_i \qquad (10)$$

В этом случае для некоторого произвольного элемента поверхности ΔS_i имеющего степень черноты ε_i и отражательную способность ρ_i, поток результирующего излучения будет равен потоку эффективного излучения этой поверхности за вычетом потока излучения от всех источников падающего излучения. Поток эффективного излучения J_i^+ элемента поверхности ΔS_i состоит из потока собственного излучения и отраженного излучения:

$$J_i^+=\varepsilon_i\sigma T_i^4+\left(1-\varepsilon_i\right)\sum_j A_{ij}J_j^+\ . \qquad (11)$$

Результирующий поток излучения равен разности эффективного и падающего потоков излучения и описывается выражением:

$$q_i=\varepsilon_i\sigma T_i^4+\left(1-\varepsilon_i\right)\sum_j A_{ji}J_j^+-\sum_j A_{ji}J_j^+=$$
$$=\varepsilon_i\sigma T_i^4-\varepsilon_i\sum_j A_{ji}J_j^+\ . \qquad (12)$$

Запишем уравнение (11) в матричном виде:

$$J=M^{-1}\cdot J^{\sigma}\ , \qquad (13)$$

где компонентами вектора J_i являются значения эффективного излучения i-ого элемента поверхности; а $J_i^{\sigma} = \varepsilon_i \sigma T_i^4$ – поток собственного излучения.(14)

Элементы матрицы $M = \left(m_{ij}\right)$ определяются по формуле

$$m_{ij} = \delta_{ij} - \left(1 - \varepsilon_i\right) A_{ij}, \qquad (15)$$

где δ_{ij} – символ Кронекера.

Тогда уравнение (12) в матричном виде можно представить в виде

$$Q = J^{\sigma} + \mathfrak{E} \cdot A \cdot M^{-1} \cdot J^{\sigma}, \qquad (16)$$

где ε – диагональная матрица с элементами ε_i по диагонали.

Теплообмен излучением в симметричной области

Для удобства изложения рассмотрим двумерную задачу теплопроводности с учетом теплообмена излучением в сечении плоскостью конструкции, приведенной на рис. 2. Здесь грани i и j расположены в исследуемой области, грани $\tilde{i}$ и $\tilde{j}$ – симметричные им относительно плоскости симметрии грани.

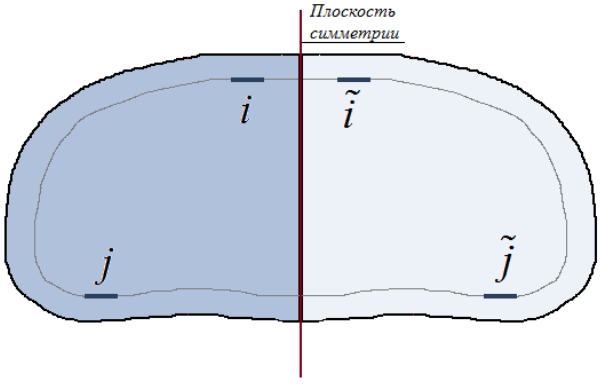


Рис. 2. Отраженные излучающие грани

Матрицы A и M^{-1} для полной конструкции представим в виде:

$$\left[\bullet\right] = \begin{bmatrix} \bullet_{IJ} & \bullet_{I\tilde{J}} \\ \bullet_{\tilde{I}J} & \bullet_{\tilde{I}\tilde{J}} \end{bmatrix} \qquad (17)$$

Диагональную матрицу $\mathfrak{E}$ в виде:

$$\left[\bullet\right] = \begin{bmatrix} \bullet_{I} & 0 \\ 0 & \bullet_{\tilde{I}} \end{bmatrix} \qquad (18)$$

Вектора J^{σ}, Q и соответственно в виде:

$$\left\{\bullet\right\} = \begin{Bmatrix} \bullet_{I} \\ \bullet_{\tilde{I}} \end{Bmatrix} \qquad (19)$$

где индексы I, J соответствуют исходным граням, $\tilde{I}$ и $\tilde{J}$ – симметричным им относительно плоскости симметрии. Тогда уравнение (16) для полной конструкции выглядит следующим образом:

$$\begin{Bmatrix} Q_I \\ Q_{\tilde{I}} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} J_I^{\sigma} \\ J_{\tilde{I}}^{\sigma} \end{Bmatrix} + \\ + \begin{bmatrix} \mathfrak{E}_I & 0 \\ 0 & \mathfrak{E}_{\tilde{I}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_{IJ} & A_{I\tilde{J}} \\ A_{\tilde{I}J} & A_{\tilde{I}\tilde{J}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} M_{IJ} & M_{I\tilde{J}} \\ M_{\tilde{I}J} & M_{\tilde{I}\tilde{J}} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{Bmatrix} J_I^{\sigma} \\ J_{\tilde{I}}^{\sigma} \end{Bmatrix}, \qquad (20)$$

или

$$\begin{Bmatrix} Q_I \\ Q_{\tilde{I}} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} J_I^{\sigma} \\ J_{\tilde{I}}^{\sigma} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathfrak{E}_I & 0 \\ 0 & \mathfrak{E}_{\tilde{I}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_{IJ} & A_{I\tilde{J}} \\ A_{\tilde{I}J} & A_{\tilde{I}\tilde{J}} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} X_I \\ X_{\tilde{I}} \end{Bmatrix} \qquad (21)$$

Поскольку рассматриваемая область симметрична, то мы можем записать:

$$T_i = T_{\tilde{i}} \qquad (22)$$

$$J_i^{+} = J_{\tilde{i}}^{+} \qquad (23)$$

$$q_i = q_{\tilde{i}} \qquad (24)$$

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{\tilde{i}} \qquad (25)$$

В симметричной постановке для определения теплового состояния конструкции необходимо знать тепловые потоки только на исходных гранях, соответственно необходимо вычислить только вектор Q_I.

$$\left\{Q_I\right\} = \left\{J_I^{\sigma}\right\} + \left[\mathfrak{E}_I\right] \cdot \begin{bmatrix} A_{IJ} & A_{I\tilde{J}} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} X_I \\ X_{\tilde{I}} \end{Bmatrix} \qquad (26)$$

Проделав несложные математические действия, зная, что и $J_i^{+} = J_{\tilde{i}}^{+}$ и $A_{i\tilde{k}} = A_{\tilde{i}k}$, получаем, что $X_I = X_{\tilde{I}}$. Тогда уравнение (26) принимает вид:

$$\left\{Q_I\right\} = \left\{J_I^{\sigma}\right\} + \left[\mathfrak{E}_I\right] \cdot \left[\tilde{A}_{IJ}\right] \cdot \left\{X_I\right\}, \qquad (27)$$

где

$$\tilde{a}_{ij} = a_{ij} + a_{i\tilde{j}}, \qquad (28)$$

$$\left\{X_I\right\} = \left[\tilde{M}_{IJ}\right] \cdot \left\{J_I^{\sigma}\right\} \qquad (29)$$

Элементы матрицы $\left[\tilde{M}_{IJ}\right]$ вычисляются по формуле:

$$\tilde{m}_{ij} = m_{ij} + m_{i\tilde{j}}. \quad (30)$$

Таким образом, для корректного расчета теплообмена излучением в симметричной постановке, достаточно рассчитывать только A_{IJ} и $A_{I\tilde{J}}$ блоки матрицы A. Следовательно, необходимо знать геометрические характеристики симметричных излучающих граней, выходящих за пределы расчетной области. В качестве решения было предложено виртуально достраивать недостающие грани, отображая их относительно плоскости симметрии.

Алгоритм зеркального отображения излучающих граней

Для того чтобы найти необходимые геометрические характеристики, а именно вершины и центры симметричных граней, необходимо произвести отображение вершин и центров граней относительно плоскости симметрии. Отображение является линейным преобразованием [4], следовательно, в трехмерном пространстве для точки $P(x,y,z)$ оно может быть выполнено с помощью матрицы преобразования T размером 4×4. Плоскость симметрии задается двумя параметрами – это вектор нормали к плоскости и точка плоскости $P(x,y,z)$.

Координаты вершин и центров отраженных граней находим следующим образом:

$$\tilde{x} = \sum_{i=1}^{4} T_{1i}\cdot P_i, \quad (31)$$

$$\tilde{y} = \sum_{i=1}^{4} T_{2i}\cdot P_i, \quad (32)$$

$$\tilde{z} = \sum_{i=1}^{4} T_{3i}\cdot P_i, \quad (33)$$

где $\{P\} = \{x,y,z,f\}$, x,y,z – координаты отражаемой точки.

$$f = \frac{1}{T_{41}\cdot P_1 + T_{42}\cdot P_2 + T_{43}\cdot P_3 + T_{44}} \quad (34)$$

Здесь T_x, T_y, T_z – компоненты перемещения, φ – угол поворота вокруг оси, (l_X, l_Y, l_Z) – направляющий вектор оси, задан направляющими косинусами, компоненты которого удовлетворяют следующим соотношениям: $l_X = \cos\left(\overline{n}, \overline{OX}\right)$, $l_Y = \cos\left(\overline{n}, \overline{OY}\right)$, $l_Z = \cos\left(\overline{n}, \overline{OZ}\right)$, $l_X^2 + l_Y^2 + l_Z^2 = 1$.

Верификационные расчеты

Для верификации реализованных алгоритмов рассматривается ряд задач переноса тепла излучением.

Теплообмен излучением в трехслойной сфере

Постановка задачи

Рассматривается задача определения температурного поля по объему трехслойной сферической оболочки с внутренним тепловыделяющим слоем в стационарном режиме. Геометрическая модель изображена на рис. 3.

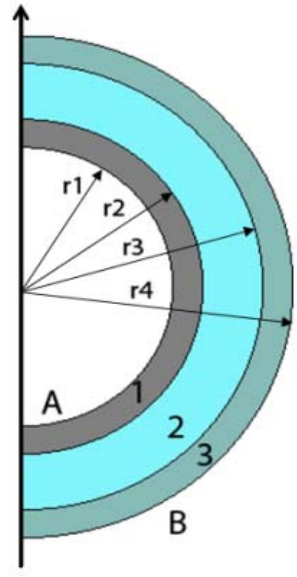


Рис. 3. Геометрическая схема задачи

Матрица T выглядит следующим образом:

$$\begin{pmatrix} l_X^2 + \left(l_Y^2 + l_Z^2\right)\cdot\cos\varphi & l_X\cdot l_Y\cdot(1-\cos\varphi) - l_Z\cdot\sin\varphi & l_X\cdot l_Z\cdot(1-\cos\varphi) + l_Y\cdot\sin\varphi & 0 \\ l_X\cdot l_Y\cdot(1-\cos\varphi) + l_Z\cdot\sin\varphi & l_Y^2 + \left(l_X^2 + l_Z^2\right)\cdot\cos\varphi & l_Y\cdot l_Z\cdot(1-\cos\varphi) - l_X\cdot\sin\varphi & 0 \\ l_X\cdot l_Z\cdot(1-\cos\varphi) - l_Y\cdot\sin\varphi & l_Y\cdot l_Z\cdot(1-\cos\varphi) + l_X\cdot\sin\varphi & l_Y\cdot l_Z\cdot(1-\cos\varphi) + l_X\cdot\sin\varphi & 0 \\ T_x & T_y & T_z & 1 \end{pmatrix}.$$

Параметры модели: $r_1 = 0{,}1$ м; $r_2 = 0{,}15$ м; $r_3 = 0{,}32$ м; $r_4 = 0{,}4$ м.

На внешние поверхности моделизадаетсятепловое нагружение: конвективный теплообмен. Коэффициент теплоотдачи – $\alpha = 10 Вт/м^2/K$, температура окружающей среды $T = 40\,°C$. Внутренняя поверхность (поверхность А) – теплоизолированная стенка. Теплофизические свойства материалов сферы приведены в табл. 1.

Таблица 1

Теплофизические свойства материалов

Материал	Теплопроводность, Вт/(м·°С)	Теплоемкость, Дж/(кг·°С)	Степень черноты
1	10	100	0,25
2	0,025	1000	Прозрачная среда
3	0,1	1500	0,25

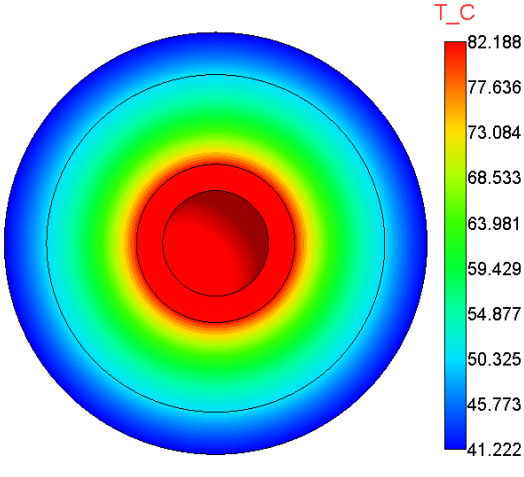
Задача решается в двух постановках:

– трехмерная постановка. Мощность источника-тепловыделения – $201140 \frac{Вт}{м^3}$;

– двумерная осесимметричная постановка. Мощность источника тепловыделения – $201140 \frac{Вт}{м^3}$.

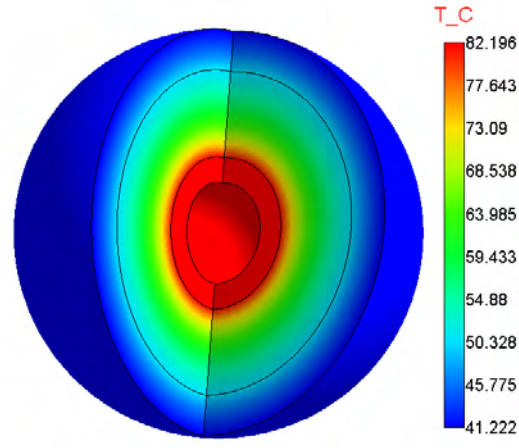
Результаты расчетов в трехмерной постановке

Ниже, на рис. 4, представлены поля температур, полученные при решении задачи в полной и симметричной постановках.



а

Рис. 4. Поля температур в трехслойной сферической оболочке: а – трехмерная симметричная постановка, б – трехмерная постановка



б

Рис. 4. (Окончание)

На рис. 5 показан график распределения температур по радиусу сферической оболочки. Погрешность вычисления находится по формуле $\left|\frac{T_{\log os} - T_{etalon}}{T_{etalon}^{\max} - T_{etalon}^{\min}}\right| \cdot 100\,\%$.

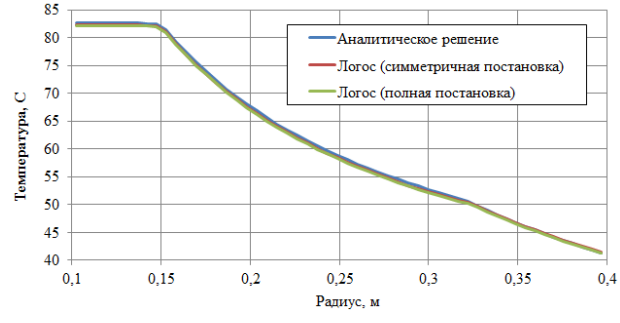


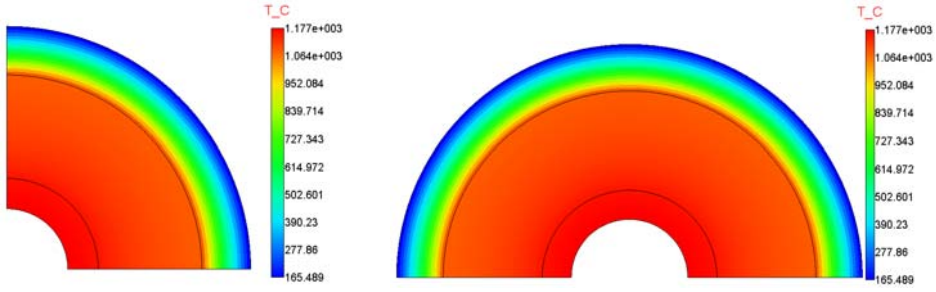
Рис. 5. График распределения температур по радиусу сферической оболочки

В табл. 2, приведены некоторые сравнительные величины, полученные в результате расчетов. Погрешность вычисления находится по формуле $\left|\frac{T_{\log os} - T_{etalon}}{T_{etalon}^{\max} - T_{etalon}^{\min}}\right| \cdot 100\,\%$.

Таблица 2

Сравнительные величины расчетов

	Время расчета матрицы коэффициентов видимости, с	Объем затраченной памяти, МБ	Полное время расчета, с	Погрешность вычисления, %
Полная постановка	200	2486,047	379,813	1,1
Симметричная постановка	130 (–65 %)	1561,223 (–37,2 %)	218,331 (–42,5 %)	1,1



а б

Рис. 6. Поля температур в трехслойной сферической оболочке в осесимметричном приближении: а – двумерная, симметричная, б – двумерная, полная постановка

На рис. 7 приведен график распределения температур по радиусу сферической оболочки.

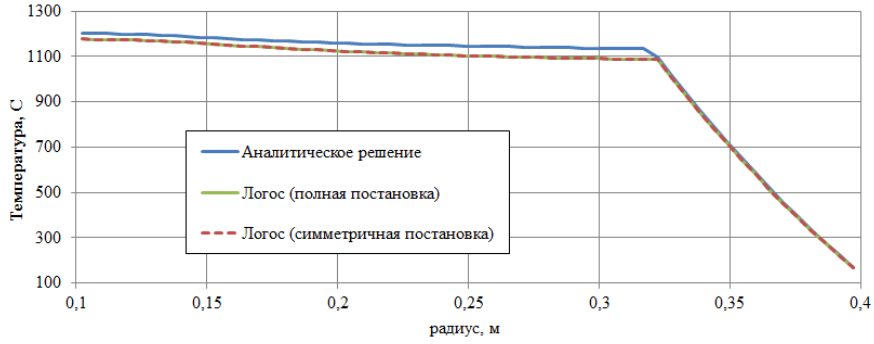


Рис.7. График распределения температур по радиусу сферической оболочки

Таблица 3

Сравнительные величины расчетов

	Время расчета матрицы коэффициентов видимости, с	Объем затраченной памяти, МБ	Полное время расчета, с	Погрешность вычисления, %
Полная постановка	1,1	19,871	6,308	4,5
Симметричная постановка	0,42 (–61,8 %)	17,555 (–11,7 %)	3,874 (–38,6%)	4,5

Результаты расчетов в двумерной, осесимметричной постановке

Ниже представлены поля температур, полученные при решении задачи в полной и симметричной постановках.

В табл. 3 приведены некоторые сравнительные величины, полученные в результате расчетов.

Теплообмен излучением в транспортно-упаковочном контейнере

Постановка задачи

Рассматривается задача стационарного теплового состояния контейнера (ТУК) для перевозки и длительного хранения ОТВС [5]. На наружной поверхности ТУК задается конвективный теплообмен. Температура окружающей среды: $T = 38$ °C. Коэффициент теплоотдачи задается формулой: $0,00002 \cdot T^3 - 0,0052 \cdot T^2 + 0,4916 \cdot T - 7,0508$. Тепловыделение в контейнере происходит в результате радиактивного распада в объеме топливных элементов, в расчетах – задается удельным тепловым потоком q_S на внутреннюю поверхность корпуса твэла и удельным тепловыделением q_V в объеме топлива (в центре каждой ТВС, т. е. в месте предполагаемого достижения максимума температур). Удельные плотности тепловыделения составляют: $q_S = 42,85 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$, $q_V = 19123,1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3}$.

Для проведения численных расчетов разработана двумерная компьютерная модель поперечного сечения ТУК-S. Расчетная схема представлена на рис. 9.

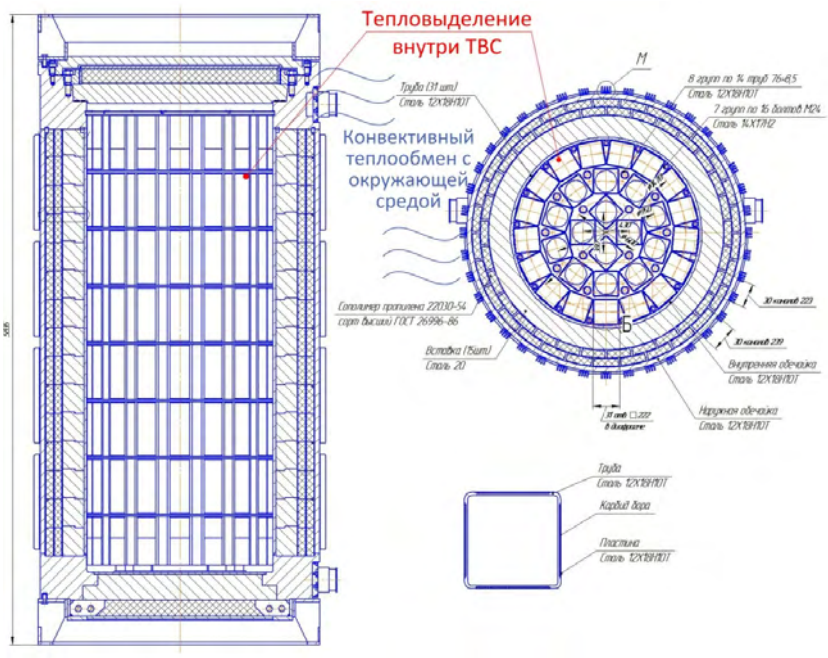
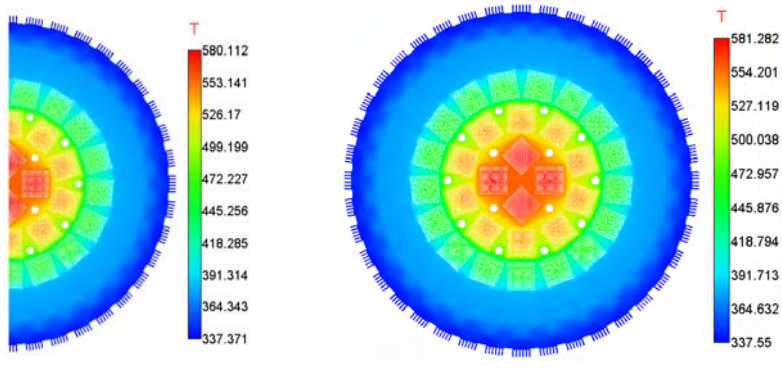
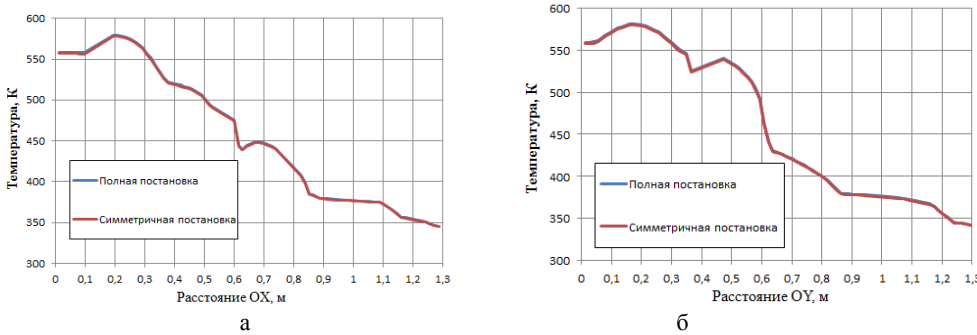


Рис. 8. Общий вид ТУК-S в разрезе. Постановка задачи о распределении температур в поперечном сечении



а б

Рис. 9. Поля температур в ТУК-S:а – двумерная, симметричная постановке, б – двумерная постановка



а б

Рис. 10. Распределение температуры в ТУК-S: а – вдоль оси OX, б – вдоль оси OY

Результаты расчетов

На рис. 9 представлены поля температур, полученные при решении задачи в полной и симметричной постановках.

На рис. 10 представлены расчетные профили температуры по осям OX и OY, полученные в симметричной постановке в сравнении с расчетными профилями температуры, полученными в полной постановке.

В табл. 4, приведены некоторые сравнительные величины, полученные в результате расчетов.

Таблица 4

Сравнительные величины расчетов

	Время расчета матрицы коэффициентов видимости, с	Объем затраченной памяти, МБ	Полное время расчета, с
Полная постановка	1,0E+04	15913,961	80154,508
Симметричная постановка	0,59E+04 (–41 %)	12276,516 (–23 %)	40653,849 (–49,28 %)

Заключение

В модуле ЛОГОС-ТЕПЛО реализована возможность расчета теплообмена излучением в симметричных областях. Предложенный авторами алгоритм хорошо показал себя как на тестовых задачах, так и на задаче определения теплового состояния реальной конструкций. Новые возможности модуля ЛОГОС-ТЕПЛО позволяют значительно сократить время расчета и объем потребляемой памяти, не увеличивая, при этом, погрешность вычисления. В свою очередь, время на подготовку подобных задач не увеличивается. Достаточно лишь дополнительно указать границу симметрии.

Литература

1. Оцисик М. Н. Сложный теплообмен. М.: Мир, 1976.

2. Дерюгин Ю. Н., Зеленский Д. К., Глазунов В. А. и др. Многофункциональный пакет программ ЛОГОС: физико-математические модели расчета задач аэро-, гидродинамики и теплопереноса // Препринт 111-2013. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2013.

3. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением. М.: Мир, 1975.

4. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. 1945.

5. Файлообменник docplayer.ru. - URL: http:// docplayer. ru/ 34274337-opyt-primeneniya-imitacionnogo-modelirovaniya-dlya-obosnovaniy-bezopasnosti-upakovok-s-oyat-v-avariynyh-usloviyah.html.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ СФЕРИЧЕСКОЙ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ ИЗ ТОЧКИ НАЧАЛЬНОГО ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ГАЗА

А. С. Мокеев, В. Г. Рогачев, Е. А. Кудряшов, В. М. Ямщиков

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Одним из важных явлений, возникающих при взаимодействии лазерного излучения с веществом, является процесс распространения ударных волн (УВ). Так, например, при изучении динамики плазмы С. А. Рамсден и В. Е Дэвис [1] заметили интересный эффект: быстрое движение фронта плазмы вдоль светового канала навстречу лучу. Для объяснения наблюдаемого явления С. А. Рамсден и П. Савич [2] выдвинули идею о «светодетонационной волне». Суть ее состоит в следующем. От места оптического пробоя по газу распространяется сильная УВ. Газ за этой волной нагревается и ионизируется, приобретая вместе с тем способность поглощать лазерное излучение. Поглощение происходит в тонком слое плазмы сразу за фронтом УВ. Таким образом, возникает УВ волна с поглощением энергии на ее фронте – детонация. Процесс распространения УВ навстречу лазерному лучу имеет много общего с детонацией в газе. В теории детонации задача о распространении детонационной волны (ДВ) в газе является такой же пионерской работой, как и решение уравнения Шредингера для атома водорода в квантовой механике.

Существуют две хорошо известные задачи о распространении детонации:

1) случай детонации в газе, находящимся в трубе, один из концов которой закрыт;

2) случай сферической ДВ, расходящейся от точки начального воспламенения газа.

Далее будут рассмотрены вопросы, связанные с моделированием движения сферической ДВ. Этот важный случай теоретически был описан в работе [3]. В отличии от детонации газа в трубе, в случае сферической детонации решение не может быть получено аналитически. Получение численного решения также затруднено в связи с наличием особых точек на границах исследуемой области. Основные асимптотики в окрестности особых точек приведены, например, в работах [4–6].

В настоящей работе представлено полное и максимально подробное описание задачи, а также получено численное решение с высокой точностью ($\sim 10^{-6}$).

Проведены численные расчеты соответствующей задачи по пакету программ [7], приводятся графические результаты, обсуждаются аналитические и численные решения.

Результаты данной работы могут быть применимы для апробации расчетных методик и комплексов программ при численном моделировании детонации.

Постановка задачи

Рассматривается процесс инициирования детонации из точки начального воспламенения газа, показанный на рис. 1. Поскольку газ должен быть неподвижным как перед фронтом ДВ, так и в центре симметрии, то скорость должна падать по направлению от фронта волны к центру. В промежутке между фронтом ДВ, в котором газ сжимается, и центром симметрии происходит разрежение, ибо масса газа между центром симметрии и фронтом ДВ остается той же, что и была до возникновения детонации.

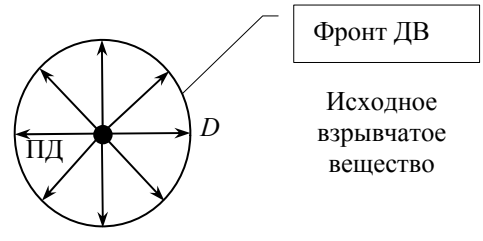


Рис. 1. Схема инициирования

«Голова» волны разрежения (ВР) бежит по газу перед ней со скоростью звука $c_{зв}$, как и ДВ, обладающая скоростью D, бежит по оставляемым ею продуктам с той же звуковой скоростью $c_{зв}$. «Голова» ВР должна при этом совпадать с детонационным разрывом, так как бежать на каком-то расстоянии от него с той же скоростью $c_{зв}$ она не может – в задаче нет масштаба длины для такого расстояния. Таким образом, единственная возможность для существования решения, удовлетворяющего всем законам газодинамики, это режим Чепмена – Жуге, при котором фронт ДВ и «голова» ВР совпадают и распространяются по продуктам детонации (ПД) с местной скоростью звука $c_{зв}$.

Течение предполагается сферически симметричным, а продукты детонации – идеальным газом с показателем адиабаты γ. Решение большинства задач по газодинамике взрыва резко упрощается, если принять $\gamma = 3$. Хорошее соответствие этого ус-

ловия опыту и простоту решения задач с ним впервые отметили Л. Д. Ландау и К. П. Станюкович [8]. Адиабатическое течение ПД за фронтом ДВ описывается одномерными нестационарными уравнениями газовой динамики в сферических координатах:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \rho}{\partial t} + u\dfrac{\partial \rho}{\partial r} + \rho\dfrac{\partial u}{\partial r} + \dfrac{2u\rho}{r} = 0, \\ \dfrac{\partial u}{\partial t} + u\dfrac{\partial u}{\partial r} = -\dfrac{1}{\rho}\dfrac{\partial p}{\partial r}, \\ p\rho^{-\gamma} = const. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь u – массовая скорость, ρ – плотность, p – давление, γ – показатель адиабаты, r – радиус сферы, t – время.

Первое уравнение в системе (1) представляет собой уравнение непрерывности, второе – уравнение движения и третье – уравнение состояния идеального газа в адиабатическом случае.

Соотношения на фронте детонационной волны

Далее будут рассмотрены соотношения на фронте ДВ. Поскольку химическая реакция протекает в ДВ при высокой температуре быстро, толщина зоны горения за УВ оказывается достаточно малой, и всю детонационную волну в целом можно рассматривать как разрыв. В разрыве исходная горючая смесь скачкообразно превращается в ПД, и столь же скачкообразно выделяется запасенная в исходной смеси химическая энергия q на единицу массы. Для ДВ, как и для УВ, справедливы законы сохранения потоков массы, импульса и энергии.

Пусть среда перед фронтом ДВ имеет параметры p_0, ρ_0, u_0. Тогда за фронтом будут параметры p_1, ρ_1, u_1, соответственно. С учетом потенциальной химической энергии q относительно исходного газа и применив понятие удельного объема $\upsilon = 1/\rho$ можно записать законы сохранения массы, импульса и энергии:

$$\begin{cases} (D-u_0)/\upsilon_0 = (D-u_1)/\upsilon_1, \\ p_1 - p_0 = \dfrac{1}{\upsilon_0}(D-u_0)(u_1-u_0), \\ \rho_0(D-u_0)\left(u_1^2/2 + p_1\upsilon_1/(\gamma-1) - u_0^2/2 - p_0\upsilon_0/(\gamma-1) - q\right) = p_1u_1 - p_0u_0. \end{cases} \quad (2)$$

Если среда перед фронтом ДВ покоится, то есть $u_0 = 0$ и ДВ является сильной, то есть $p_1 = p_0$, то, путем несложных преобразований, система уравнений (2) приводится к виду:

$$\begin{cases} u_1 = \sqrt{p_1(\upsilon_0 - \upsilon_1)}, \\ D = \upsilon_0\sqrt{\dfrac{p_1}{\upsilon_0 - \upsilon_1}}, \\ \dfrac{p_1\upsilon_1}{(\gamma-1)} = \dfrac{1}{2}p_1(\upsilon_0 - \upsilon_1) + q. \end{cases} \quad (3)$$

Система уравнений (3) дополняется условием Чепмена – Жуге [5–6]:

$$D - u_1 = c_{зв1}, \quad (4)$$

где $c_{зв1}$ – скорость звука в ПВ, которая для идеального газа равна:

$$c_{зв1} = \sqrt{\gamma\frac{p_1}{\rho_1}}.$$

Разрешая систему из четырех уравнений (3)–(4) с четырьмя неизвестными u_1, p_1, ρ_1, D, можно получить параметры на фронте ДВ:

$$D = \sqrt{2q(\gamma^2-1)},\ \rho_1 = \rho_0\frac{(\gamma+1)}{\gamma},\ u_1 = \sqrt{\frac{2q(\gamma-1)}{(\gamma+1)}},$$

$$p_1 = 2q\rho_0(\gamma-1). \quad (5)$$

Автомодельность решения

Как и в случае движения в трубе, в данной задаче нет каких-либо заданных параметров размерности длины или времени, поэтому течение газа должно быть автомодельным. Газодинамические величины зависят от r и t не порознь, а от комбинации r/t.

Введем безразмерные величины – функции-представители координаты, плотности, скорости и давления:

$$\xi = \frac{r}{t\sqrt{q}},\ R(\xi) = \frac{\rho}{\rho_0},\ U(\xi) = \frac{u}{\sqrt{q}},\ P(\xi) = \frac{p}{q\rho_0}. \quad (6)$$

Здесь характерный постоянный параметр q – теплота реакции на единицу массы, ρ_0 – плотность газа в невозмущенном состоянии.

Подставив (6) в систему уравнений газовой динамики (1), получим исходные уравнения в безразмерном виде:

$$\begin{cases} \left[\xi - U(\xi)\right]\dfrac{R'(\xi)}{R(\xi)} = U'(\xi) + \dfrac{2U(\xi)}{\xi}, \\ \left[\xi - U(\xi)\right]U'(\xi) = \dfrac{P'(\xi)}{R(\xi)}, \\ P(\xi) = c_1R^{\gamma}(\xi). \end{cases} \quad (7)$$

Разрешая первое и второе уравнения системы (7) относительно производных, вместо системы из уравнений в частных производных, получим систему из обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\begin{cases} U'(\xi) = \dfrac{2U(\xi)}{\xi\left[\left(\xi - U(\xi)\right)^2 / c_1\gamma R^{\gamma-1}(\xi) - 1\right]}, \\ R'(\xi) = \dfrac{R(\xi)\left(\xi - U(\xi)\right)}{c_1\gamma R^{\gamma-1}(\xi)} \dfrac{2U(\xi)}{\xi\left[\left(\xi - U(\xi)\right)^2 / c_1\gamma R^{\gamma-1}(\xi) - 1\right]}. \end{cases} \tag{8}$$

Решить полученную систему аналитически не представляется возможным, однако, можно исследовать поведение решения уравнений (16) вблизи особых точек и провести численное интегрирование [4].

Решение исходной задачи можно разбить на три области, как показано на рис. 2.

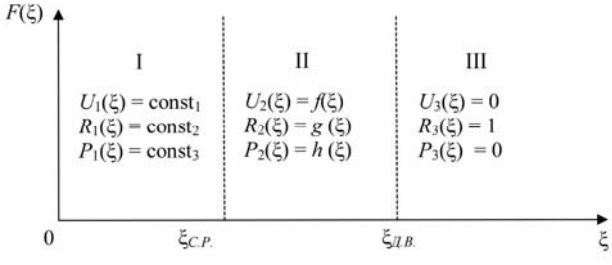


Рис. 2. Вид решения искомой задачи

Точка $\xi_{C.P.}$ представляет собой «хвост» ВР (слабый разрыв), а точка $\xi_{Д.В.}$ – фронт ДВ и, одновременно, «голову» ВР. Область III представляет собой невозмущенный газ в исходном состоянии, его параметры известны.

На границе слабого разрыва газодинамические параметры должны быть непрерывны, соответственно можно записать следующие условия сшивки:

$$\begin{aligned} U_1(\xi_{C.P.}) &= U_2(\xi_{C.P.}) = const_1, \\ R_1(\xi_{C.P.}) &= R_2(\xi_{C.P.}) = const_2, \\ P_1(\xi_{C.P.}) &= P_2(\xi_{C.P.}) = const_3. \end{aligned}$$

Из граничного условия симметрии:

$$U_1(0) = U_2(\xi_{C.P.}) = const_1 = 0.$$

Далее будут рассмотрены соотношения в точке $\xi_{Д.В.}$ на фронте ДВ. При подстановке (6) в (5) получены параметры ПД на фронте ДВ:

$$\begin{cases} U\left(\xi_{Д.В.}\right) = \sqrt{\dfrac{2(\gamma-1)}{(\gamma+1)}}, \; R\left(\xi_{Д.В.}\right) = \dfrac{(\gamma+1)}{\gamma}, \\ P\left(\xi_{Д.В.}\right) = c_1 R^{\gamma}(\xi_{Д.В.}), \; \xi_{Д.В.} = \sqrt{2\left(\gamma^2-1\right)}, \; c_1 = 2(\gamma-1)\left(\dfrac{\gamma}{\gamma+1}\right)^{\gamma}. \end{cases} \tag{9}$$

Для слабого разрыва параметры ПД имеют следующий вид:

$$\begin{cases} U\left(\xi_{C.P.}\right) = 0, \; R\left(\xi_{C.P.}\right) = \left[\left(\xi_{C.P.} - U(\xi_{C.P.})\right)^2 / \left(c_1\gamma\right)\right]^{\frac{1}{\gamma-1}}, \\ P\left(\xi_{C.P.}\right) = c_1 R^{\gamma}(\xi_{C.P.}), \; c_1 = 2(\gamma-1)\left(\dfrac{\gamma}{\gamma+1}\right)^{\gamma}. \end{cases} \tag{10}$$

При подстановке значений функций-представителей скорости, плотности и координаты в точке слабого разрыва из системы (10) в систему уравнений (8), возникает неопределенность вида $0/0$.

В то время, как, при подстановке соответствующих значений в точке на фронте ДВ из системы (9) в систему уравнений (8), получается $+\infty$.

Решение в области III известно. Таким образом, интерес представляет поведение решения в области II. Необходимо отметить, что применение численных методов для решения системы уравнений (8) напрямую не представляется возможным, поскольку границы области являются особыми точками.

В связи с этим, необходимо выполнить разложение вблизи особых точек и получить приближенное решение.

Поведение решения вблизи слабого разрыва $\xi = \xi_{C.P.}$

Рассматривается левая граница II области, вблизи слабого разрыва $\xi_{C.P.}$:

$$\begin{aligned} \xi = \xi_{C.P.} + \Delta\xi, \; U(\xi) = U\left(\xi_{C.P.}\right) + \Delta U, \\ R(\xi) = R\left(\xi_{C.P.}\right) + \Delta R. \end{aligned} \tag{11}$$

Причем $\Delta\xi / \xi_{C.P.} << 1$, $\Delta U / U\left(\xi_{C.P.}\right) << 1$, $\Delta R / R\left(\xi_{C.P.}\right) << 1$.

Подставив (11) в систему уравнений (8), применяя разложение в ряд вида:

$$\left(1+x\right)^{\alpha} \approx 1 + \alpha x, \; x \to 0 \tag{12}$$

и, опуская члены более высокого порядка малости, получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \Delta U' = \dfrac{2\Delta U}{\xi_{C.P.}\left[2\left(\Delta\xi - \Delta U\right)/\xi_{C.P.} - (\gamma-1)\Delta R / R\left(\xi_{C.P.}\right)\right]}, \\ \Delta R' = \xi_{C.P.} \cdot R\left(\xi_{C.P.}\right) / \left(c_1\gamma R^{\gamma-1}\left(\xi_{C.P.}\right)\right)\Delta U'. \end{cases} \tag{13}$$

Решение системы уравнений (13) имеет вид:

$$\Delta\xi = \left[1 + \frac{\xi_{C.P.}^2(\gamma-1)}{2c_1\gamma R^{\gamma-1}(\xi_{C.P.})}\right]\Delta U \ln\left(\frac{C_{\text{int}1}}{\Delta U}\right),$$
$$\Delta R = \frac{R(\xi_{C.P.})\xi_{C.P.}}{c_1\gamma R^{\gamma-1}(\xi_{C.P.})}\Delta U + C_{\text{int}2}. \quad (14)$$

В силу того, что при $\Delta U \to 0$, $\Delta\xi \to 0$ и $\Delta R \to 0$ видно, что $C_{\text{int}2} = 0$.

Таким образом, полученное решение (14) вблизи слабого разрыва $\xi_{C.P.}$ можно использовать в качестве приближения к граничному условию на левой границе II области при численном интегрировании системы уравнений (8).

Поведение решения вблизи фронта детонационной волны $\xi = \xi_{Д.В}$

Рассматривается правая граница II области, вблизи фронта детонационной волны $\xi_{Д.В.}$:

$$\xi = \xi_{Д.В.} + \Delta\xi,\ U(\xi) = U(\xi_{Д.В.}) + \Delta U,$$
$$R(\xi) = R(\xi_{Д.В.}) + \Delta R. \quad (15)$$

Причем $\Delta\xi / \xi_{Д.В.} << 1$, $\Delta U / U(\xi_{Д.В.}) << 1$, $\Delta R / R(\xi_{Д.В.}) << 1$.

Подставив (15) в систему уравнений (8), применяя разложение в ряд вида (12) и, опуская члены более высокого порядка малости, получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \Delta U' = -\dfrac{2U(\xi_{Д.В.})}{B(\Delta U - \Delta\xi) + C\Delta R}, \\ \Delta R' = \alpha\Delta U', \end{cases} \quad (16)$$

где

$$B = \frac{2\xi_{Д.В.}}{(\xi_{Д.В.} - U(\xi_{Д.В.}))},\ C = \frac{\xi_{Д.В.}(\gamma-1)}{R(\xi_{Д.В.})},$$
$$\alpha = \frac{R(\xi_{Д.В.})(\xi_{Д.В.} - U(\xi_{Д.В.}))}{c_1\gamma R^{\gamma-1}(\xi_{Д.В.})}.$$

Решение системы уравнений (16) имеет вид:

$$\begin{cases} \Delta\xi = C_{\text{int}1}\exp\left(\dfrac{B}{2U(\xi_{Д.В.})}\Delta U\right) + \left(1 + \dfrac{\alpha C}{B}\right)\Delta U + \dfrac{2U(\xi_{Д.В.})(B+\alpha C)}{B^2}, \\ \Delta R = \alpha\Delta U + C_{\text{int}2}. \end{cases} \quad (17)$$

В силу того, что при $\Delta U \to 0$, $\Delta\xi \to 0$ и $\Delta R \to 0$ видно, что $C_{\text{int}2} = 0$, $C_{int1} = -2U(\xi_{Д.В.}) \times \times (B + \alpha C) / B^2$

Таким образом, полученное решение (17) вблизи фронта ДВ можно использовать в качестве приближения к граничному условию на правой границе II области при численном интегрировании системы уравнений (8).

Численное интегрирование системы обыкновенных дифференциальных уравнений

Расчет «справа налево»

При расчете «слева направо» необходимо с высокой точностью подбирать две константы методом «пристрелки», а именно – точку слабого разрыва $\xi_{C.P.}$ и константу интегрирования $C_{\text{int}1}$. Такой расчет предполагает ресурсоемкие вычисления. Поэтому целесообразно провести численное интегрирование «справа налево», так как решение в данном случае зависит только от выбора начального приближения ΔU. Интегральная кривая рассчитывалась, начиная с «правого» граничного условия – выражения (9, 15, 17) и заканчивая «левым» граничным условием – выражение (10).

Для решения системы (8) применялся многошаговый метод Адамса – Башворта – Мултона переменного порядка класса предиктор – корректор. Это адаптивный метод, который может обеспечить высокую точность решения [9].

Основные параметры, используемые в расчете представлены в табл. 1.

Для функции-представителя скорости на фронте ДВ $U(\xi_{Д.В.})$ значение поправки ΔU варьировалось в пределах $\Delta U = -(1\cdot10^{-1} \div 1\cdot10^{-7})$ с шагом $\delta = 0{,}1$.

На рис. 3 показаны графики сходимости расчетов. На рис. 3а показан график зависимости полученного в результате расчета значения $\xi_{C.P.}$ в точке слабого разрыва от значения поправки ΔU для функции представителя скорости на фронте ДВ в полулогарифмическом масштабе.

Таблица 1

Параметры, задаваемые в расчете «справа налево»

Относительная точность	Абсолютная точность	Максимальный шаг	Начальный шаг	Порядок метода
$1\cdot10^{-10}$	$1\cdot10^{-10}$	$-1\cdot10^{-7}$	$-1\cdot10^{-10}$	5

Исходя из рис. 3а видно, что при ΔU = 0,001 достигается сходимость и дальнейшее уменьшение значения поправки ΔU нецелесообразно. Таким образом, для случая сферической детонации получено значение $\xi_{C.P.}$ = 1,820148. Стоит отметить, что в работе [10] приводится значение $\xi_{C.P.}$ = 1,8202.

Графики зависимости функций-представителей скорости U и плотности R от безразмерной координаты ξ представлены на рис. 4.

Расчет «слева направо»

В качестве проверки полученного в расчете «справа налево» значения $\xi_{C.P.}$ в точке слабого разрыва был проведен расчет «слева направо». Краевая задача с граничными условиями «слева» – выражения (10, 11, 14) и «справа» – выражение (9) решалась методом «пристрелки», путем задания значения $\xi_{C.P.}$ в точке слабого разрыва и константы интегрирования C_{int1} из разложения (26).Для решения системы (16), как и в расчете «справа налево», применялся многошаговый метод Адамса – Башворта – Мултона.

Основные параметры, используемые в расчете «слева направо» представлены в табл. 2.

В качестве начального приближения были выбраны следующие параметры:

– $\Delta U = 1\cdot 10^{-10}$ – добавка к начальному условию для функции представителя скорости;

– C_{int1} = 0,5025 – начальное приближение для константы интегрирования;

– $\delta C_{\text{int1}} = 1\cdot 10^{-4}$ – начальное приращение для константы интегрирования.

Таблица 2

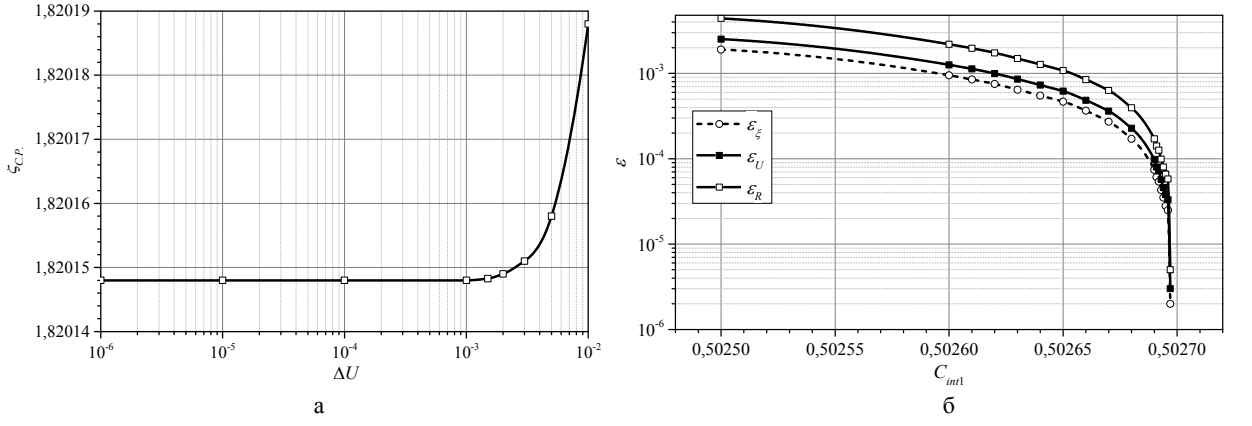
Параметры, задаваемые в расчете «слева направо»

Относительная точность	Абсолютная точность	Максимальный шаг	Начальный шаг	Порядок метода
$1\cdot 10^{-15}$	$1\cdot 10^{-15}$	$1\cdot 10^{-7}$	$1\cdot 10^{-15}$	5

График зависимости относительной точности ε от константы интегрирования C_{int1} в полулогарифмическом масштабе представлен на рис. 3б.

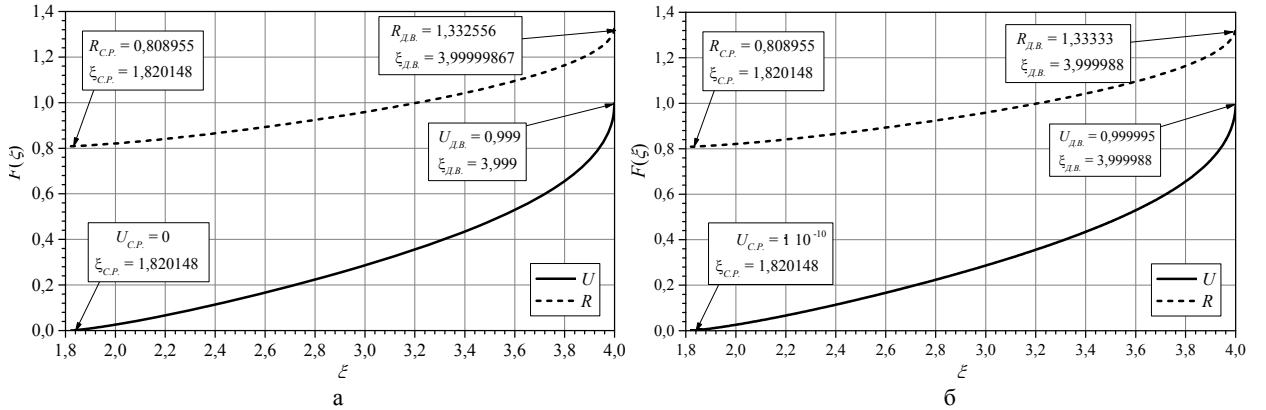
Из рис. 3б видно, что интегральная кривая сходится при $C_{\text{int1}} = 0{,}502698$ с точностью $\varepsilon_U\left(C_{\text{int1}}\right) = 5\cdot 10^{-6}$, $\varepsilon_R\left(C_{\text{int1}}\right) = 2\cdot 10^{-6}$, $\varepsilon_\xi\left(C_{\text{int1}}\right) = 3\cdot 10^{-6}$.

Графики зависимости функций-представителей скорости U и плотности R от безразмерной координаты ξ в случаях расчета «справа налево» и «слева направо» представлены на рис. 4а и рис. 4б. Из рис. 4а и рис. 4б также видно, что интегральные кривые функций-представителей плотности $R(\xi)$ и скорости $U(\xi)$ в расчетах «справа налево» и «слева направо» совпадают.



а б

Рис. 3. Графики сходимости расчетов: а – зависимость точки слабого разрыва $\xi_{C.P.}$ от поправки для безразмерной скорости ΔU; б – зависимость относительной точности ε от константы интегрирования C_{int1}



а б

Рис. 4. Графики зависимости функций-представителей скорости $U(\xi)$ и плотности $R(\xi)$: а – расчет «справа налево»; б – расчет «слева направо»

Апробация пакета программ «DIADA»

В данном разделе приведены результаты апробации пакета программ «DIADA» [7] на примере двух задач: 1) инициирование плоской ДВ в газе у закрытого конца трубы; 2) решенная задача об инициировании сферической ДВ из точки начального воспламенения газа.

Данный пакет программ предназначен для расчета одномерных, двумерных и трехмерных задач газовой динамики с выделением детонационных и ударных волн. В качестве базовой схемы в этом пакете программ используется разностная схема Годунова [11–12]. Это монотонная разностная схема первого порядка точности.

Задача 1. Движение плоской детонационной волны

Аналитическое решение задачи в представляющей интерес II области выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} U_{II}(\xi) = \dfrac{2}{\gamma+1}\left(\xi - \dfrac{1}{2}\sqrt{2\left(\gamma^2-1\right)}\right), \\ P_{II}(\xi) = 2\left(\gamma-1\right)\left(\dfrac{\gamma}{\gamma+1}\right)^{\gamma} R^{\gamma}(\xi), \\ R_{II}(\xi) = \left(2\left(\gamma-1\right)\right)^{\frac{1}{\gamma-1}}\left(\gamma+1\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}\gamma^{-\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}\left(\xi - U(\xi)\right)^{\frac{2}{\gamma-1}}. \end{cases} \quad (18)$$

Для продуктов взрыва использовалось уравнение состояния идеального газа с показателем адиабаты $\gamma = 3$. Исходная плотность взрывчатого вещества $\rho_0 = 1{,}75$ г/см^3, энерговыделение $q = 5{,}24$ кДж/г. Расчет одномерной задачи проводился на сетке, состоящей из $N = 1000$ элементов. Графики полученных зависимостей параметров газа (массовой скорости газа u, плотности ρ и давления p) от координаты xвдоль оси трубы на различные моменты времени t показаны на рис. 5 (рис. 5а и 5б и 5в соответственно). На рис. 5 также нанесено точное аналитическое решение. Исходя из рис. 5 видно хорошее согласие решения, полученного с помощью пакета программ «DIADA»[7], с точным аналитическим решением поставленной задачи.

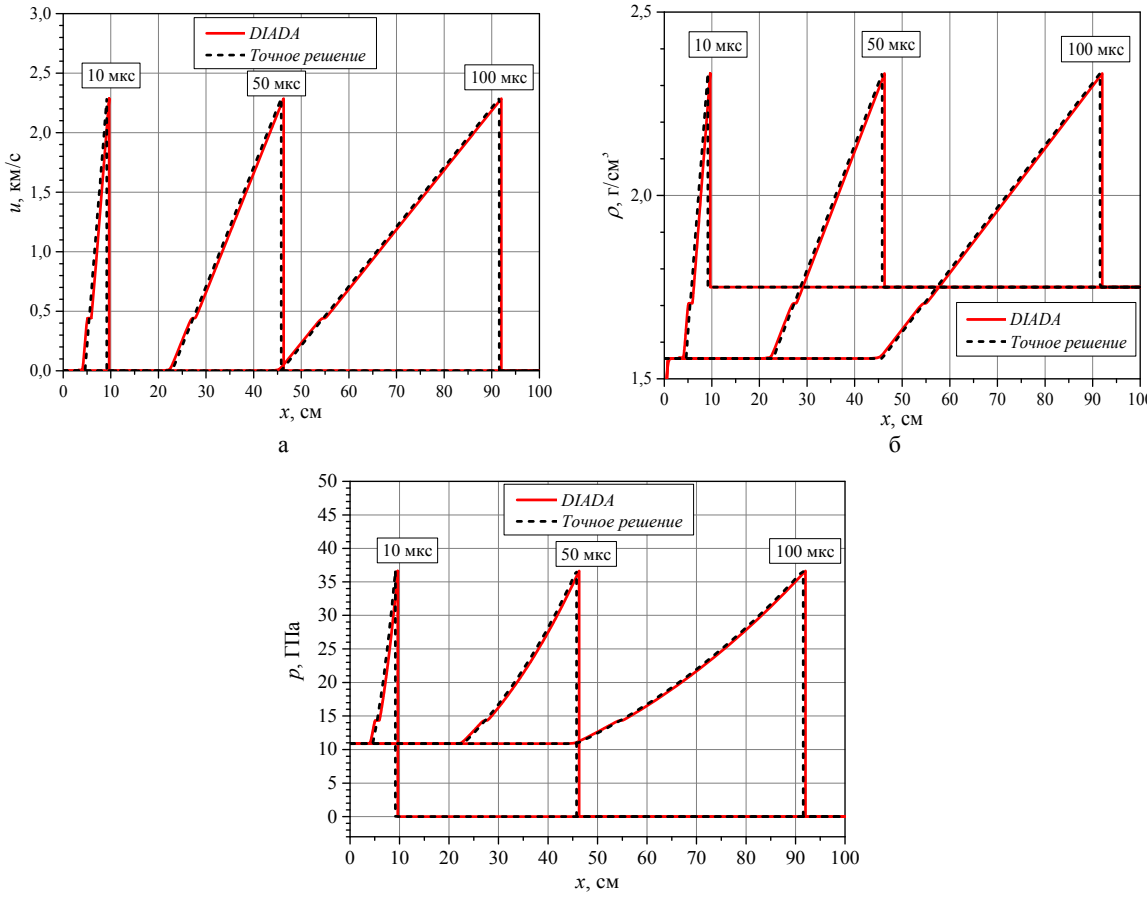


Рис. 5. Графики зависимости параметров газа от координаты вдоль оси трубы на различные моменты времени: а – массовая скорость газа u от координаты x; б – плотность газа ρ от координаты x; в – давление газа p от кооридинаты x

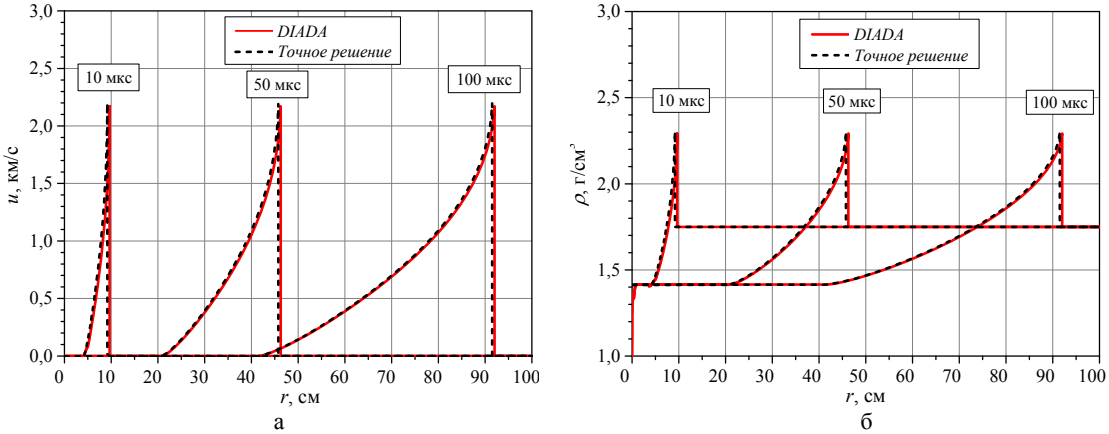


Рис. 6. Графики зависимости параметров газа от радиуса на различные моменты времени: а – массовая скорость газа u от радиуса r; б – плотность газа ρ от радиуса r

Задача 2. Движение сферической детонационной волны

Для расчета сферической детонации использовались те же параметры, что и при моделировании плоской ДВ. Графики полученных зависимостей параметров газа (массовой скорости газа u и плотности ρ от радиуса r) на различные моменты времени t показаны на рис. 6 (рис. 6а и 6б соответственно). На рис. 6 также нанесено точное ($\sim 10^{-6}$) автомодельное решение. Исходя из рис. 6 видно хорошее согласие результатов, полученных в пакете программ «DIADA» с точным численным решением.

Заключение

Приведено подробное изложение вопросов, связанных с решением задачи о распространении сферической детонационной волны из точки начального воспламенения газа, как из центра.

Рассмотрена методика сведения системы уравнений газовой динамики в частных производных к дифференциальным уравнениям первого порядка, удобным для численного интегрирования.

Выполнено разложение уравнений и получено приближенное решение в окрестности особых точек.

Проведено численное интегрирование указанных уравнений и получено численное решение с относительной точностью $\sim 10^{-6}$.

Получено более точное, по сравнению с другими источниками, значение для безразмерной координаты в точке слабого разрыва $\xi_{C.P.} = 1{,}820148$.

Проведено сравнение результатов численного моделирования распространения плоской и сферической детонационной волны в пакете программ «DIADA» с соответствующими точными решениями. Показано хорошее согласие результатов численного решения с точным.

Результаты данной работы могут быть применимы для апробации различных расчетных методик и комплексов программ при численном моделировании детонации, а также служить пособием для студентов и аспирантов, изучающих вопросы детонации.

Литература

1. Ramsden S. A., Davies W. E. // Phys. Rev. let. 1964. Vol. 13. P. 227–229.

2. Ramsden S. A., Savic P. // Nature. 1964. Vol. 203. P. 1217–1219.

3. Зельдович Я. Б. О распределении давления и скорости в продуктах детонационного взрыва, в частности, при сферическом распространении детонационной волны // ЖЭТФ. 1942. Т. 12, № 9. С. 389.

4. Ландау Л. А., Лифшиц Е. М. Механика сплошных сред. М.: ГТТИ, 1954.

5. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М: 1966. С. 688.

6. Райзер Ю. П. Введение в гидрогазодинамику и теорию ударных волн для физиков. Учебное пособие. Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2011. С. 432.

7. Величко О. М., Губкова Г. И., Дерюгин Ю. Н. и др. Пакет программ для решения многомерных задач газовой динамики разностным методом Годунова / Конференция «Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения» // Сб. мат. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2000. С. 21–29.

8. Ландау Л. Д. Об изучении детонации конденсированных взрывчатых веществ (Совместно с Станюковичем К.П.) // М.: ДАН СССР, 1945. Т. 46. С. 399.

9. Дьяконов В. П. MATLAB. Полный самоучитель. М.: ДМК Пресс, 2012. С. 768.

10. Сучков В. А., Шнитко А. С., Исламова Л. Р. О движении газа за расходящейся детонационной волной от точки на свободной поверхности / Межд. конф. «Забабахинские научные чтения» // Сб. мат. Снежинск: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ», 2005.

11. Годунов С. К. Разностный метод численного расчета разрывных решений уравнений гидродинамики // Матем сб. 1959. Т. 47(89), № 3. С. 271–306.

12. Годунов С. К., Забродин А. А., Иванов М. Я., Крайко А. Н., Прокопов Г. П. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976. С. 400.

МОДЕЛИРОВАНИЕ В ПАКЕТЕ ПРОГРАММ «ЛОГОС» ТЕЧЕНИЯ СТРУЙ ДВИГАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ

О. О. Осколкова, С. В. Аксенов, Д. А. Корчажкин, А. Ю. Пузан

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Газодинамика течения струй двигательных установок (далее – ДУ) во время старта ракет-носителей (далее – РН) сопровождается значительными ударно-волновыми воздействиями на сооружения стартового комплекса, в результате которых последние подвергаются интенсивному силовому и тепловому воздействию. В данном случае структура струйных течений представляет собой систему волн разрежения и скачков уплотнения (особенно интенсивных на начальном участке струи). При этом происходит турбулентное смешение газов истекающей струи с воздухом, приводящее к постепенному выравниванию давления в струе и догоранию топлива.

Необходимость снижения нагрузок на РН определяет облик стартового сооружения, обеспечивающего отвод высокотемпературных газов от изделия. В связи с этим выдвигаются повышенные требования к экспериментальным и расчетно-теоретическим методам, используемым на этапе наземной отработки газодинамики старта РН, что подразумевает большой объем экспериментальных исследований на разномасштабных моделях. Однако при проведении испытаний трудно учесть степень влияния всех факторов на процесс. В связи с этим наряду с экспериментальной отработкой изделий ракетно-космической техники в настоящее время широко применяются методы математического моделирования [1, 2], которые позволяют уменьшить объем экспериментальных исследований, тем самым заметно сокращая сроки проектирования изделия и конечную стоимость проекта.

Актуальные задачи газодинамики струйных течений

К актуальным задачам исследований газодинамики струйных течений в ракетно-космической отрасли относят моделирование старта РН с учетом ударно-волновых, акустических и тепловых воздействий струй ДУ на ракету и пусковые установки, моделирование разделения ступеней с учетом взаимодействия одноблочной и многоблочной струй с преградами, а также с учетом газодинамических и тепловых нагрузок от воздействия струй ДУ на отражатель отделяемого блока при «горячем» разделении ступеней.

Моделирование струй ДУ РН предполагает разделение на ряд отдельных подзадач со своими характерными особенностями формирования струй и учета моделируемых процессов. К таким задачам относят:

– течение газа в соплах и предсопловых объемах;

– формирование газодинамических разрывов на кромке сопла и их распространение в неравномерных течениях;

– распространение пульсаций по неравномерным потокам и взаимодействие акустических волн с газодинамическими разрывами;

– учет процессов догорания компонентов топлива;

– натекание на преграды, расположенные под разными углами к оси струи;

– физико-химические реакции в горючих смесях;

– теплообмен между потоками и твердыми поверхностями.

Проблемой, вызывающей наибольшие трудности при численном исследовании струйных течений, является моделирование турбулентной вязкости, посредством которой вычисляются осредненные параметры турбулентного потока. Не существует универсальной математической модели для расчет турбулентной вязкости, поэтому для выбора оптимальной модели турбулентности для данного класса задач необходимо проведение многочисленных расчетных исследований и сравнение полученных результатов с экспериментальными данными.

Моделирование струй двигательных установок в пакете программ «ЛОГОС»

В данной работе приводятся результаты численного исследования возможностей пакета программ «ЛОГОС» [3, 4] (далее – ПП ЛОГОС) разработки ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» по моделированию течений струй ДУ РН. В качестве критерия корректности результатов расчетов в ПП ЛОГОС приводится их сравнение с экспериментальными данными из открытых источников.

Для расчета струйных течений ПП ЛОГОС располагает следующими функциональными возможностями:

– наличие ряда моделей турбулентности (SA, SST, RSM, LES, DDES, IDES, EDES) [4];

– учет физико-химических реакций (модель распада вихрей Eddy Break-up, модель диссипации вихрей Eddy Dissipation Concept) [5];

– автоматическая адаптация расчетной сетки под особенности решения для более точного описания течений в присутствии скачков давления и плотности [6], а также перепадов числа Маха;

– использование технологии проведения расчетов на сетках с перекрытием типа «Химера» [7] для учета подвижных элементов конструкции при разделении ступеней РН.

При моделировании газодинамики разделения ступеней важно корректно описывать взаимодействие струй продуктов сгорания ракетного двигателя с отражателем отделяемого блока. В данной работе приведены результаты расчетов в ПП ЛОГОС модельной задачи по взаимодействию одноблочных и многоблочных газодинамических струй с преградой. Исследовалось влияние различных моделей турбулентности и применения технологии адаптации расчетной сетки к особенностям решения на итоговое распределение давления по преграде.

Стоит отметить, что выбор расчетной сетки для данной задачи был обусловлен проведенными исследованиями на сеточную сходимость. Для этого была проведена серия расчетов на сеточных моделях содержащих 3,16; 7; 16,5 и 20 млн. ячеек. Расчеты по исследованию сеточной сходимости проводились с использованием модели турбулентности SST. Полученные результаты позволили сделать вывод, что сеточная сходимость достигнута для модели размерностью 16,5 млн. ячеек, однако очевидно, что увеличение размерности сеточной модели неизбежно приводит к увеличению потребляемых вычислительных ресурсов. Для частичного решения данной проблемы авторами было решено воспользоваться технологией адаптации расчетной сетки под особенности решения. Из базовой сеточной модели размерностью 3,16 млн. ячеек после использования адаптации была получена сетка с общим количеством расчетных объемов 12,5 млн. При этом результаты, полученные на сетках 12,5 и 16,5 млн. ячеек, согласуются с хорошей точностью, поэтому для дальнейших расчетов использовалась адаптированная к особенностям решения сеточная модель размерностью 12,5 млн. ячеек.

В рамках исследования влияния различных моделей турбулентности на итоговое распределение давления по преграде были проведены расчеты с моделями турбулентности SST и SA. На рис. 1 приведены результаты расчетов моделирования взаимодействия многоблочных струй с преградой с использованием моделей турбулентности SA и SST. На основе полученных результатов можно сделать вывод, что более согласованные результаты с экспериментом дает модель турбулентности SST на сеточной модели, полученной в результате применения технологии адаптации сеточной модели к особенностям решения.

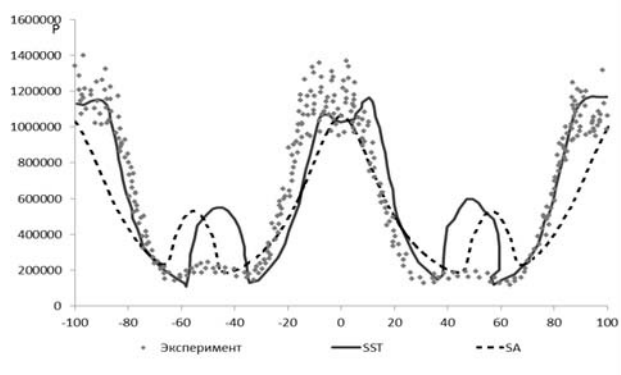
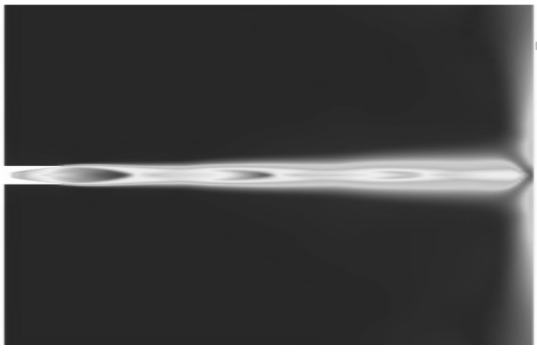
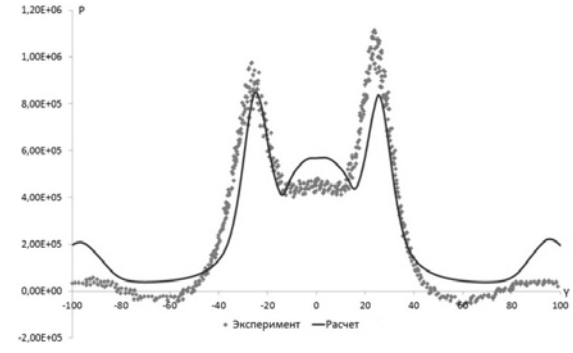


Рис. 1. Графики распределения давления по преграде многоблочной компоновки с моделями турбулентности SST и SA в сравнении с экспериментом

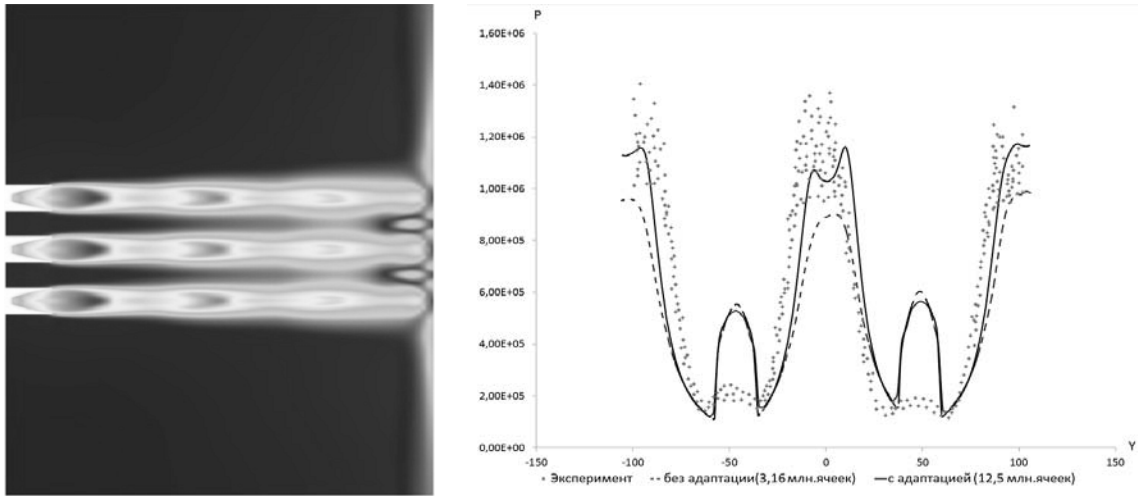
На рис. 2, 3 представлены поля распределения числа Маха в продольном сечении расчетной области, а так же графики распределения давления по преграде, полученные в результате расчетов в ПП ЛОГОС и экспериментально [8] для одноблочной и многоблочной компоновок ДУ.





а б

Рис. 2. Одноблочная компоновка ДУ: а – распределение числа Маха в продольном сечении, б – графики распределения давления по преграде



а б

Рис. 3. Многоблочная компоновка ДУ: а – распределение числа Маха в продольном сечении, б – графики распределения давления по преграде

По приведенным на рис. 2б, 3б данным видно, что графики распределения давления по преграде, полученные в результате расчетов в ПП ЛОГОС, лежат достаточно близко к экспериментальным точкам. Однако для случая с многосопловой компоновкой ДУ видно формирование расчетных локальных пиков давления, не подтверждающихся экспериментально. В случае трехблочного истечения взаимодействующие сверхзвуковые струи по сравнению с одиночной струей имеют более сложную структуру течения, характеризующуюся появлением дополнительных скачков уплотнения, зон разрежения, и обратных токов.

Высокоэнергичные струйные течения, создаваемые ДУ, оказывают существенное силовое и тепловое воздействие на газоотводящие устройства при старте РН. Такое воздействие устанавливается газодинамической схемой старта и может превышать допустимо возможное, поэтому для выбора схемы старта необходимо проведение моделирования затопленных струй ДУ, характеризующихся сильной пространственной неоднородностью полей скоростей, давлений и температур, а так же наличием системы скачков уплотнения, турбулентных сдвиговых слоев, догоранием топлива [9]. В связи с этим были проведены исследования характеристик струйных течений и их воздействий на преграду в диапазоне от 2,5 до 5 чисел Маха на срезе сопла. В качестве рабочего тела использовалась горючая смесь двигателя ВИК-2Д, с температурой на срезе сопла в различных постановках в диапазоне от 2250 до 2856 К. На рис. 4 представлен график распределения относительного давления на оси струи, полученный в результате расчетов в ПП ЛОГОС в сравнении с экспериментальными данными.

Ниже на рис. 5, 6 приводятся результаты одного из расчетных режимов течения сверхзвуковых неизобарических холодных струй при температуре 300 К и числе Маха 3,3 на режимах недорасширения (n_a = 1,5) и перерасширения (n_a = 0,5). Здесь параметр безразмерный n_a численно равен отношению давления на срезе сопла к давлению окружающей среды.

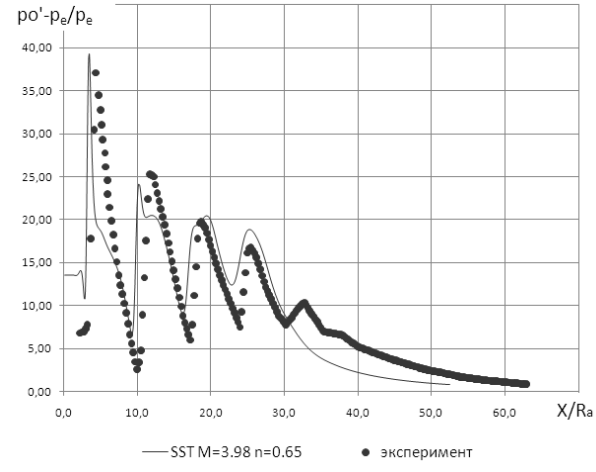
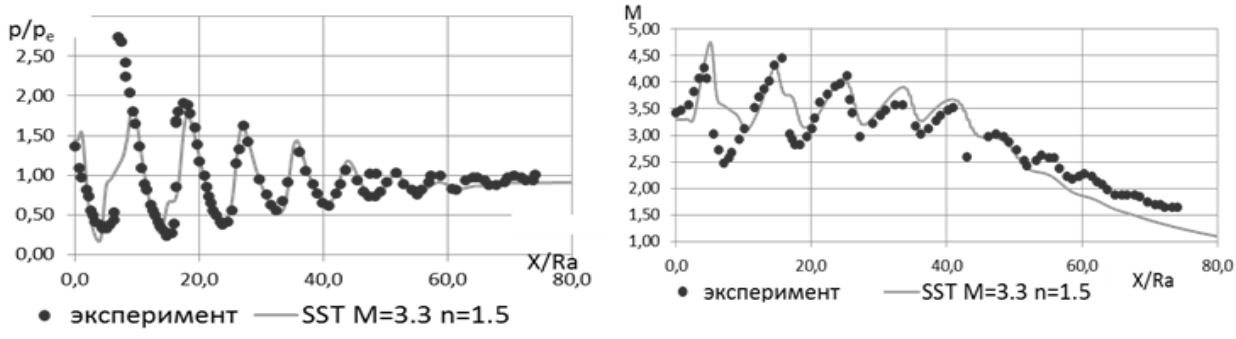


Рис. 4. График распределения давления на оси струи в задаче истечения неизобарической сверхзвуковой горячей струи в затопленное пространство

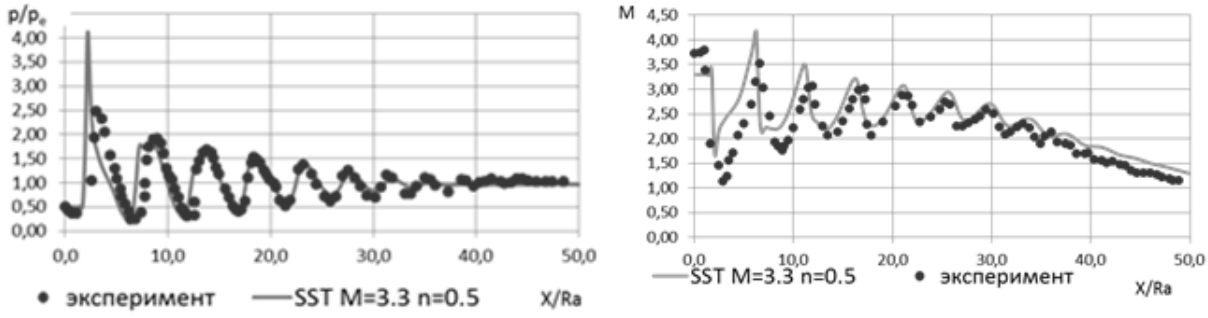
Из приведенных на рис. 5 и 6 графиков видно, что полученные в ПП ЛОГОС результаты качественно согласуются с экспериментальными данными, количество скачков уплотнения, полученных экспериментальным и расчетным путем, совпадает.

Газоотводящие элементы стартового сооружения, находящиеся в зоне непосредственного воздействия высокотемпературных струй ДУ, подвержены значительным тепловым газодинамическим нагрузкам. Удельные тепловые потоки могут достигать 8000–10000 ккал/м^{2}с при давлениях до 20 кг/см^2. Такая нагрузка может привести к недопустимой



а б

Рис. 5. Истечение неизобарической сверхзвуковой холодной струи в затопленное пространство (n_a = 1,5):
а – давление на оси струи, б – число Маха на оси струи



а б

Рис. 6. Истечение неизобарической сверхзвуковой холодной струи в затопленное пространство (n_a = 0.5):
а – давление на оси струи, б – число Маха на оси струи

деформации и уносу материала покрытия газоотводящих устройств, поэтому при создании стартовых сооружений во время выбора материала и толщин покрытия газоотводящих устройств стоит обратить особое внимание на правильное прогнозирование теплосиловых нагрузок, а также на выбор методов и средств для снижения этих нагрузок [10]. В связи с этим было проведено численное моделирование по взаимодействию одиночных высокотемпературных затопленных струй ракетных двигателей с преградами, расположенными под углами 30 и 90° к оси струи. Результаты расчетов в ПП ЛОГОС показали хорошее согласие с экспериментальными данными [11]. Отклонение расчетных данных от эталонных значений не превышает 5 %.

В рамках исследования функциональных возможностей ПП ЛОГОС в интересах численного моделирования течения газодинамических струй ДУ РН также были проведены тестовые расчеты следующих задач:

– моделирование взаимодействия газодинамической струи с плоской наклонной преградой. Расчеты проводились для трех постановок задач с различными вариантами наклона преграды относительно оси сопла: 0; 38,5; 50,5°;

– моделирование однофазного течения равновесного состава продуктов сгорания на многоблочных неструктурированных сетках с перекрытием с учетом взаимного движения блоков при разделении ступеней на примере задачи о разделении ступеней трехступенчатой ракеты VLM-1 [12].

Заключение

В интересах снижения ударно-волновых, тепловых, газодинамических и акустических нагрузок на РН при старте, важной и актуальной является задача расчета газодинамики струйных течений ДУ.

В данной работе приведены результаты численного моделирования характерных задач течения струй ДУ в ПП ЛОГОС, обладающим рядом функциональных возможностей, позволяющих проводить расчеты данного класса задач.

Представлены результаты численного моделирования следующих задач:

– истечение неизобарических сверхзвуковых холодных и горячих струй в затопленное пространство;

– натекание сверхзвуковых холодных и горячих газовых струй на преграды различных конфигураций в условиях экспериментальных стендов;

– разделение ступеней с учетом газодинамических и тепловых нагрузок от воздействия струй двигательной установки на отражатель отделяемого блока; разделение ступеней РН, с учетом взаимного движения первой и второй ступеней.

При решении указанных задач использовались различные модели турбулентности, были проведены расчеты на сеточную сходимость, проведены расчеты с использованием функционального блока адаптации сеточной модели к особенностям решения.

Результаты моделирования течения струй двигательных установок в ПП ЛОГОС сравнивались с экспериментальными данными из открытых источников. Анализ показал, что полученные в расчетах данные качественно хорошо согласуются с экспериментальными данными, однако наблюдаются некоторые количественные отличия расчетных и экспериментальных данных. Проведенные расчетные исследования позволяют говорить о применимости ПП ЛОГОС для расчета течений струй двигательных установок РН.

Литература

1. Авдуевский В. С., Иванов А. В., Карпман И. М., Трасковский В. Д., Юделович М. Я. Структура турбулентных недорасширенных струй, вытекающих в затопленное пространство и спутный поток // Изв. АН СССР, МЖГ. 1972. № 3. С. 15–29.

2. Глазнев В. Н., Запрягаев В. И., Усков В. Н. и др. Струйные и нестационарные течения в газовой динамике. Под ред. Гапонова С. А. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000.

3. Аксенов С. В., Дьянов Д. Ю., Жучков Р. Н., Зеленский Д. К., Иванов К. В., Козелков А. С., Корчажкин Д. А., Лашкин С. В., Потехин А. Л., Пузан А. Ю., Саразов А. В., Соловьев А. Н., Циберев К. В. Использование многофункционального пакета программ ЛОГОС применительно к расчетам задач ракетно-космической отрасли на супер-ЭВМ / VII научно-техническая конференция молодых специалистов «Ракетно-космическая техника», 2015 // Сборник материалов. Вып. 1. С. 65–74.

4. Козелков А. С., Дерюгин Ю. Н., Зеленский Д. К., Полищук С. Н., Лашкин С. В., Жучков Р. Н., Глазунов В. А., Яцевич С. В., Курулин В. В. Многофункциональный пакет программ ЛОГОС: физико-математические модели расчета задач аэро-, гидродинамики и теплопереноса // Препринт 111–2013. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2013.

5. Magnussen B. F. On the structure of turbulence and a generalized concept for chemical reaction in turbulence flow // 19th American Institute of aeronautics and Astronautics Aerospace Science Meeting, 1981.

6. Мажукин В. И., Самарский А. А., Кастельянос О., Шапранов А. В. Метод динамической адаптации для нестационарных задач с большими градиентами //Матем. моделирование. 1993. Т. 5, № 4. С. 32–56.

7. Дерюгин Ю. Н., Саразов А. В., Жучков Р. Н. Особенности построения методики расчёта на сетках типа «Химера» для неструктурированных сеток // Математическое моделирование. 2017. Т. 29, № 2. С. 106–118.

8. Кудимов Н. Ф., Сафронов А. В., Третьякова О. Н. Прикладные задачи газодинамики и теплообмена в энергетических установках ракетной техники. М.: Изд-во МАИ, 2014.

9. Сафронов А. В., Хотулев В. А. Результаты экспериментальных исследований сверхзвуковых холодных и горячих струйных течений, истекающих в затопленное пространство // Космонавтика и ракетостроение.2009. Вып. 3(56). С. 15–23.

10. Сафронов А. В. Экспериментальное исследование силового и теплового воздействия на преграду при лобовом натекании на неё турбулентного струйного потока продуктов сгорания топлива // Космонавтика и ракетостроение. 1995. Вып. 3. С. 28–31.

11. Дядькин А. А., Луценко А. Ю., Назарова Д. К. Математическое моделирование обтекания тонкостенных конструкций в до- и трансзвуковом диапазоне скоростей // Научный вестник МГТУ ГА. 2016. № 233. С. 45–50.

12. Li Yi, Reimann Bodo, Eggers Thino. Numerical investigations on the aerodynamics of SHEFEX-III launcher // Acta Astronautica. 2014. Vol. 97.

ПЕРЕНОС НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА ЧЕРЕЗ ФОРМИРУЮЩИЙСЯ КЛАСТЕР РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В СУБМИКРОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУРАХ

А. А. Потехин, И. Ю. Забавичев, К. А. Насеткин, А. С. Пузанов

Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю. Е. Седакова», г. Нижний Новгород

Введение

В соответствии с дорожной картой развития приборов и систем, представленной институтом инженеров электротехники и электроники [1], одним из приоритетных направлений развития современной цифровой электроники, является уменьшение размеров рабочих областей элементов микросхем. Это приводит к усилению влияния неоднородности дефектообразования и ионизации при воздействии проникающих излучений [2].

В настоящее время накоплен обширный теоретический и практический материал по вопросам воздействия проникающих излучений на полупроводниковые структуры с характерными рабочими областями свыше 180 нм. Однако для элементов с меньшими характерными размерами рабочей области исследования их функционирования при воздействии проникающих излучений только начинаются.

Известно, что воздействие проникающих излучений приводит к образованию различного рода дефектов и ионизации полупроводника. В частности, при нейтронном облучении в результате развития каскада смещений атомов помимо точечных дефектов образуются разупорядоченные области – кластеры радиационных дефектов (КРД), состоящие из более мелких и плотных образований – субкластеров радиационных дефектов (СКРД). Такие объекты окружены пространственным зарядом и препятствуют движению электронов и дырок. При этом рассеяние носителей заряда, температура которых находится в равновесии с температурой кристаллической решетки, происходит на кластерах в целом, а горячих электронов и дырок – на отдельных СКРД.

При уменьшении активной области полупроводниковой структуры изменяется характер переноса носителей заряда в ней. При этом стоит отметить, что существенно меняется и набор факторов, влияющих на подвижность электронов и дырок в активной области. Для кремниевых структур с характерными размерами активных областей более 180 нм, реализация единичных СКРД слабо изменяла характеристики элемента в целом. При уменьшении размеров активной области до размеров, характерных для квазибаллистического пролета носителей заряда (16…150 нм в случае кремния [2]), уже отдельные реализации СКРД могут нарушить функционирование элемента.

Данная работа посвящена разработке моделей расчета параметров, влияющих на перенос носителей заряда в кремниевых полупроводниковых структурах с учетом наличия КРД для двумерного и трехмерного моделирования.

Оценка изменения температуры при образовании области разупорядочения

При рассмотрении задачи оценки изменения температуры кристалла, необходимо оценить характерные времена пролета первичного атома отдачи для оценки времени формирования разупорядоченных областей. При этом стоит учитывать, что времена, используемые при моделировании подобных структур физико-топологическими методами не превышают значений порядка 10^{-13} с, так как при меньших значениях времен не определено понятие температуры и нет возможности корректно задавать параметры, влияющие на результат моделирования.

Для оценки времени пролета первичного атома отдачи в структуре была проведена следующая оценка. Пусть первичный атом отдачи получил некоторую энергию E_1 при взаимодействии с нейтроном. Тогда можно допустить, что вся энергия, переданная первичному атому вследствие взаимодействия с нейтроном будет являться кинетической и ее можно выразить как $E_1 = \left(mv^2\right)/2$. Таким образом, можно найти примерное значение начальной скорости движущегося первичного атома отдачи. В дальнейшем, при взаимодействии с кристаллической решеткой он будет терять данную энергию, а как следствие, и скорость. В случае, если для оценки дефектообразования используется система моделирования TRIM [3], то можно получить координаты взаимодействия данного первичного атома отдачи с кристаллической решеткой, тем самым, найти пройденное расстояние r между взаимодействиями и грубо оценить время между соударениями. Просуммировав эти времена, получим общее время движения первичного атома отдачи для оценки времени образования разупорядоченных областей до начала фазы стабилизации и отжига дефектов. В рамках работы, данные были усреднены по 1000 реализациям структурных повреждений, полученных при помощи пакета моделирования TRIM. Результаты расчетов для

кремния при различных начальных энергиях первичного атома отдачи приведены в табл. 1.

Таблица 1

Время распространения первичного атома отдачи для различных энергий

Энергия первичного атома отдачи, кэВ	Время распространения первичного атома отдачи в структуре, с
10	$2{,}72 \cdot 10^{-13}$
50	$4{,}53 \cdot 10^{-13}$
100	$5{,}89 \cdot 10^{-13}$

Как известно из литературы [4, 5], температура разупорядоченной области непосредственно после взаимодействия первичного атома отдачи с решеткой полупроводника может составлять порядка 1300 °С, что будет существенно влиять на параметры структуры, такие как, к примеру, время релаксации энергии, теплопроводность, теплоемкость и т. д. В качестве оценки рассмотрим классическую задачу распространения тепла в сферических координатах [6]

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a^2 \Delta u \,, \qquad (2.1)$$

где u – температура, a – коэффициент температуропроводности, определяемый как $a^2 = k/(c \cdot \rho)$, k – теплопроводность, c – удельная теплоемкость, ρ – плотность.

Начальные условия для решения задачи Коши данного уравнения будут представлены как $u(r,0) = Q$, где Q – энергия, выделившаяся в результате взаимодействия с кристаллической решеткой первичного атома отдачи.

Общим решением для подобных задач является решение в виде функции Грина [6]

$$G(r,t) = \frac{Q}{c\rho}\left(\frac{1}{2\sqrt{\pi a^2 t}}\right)^3 e^{-\frac{r^2}{4a^2 t}} \qquad (2.2)$$

Исходя из характерных времен, используемых для моделирования полупроводниковых приборов, построим зависимость температуры от расстояния от точки энерговыделения для трех характерных времен: 10^{-13} с, 10^{-12} с, 10^{-11} с, рис. 1.

Из рис. 1 видно, что при временах порядка 10^{-13} с локальная температура полупроводника может достигать значений порядка 1000 °С. Однако, на временах порядка 10^{-12}…10^{-11} с дополнительный разогрев падает до значений порядка десятков-единиц градусов и им можно пренебречь при расчетах на подобных временах. Также стоит учитывать, что точность определения макропараметров полупроводника и их калибровка на модели с учетом радиационного воздействия является достаточно грубой, так как

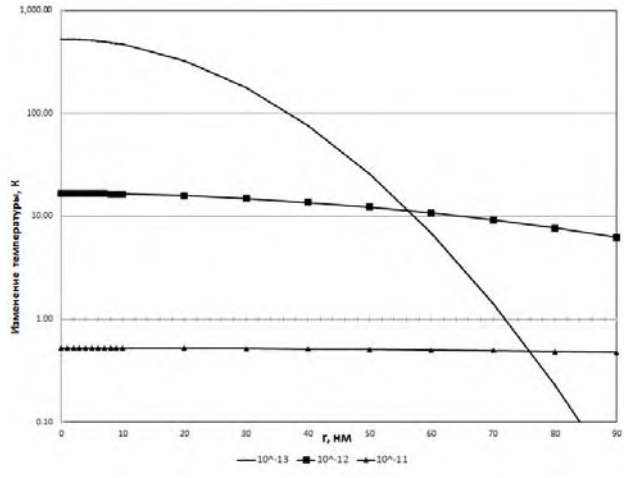


Рис. 1. Изменение температуры при образовании разупорядоченной области (модельная задача)

погрешности определения экспериментальных флюенсов, а как следствие и данных, составляют порядка 20 % величины.

Диффузионная модель отжига радиационных дефектов

Для более полного учета внутренней структуры разупорядоченных областей необходим анализ как непосредственно размеров КРД и СКРД, так и моделирование процесса отжига, происходящего при стабилизации образовавшихся областей разупорядочения. При этом, стоит отметить, что точный учет данного процесса на данный момент дают только системы, связанные с методами молекулярной динамики [7]. Однако, для больших областей (размерами свыше 100×100×100 нм) данная задача с расчетными временами порядка 100 пс является исключительно ресурсоемкой (времена расчета порядка недели с использованием ресурсов суперкомпьютера «Лобачевский») и не может подходить для проведения оптимизационного моделирования в рамках оценки реакции перспективных гетеронаноструктур на воздействие проникающих излучений.

В качестве более простого и менее ресурсоемкого метода предлагается модель учета отжига дефектов на базе данных, получаемых в среде моделирования TRIM.

Данный пакет позволяет получить данные о непосредственном формировании разупорядоченных областей с конечными координатами смещенных атомов. Исходя из этих данных, а также данных о «разбегании» скоплений дефектов размером менее 5 нм с дальнейшим их преобразованием в точечные дефекты, либо рекомбинацией, возникает необходимость построения адекватной модели учета отжига дефектов с последующей оценкой пространственного распределения оставшихся КРД.

На данный момент существует несколько разновидностей алгоритмов кластеризации, основанных на оценке «похожести» сравниваемых объектов.

В качестве такого критерия для алгоритмов, связанных с кластеризацией статистических данных выступает среднее расстояние между объектами.

В данной работе в качестве алгоритма кластеризации был выбран так называемый алгоритм пространственной кластеризации с учетом плотности. Данный алгоритм имеет ряд преимуществ. В частности, он позволяет разделять расположенные близко области СКРД, а также устойчив к наличию удаленных точек (выбросов по расстоянию), соответствующих одиночным дефектам. Также для данного алгоритма нет необходимости в задании начального числа кластеров в области, так как для любой реализации областей разупорядочения это число является случайной величиной.

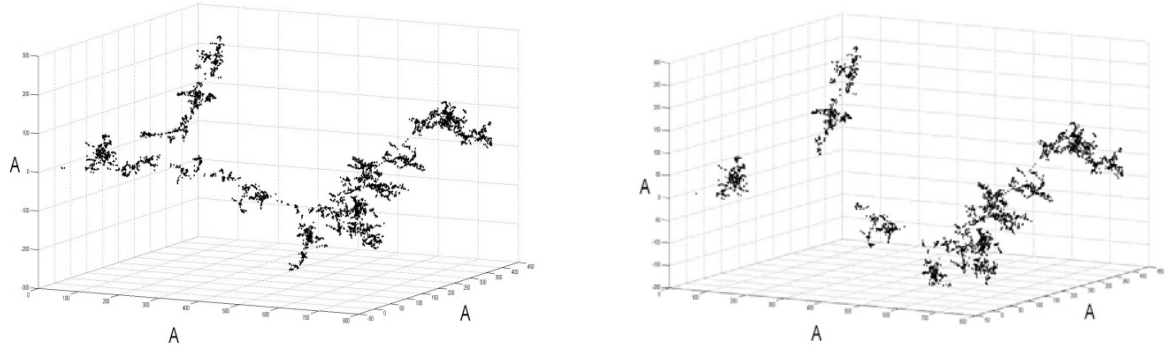
Рассмотрим более подробно алгоритм пространственной кластеризации с учетом плотности. На первом шаге входные данные оцениваются по наличию рядом «соседей» – объектов, находящихся не более чем на минимальном удалении от заданного объекта. Если число таких точек достигает величины, которая указана в качестве нижней границы для данного типа объектов, то точка считается принадлежащей кластеру. Точки, имеющие недостаточное количество соседей, считаются шумовой компонентой и исключаются из дальнейшего рассмотрения. После исключения шумовой компоненты производится кластеризация – оставшийся объем точек разделяется в соответствии со стандартным алгоритмом кластеризации по расстоянию. Результаты работы алгоритма приведены на рис. 2.

Как видно из рис. 2, все мелкие образования отожглись, тем самым произведен учет «разбегающихся» кластеров, а также дефектов, которые с большой долей вероятности проведут рекомбинацию.

Данный алгоритм был применен к различным одиночным реализациям, полученным в среде TRIM для различных энергий первичных атомов. Для каждой энергии были проведены по 100 реализаций каскадов смещений и результаты отжига были усреднены. В качестве начальных энергий первичных атомов отдачи были использованы следующие значения: 50 кэВ, 75 кэВ, 100 кэВ и 150 кэВ.

Для данных энергий был посчитан процент дефектов, исключаемых из рассмотрения в дальнейшем относительно первично образованных.

Как следует из рис. 3, процент отжигаемых дефектов в случае взаимодействия атома азота с структурой нитрида галлия стремится к 100 %. Это явле-



а б

Рис. 2. Результаты работы метода оценки отжига, основанного на алгоритме пространственной кластеризации с учетом плотности: а – до работы алгоритма; б – после работы алгоритма

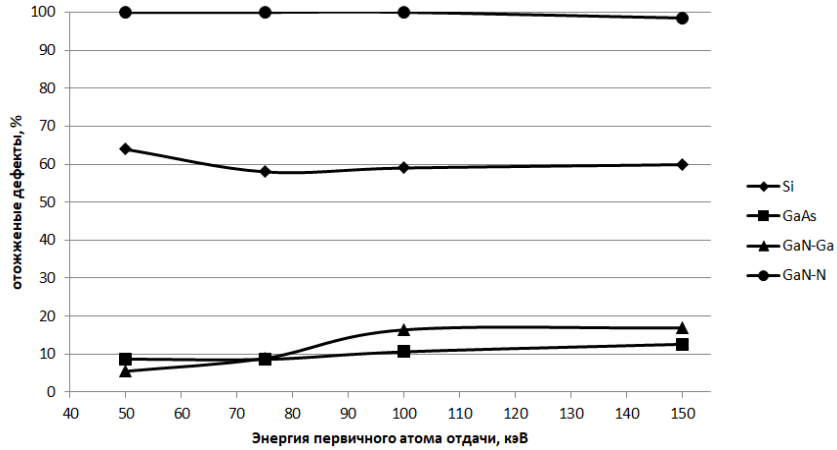


Рис. 3. Зависимость отношения дефектов, исключаемых из дальнейшего рассмотрения к общему числу смоделированных дефектов

ние объясняется тем, что атом азота имеет значительно меньшую атомную массу по сравнению с атомом галлия, следовательно при прямом взаимодействии с атомом галлия, азот не может передать достаточное количество энергии для формирования вторичного атома отдачи с энергией порядка 1 кэВ, которые, как известно из литературы, и образуют скопления дефектов.

В случае образования первичных атомов отдачи в бинарных полупроводниках расчет показал, что процент отжигаемых дефектов мал и при малых энергиях будет составлять 6…18 % в диапазоне энергий 50…150 кэВ.

Абсолютно иная ситуация наблюдается для кремния. В данном материале происходит отжиг до 60 % всех дефектов вне зависимости от начальной энергии первичного атома отдачи. Это объясняется тем, что при увеличении начальной энергии первичного атома отдачи происходит увеличение скорости движения атома, что влечет уменьшение времени взаимодействия с узлами кристаллической решетки и уменьшение доли энергии, которая идет на образование вторичных атомов отдачи. Также выбитые атомы будут иметь меньшую энергию, по сравнению со случаями, когда первичный атом отдачи будет иметь значительно меньшую энергию. Это в свою очередь, будет приводить к увеличению доли энергии, которая тратится на взаимодействие первичного атома отдачи с электронами. Такое изменение обусловлено тем, что электроны имеют значительно меньшую массу и необходимо гораздо меньшее количество энергии на разрыв связи электрона с кристаллической решеткой, нежели на образование пары Френкеля. На основе данных моделирования TRIM была получена зависимость линейной передачи энергии от энергии первичного атома отдачи для кремния. При этом рассматривались оба механизма передачи энергии – как атомам, так и электронам.

Из рис. 4 видно, что при увеличении энергии первичного атома отдачи до величин выше 100 кэВ происходит увеличение линейной передачи энергии для взаимодействия электронов с первичным атомом отдачи и уменьшение величин энергии, которая тратится на взаимодействие первичного атома отдачи с атомами. Это означает, что при прочих равных с увеличением энергии первичного атома все большую роль будет играть ионизация.

Основной особенностью при подобном рассмотрении отжига является полное отсутствие возможности учета формирования мелких одиночных дефектов, так как для подобного анализа необходимо моделирование с использованием методов молекулярной динамики, что недопустимо с точки зрения использования подобных алгоритмов в задачах оптимизационного моделирования при разработке полупроводниковых приборов.

Стоит отметить, что рассеяние на подобных дефектах, а как следствие, и снижение подвижности, происходит только у носителей заряда с малой энергией. В переносе «горячих» носителей заряда мелкие одиночные дефекты играют малозначительную роль, так как заряды точечных дефектов вносят несущественные искажения в их траектории движения.

В общем случае, в современных гетеронаноструктурах преобладают именно горячие носители, поэтому рассмотрением точечных дефектов можно пренебречь.

В качестве алгоритма нахождения минимального эллипсоида, описывающего точки СКРД был выбран алгоритм Хачияна [8]. Этот алгоритм позволяет

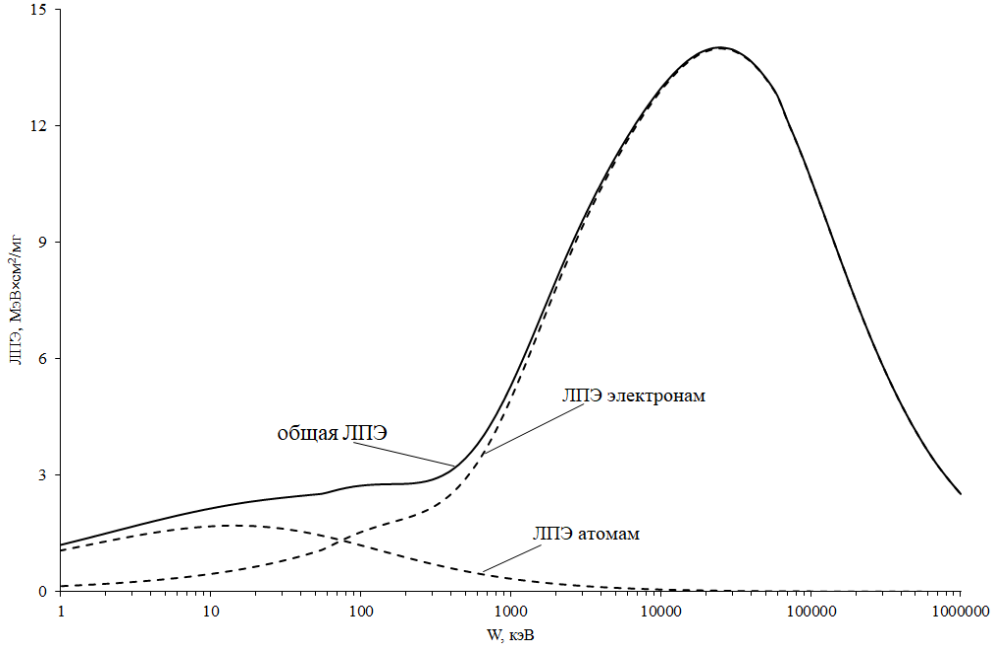


Рис. 4. Результат аппроксимации отожженных дефектов эллипсами для GaAs.
Энергия первичного атома отдачи 150 кэВ

проводить аппроксимацию в случае, если неизвестны ни полуоси эллипса, ни его центр. Данный алгоритм обладает быстрой сходимостью для относительной погрешности определения положения эллипса относительно аппроксимируемых точек порядка 10^{-2}. При уменьшении этого показателя до величин порядка 10^{-5} и менее значительно увеличивается время расчетов из-за увеличения количества оптимизационных итераций данного алгоритма.

В результате после применения данного алгоритма к точкам, полученным после отжига можно определить характерные размеры КРД и СКРД, которые необходимы для дальнейших расчетов. Пример работы данного алгоритма представлен на рис. 5.

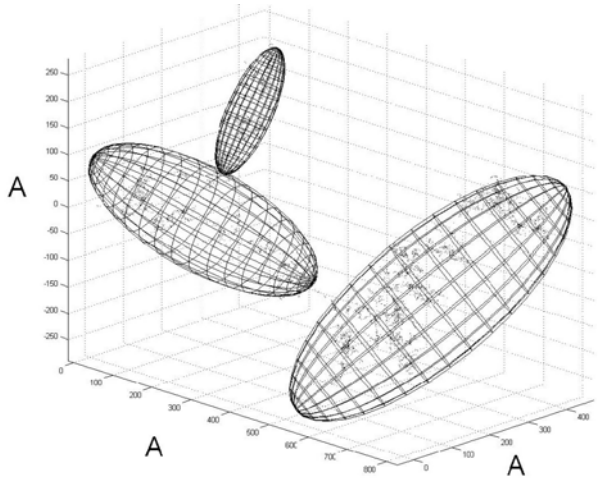


Рис. 5. Результат аппроксимации отожженных дефектов эллипсами для GaAs. Энергия первичного атома отдачи 150 кэВ

Данные алгоритмы были интегрированы в единый программный пакет, позволяющий на основании данных, генерируемых в TRIM, получать значительный объем данных для дальнейшего анализа. В случае реализации КРД и СКРД через введение дополнительных зарядов в уравнение Пуассона, массивы точек, полученных после реализации алгоритма пространственной кластеризации с учетом плотности, можно непосредственно использовать в качестве входных параметров.

Расчет электрофизических параметров кластеров радиационных дефектов

При этом, для определения времен релаксации, а как следствие, и подвижности, необходимо нахождение вероятности перехода электрона из одного состояния в другое, в следствие рассеяния на дефекте решетки или примеси. Здесь и далее эта задача будет рассматриваться в приближении сферически симметричной долины.

В общем случае задача нахождения вероятности перехода электрона в другое состояние является задачей квантовой теории рассеяния. Она решается на основе метода нестационарной теории возмущений [9, 10]. Гамильтониан для материала представим в виде

$$\hat{H}_T = \hat{H} + \hat{H}' \tag{4.1}$$

где $\hat{H}'$ описывает взаимодействие электрона с примесями и фононами, а $\hat{H}$ является невозмущенным гамильтонианом и в нашем случае описывается гамильтонианом электрона в идеальной решетке, $\hat{H}'$ считается малым возмущением.

Стационарное решение для невозмущенного $\hat{H}$ описывается как

$$\Psi_n(t) = \psi_n \exp\left(-i\varepsilon_n t/\hbar\right) \tag{4.2}$$

где ψ_n и ε_n – собственные функции и собственные числа решения уравнения

$$\hat{H}\psi_n = \varepsilon_n \psi_n \tag{4.3}$$

В общем случае, решив уравнение Шредингера для возмущенной задачи, и, учтя (4.3), а также то, что рассеивающий центр является заряженным, получим значение матричного элемента гамильтониана, отвечающего за вероятность перехода из невозмущенного состояния в возмущенное:

$$\hat{H}'_{kk'} = \int_0^\infty V(r)\frac{\sin\left(|k-k'|\right)r}{|k-k'|}dr\,. \tag{4.4}$$

Тогда дифференциальное сечение рассеяния можно определить как:

$$\sigma(\theta) = \left[\frac{Vm}{2\pi\hbar}\hat{H}'_{kk'}\right]^2. \tag{4.5}$$

Рассмотрим уравнение движения носителей заряда в условии пренебрежения тепловым движением:

$$\frac{d}{dt}\left(mv_d\right) + \frac{mv_d}{\tau_m} = eE\,, \tag{4.6}$$

где t – время, mv_d – импульс носителей заряда, а τ_m – определяется как среднее время релаксации импульса.

При этом, второе слагаемое уравнения описывает «трение», испытываемое носителями заряда о кристаллическую решетку при направленном движении под действием внешнего поля. Среднее время релаксации зависит от частоты колебаний кристаллической решетки, и, как следствие, определяет зависимость среднего времени релаксации от температуры. С точки зрения микроскопической теории данное «трение» обусловлено взаимодействием носителей заряда с несовершенствами кристаллической решетки – дефектами, примесями и колебаниями решетки.

Подобный тип взаимодействия носителей заряда с решеткой называется рассеянием. Понятие «сече-

ния рассеяния» используется для описания прохождения частиц большой энергии через вещество.

Частота соударений с атомами примеси определяется через концентрацию рассеивающих центров (легирующей примеси) N, их сечением σ_c и скоростью частицы v.

$$\frac{1}{\tau_c} = N\sigma_c v. \qquad (4.7)$$

Сечение рассеяния σ_c определяется из дифференциального сечения рассеяния путем интегрирования по телесному углу $d\Omega = 2\pi\sin\theta d\theta$,

$$\sigma_c = 2\pi\int_0^{\pi}\sigma(\theta)\sin\theta d\theta, \qquad (4.8)$$

где θ – угол отклонения направления движения частицы относительно первоначального направления.

Относительное изменение компоненты скорости частицы равно

$$\frac{v - v\cos\theta}{v} = 1 - \cos\theta. \qquad (4.9)$$

Эта же величина определяет изменение соответствующей компоненты импульса (в приближении сохранения эффективной массы неизменной при соударении). Отсюда сечение можно посчитать, как

$$\sigma_c = 2\pi\int_0^{\pi}\sigma(\theta)(1-\cos\theta)\sin\theta d\theta. \qquad (4.10)$$

Также время релаксации импульса можно переписать следующим образом:

$$\frac{1}{\tau_c} = N\sigma_c v = Nv2\pi\int_0^{\pi}\sigma(\theta)(1-\cos\theta)\sin\theta d\theta. \qquad (4.11)$$

Для полученных выше формул в качестве определения одного из вариантов решения трехмерной задачи был выбран потенциал Флеминга [11]. Он описывается формулой

$$V(r') = \frac{-qN_{dep}r_2^2}{e\varepsilon\varepsilon_0}\times \times\left[\frac{-(r_1')}{r'} - \frac{(r')^2}{2(r_1')^3} - \frac{3}{2}\left(1 - \frac{1}{r_1'} - (r_1')^2\right)\right], \qquad (4.12)$$

для центральной отрицательно заряженной части и

$$V(r') = \frac{-qN_{dep}r_2^2}{e\varepsilon\varepsilon_0}\left[\frac{1}{r'} + \frac{(r')^2}{2} - \frac{3}{2}\right], \qquad (4.13)$$

для области обедненной положительно заряженной примеси. Так как в целом дефект является квазинейтральным, то заряд внутри дефекта должен быть компенсирован зарядом внешней оболочки, то есть

$$\frac{4}{3}\pi r^3 N_{deff} = \frac{4}{3}\pi\left(r_1^3 - r^3\right)N_a \qquad (4.14)$$

где N_a – концентрация примеси, а N_{deff} – концентрация дефектов внутри СКРД.

Размеры обедненной области можно посчитать исходя из концентрации примеси и оценки плотности дефектов, равной 10^{20} см$^{-3}$ [12].

Результаты расчета для двух концентраций легирующей примеси приведены в табл. 2.

Таблица 2

Размер кластера радиационных дефектов при различной концентрации легирующей примеси

Концентрация примеси, см$^{-3}$	Размер отрицательно заряженного ядра кластера, нм		
	5	10	15
	Радиус кластера с учетом обедненной области, нм		
10^{16}	107	215	323
10^{17}	49	100	149
10^{18}	23	46	69
10^{19}	10	21	31

Как видно из табл. 2, при низких концентрациях легирующей примеси образование кластера приводит к возникновению достаточно большого объема с локально нескомпенсированным зарядом, что отрицательно влияет на подвижность основных носителей заряда. Только при концентрациях легирующей примеси порядка 10^{18}…10^{19} см$^{-3}$ области КРД имеют небольшой размер.

Для потенциала Флеминга был проведены расчеты подвижности и времен релаксации импульса для кремния с целью сравнения с результатами экспериментальных данных. Стоит заметить, что сравнение с экспериментом в данном случае не будет являться полностью корректным, ввиду отсутствия данных о значениях подвижности для горячих носителей заряда. В общем случае не существует прямых методов измерения подвижности, что приводит к невозможности разделения на носители, температура которых находится в равновесии с температурой кристаллической решетки, и «горячие» носители заряда. Это приводит к тому, что оцениваются именно доминирующие области, а как следствие, и СКРД.

Также представленные в литературе измерения для объемного материала проведены для низких концентраций легирующих примесей. Это приводит к тому, что область обедненной примеси вокруг кластера будет иметь достаточно большой объем и будет в доминирующем числе случаев определять конечные значения подвижности всего исследуемого образца. Исходя из этого, предлагается считать значение подвижности, полученной в ходе экспериментов подвижностью, определяемой доминирующим видом СКРД.

На рис. 6 представлены результаты расчета времени релаксации импульса и подвижности, рассчитанные для кремния, а также сравнение с экспериментальными данными, полученными для необлученного образца. Расчеты проводились для размеров ядра кластера, равным 5, 10 и 15 нм.

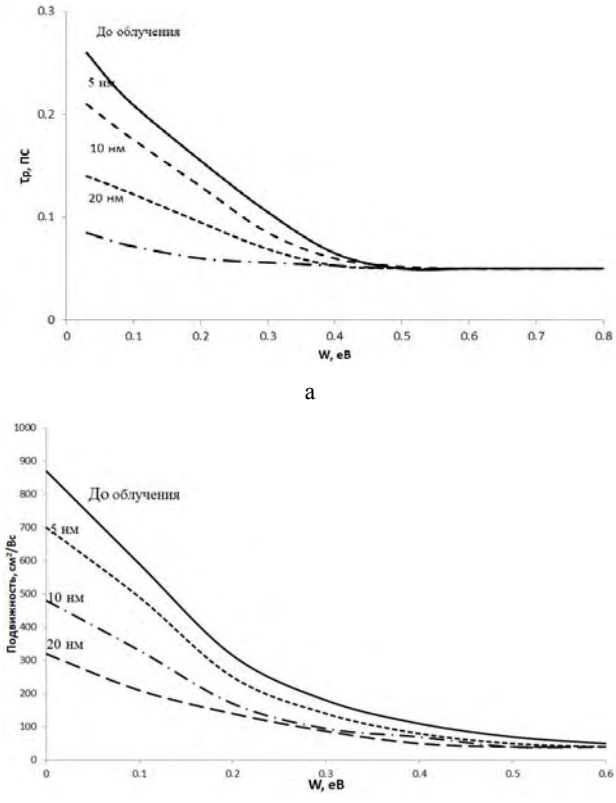


Рис. 6. Результаты расчета характеристик Si для модели СКРД Флеминга для различных размеров СКРД: а – время релаксации импульса, б – подвижность

Основной проблемой при подобной постановке задачи является верификация полученных результатов моделирования, так как данные получаемые при анализе опытных образцов не позволяют в полной мере выделить подвижность, связанную с «горячими» носителями.

Из полученных данных, рис. 6б, видно, что подвижность падает с увеличением размера ядра кластера. Также данный расчет встроен в единую систему определения исходных данных для проведения трехмерного моделирования транспорта носителей при радиационном воздействии.

Литература

1. International roadmap for devices and systems: 2018 update. More Moore.

2. Пузанов А. С., Оболенский С. В., Козлов В. А. Перенос носителей заряда через тонкую базу гетеробиполярного транзистора при радиационном воздействии // Физика и техника полупроводников. 2015. Т. 49, № 1. С. 71–75.

3. Ziegler J. F., Biersak J. P., Littmark U. The stopping and range of ions in solids. Pergamon, N.Y., 1996.

4. Коноплева Р. Ф., Остроумов В. Н. Взаимодействие заряженных частиц высоких энергий с германием и кремнием. М.: Атомиздат, 1975.

5. Винецкий В. Л., Холодарь Г. А. Радиационная физика полупроводников. Киев: Наукова думка, 1979.

6. Самарский А. А., Тихонов А. Н. Уравнения математической физики. М.: МГУ, 1999.

7. Забавичев И. Ю., Потехин А. А., Пузанов А. С., Оболенский С. В., Козлов В. А. Моделирование образования каскада смещений и переходных ионизационных процессов в кремниевых полупроводниковых структурах при нейтронном воздействии // Физика и техника полупроводников. 2019. Т. 53, № 9. С. 1279–1284.

8. Khachiyan L. G. Rounding of Polytopes in the Real Number Model of Computation // Mathematics of Operations Research. 1996. Vol. 21, N 2. P. 307–320.

9. Аскеров Б. М. Электронные явления переноса в полупроводниках. М.: Наука, 1985.

10. Зеегер С. Физика полупроводников. М.: Мир, 1977.

11. Fleming R. M., Seager C. H., Lang D. V., Cooper P. J., Bielejec E., Campbell J. M. // Journal of Applied Physics. 2007. Vol. 102. 043711.

12. Cheng L. J., Lori J. Characteristics of neutron damage in silicon // Phys. Rev. 1968. Vol. 171, N 3. P. 856–862.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЛОКАЛЬНЫХ ИТЕРАЦИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ ДИФФУЗИИ В ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ НИКИФОРОВА – КОЗЛОВА В РАМКАХ МЕТОДИКИ МИМОЗА

А. А. Синельникова, *Э. И. Замалиев*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Метод локальных итераций является многошаговым итерационным методом решения уравнений диффузионного типа. В настоящее время в методике МИМОЗА диффузионные уравнения модели турбулентного перемешивания (ТП) решаются неявным методом. Недостатком такого подхода является высокая вычислительная нагрузка и, следовательно, высокие траты процессорного времени. Применение метода локальных итераций (ЛИ) должно снизить вычислительную нагрузку и увеличить скорость расчета данного типа уравнений без потери, а возможно и с повышением, точности. В работе описаны метод ЛИ и метод ЛИ-М (модификация метода ЛИ), приведены алгоритм работы данного метода и некоторые аспекты его программной реализации.

Система уравнений трехмерной модели Никифорова – Козлова

Уравнения записаны в декартовой системе координат.

Изменение средних значений газодинамических величин (скорости, плотности, внутренней энергии) определяется уравнениями:

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \mathrm{div}\vec{V} \tag{1}$$

$$\frac{dV_i}{dt} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho}\frac{\partial T_{ik}}{\partial x_k} \tag{2}$$

$$\frac{dE}{dt} = -\frac{P}{\rho} div\left(\vec{V} - \vec{W}\right) + \\ + \frac{1}{\rho} div\left(2\rho D_t \nabla E\right) - \frac{1}{\rho} div\vec{q}_r + \omega\Phi \tag{3}$$

Для тензора турбулентных напряжений принято представление [1]:

$$T_{ik} = 2\rho\frac{e_{ik}}{e}\Phi \tag{4}$$

Изменение массовых концентраций всех компонентов турбулентной смеси определяется турбулентной диффузией:

$$\frac{dc_k}{dt} = \frac{1}{\rho} div\left(2\rho D_t \nabla c_k\right) \tag{5}$$

где $k = 1,...,N$.

Изменение значений величин, характеризующих собственно турбулентность, описывается следующими уравнениями баланса.

Полная энергия турбулентности с учетом пульсаций плотности:

$$\frac{d\Phi}{dt} = \\ = \frac{1}{\rho}\mathrm{div}\left\{\rho\left(3D_t\nabla\Phi - \vec{W}\Phi\right)\right\} - \frac{1}{\rho}\sigma_{mn}V_{mn} - \vec{W}\frac{d\vec{V}}{dt} - \omega\Phi \tag{6}$$

Тензор «кинетической энергии» турбулентности:

$$\frac{de_{ij}}{dt} = \mathrm{div}\left(3D_t\nabla e_{ij} - \vec{W}e_{ij}\right) - e_{ij}\mathrm{div}\vec{W} - V_{ik}e_{kj} - V_{jk}e_{kj} + \\ + \frac{f_1}{2}\left(W_iG_j + W_jG_i\right) - L_{ij} - \frac{Q}{3}\delta_{ij} \tag{7}$$

Скорость диссипации кинетической энергии турбулентности:

$$\frac{dQ}{dt} = div\left(2,3D_t\nabla Q - \vec{W}Q\right) - Qdiv\vec{W} + \frac{3}{2}f_1\vec{W}\vec{G}\frac{Q}{e} + \\ + \psi\left\{-\frac{4}{3}Qdiv\left(\vec{V} - \vec{W}\right) - \gamma\omega\left(e_{mn} - \frac{1}{3}\delta_{mn}e\right)V_{mn} + \right. \\ \left. + \beta\frac{R}{1+R}L_{mn}A_mW_n - 2\frac{Q^2}{ke}\right\} + \\ + \left(1-\psi\right)\left\{-3\frac{e_{mn}V_{mn}}{e}Q - \frac{3}{2}\frac{Q^2}{e} - Q\frac{B}{1+10R}div\vec{V}\right\} \tag{8}$$

Скорость турбулентного потока массы:

$$\frac{dW_i}{dt} = \frac{1}{\rho}div\left\{\rho\left(2D_t\nabla W_i - \vec{W}W_i\right)\right\} - V_{im}W_m + \\ + 2e_{im}A_m + f_1RG_i - k_W\omega W_i \tag{9}$$

Средняя интенсивность относительного квадрата пульсаций плотности:

$$\frac{dR}{dt} = \frac{1}{\rho^2}div\left\{\rho^2\left(D_t\nabla R - \vec{W}R\right)\right\} + Rdiv\vec{W} + \\ + 2\vec{W}\vec{A} - \frac{3}{2}\omega R \tag{10}$$

Здесь введены обозначения: $\vec{q}_r$ – плотность потока энергии излучения в приближении лучистой теплопроводности; $e = e_{11} + e_{22} + e_{33}$ – кинетическая энергия турбулентности; $\omega = \dfrac{Q}{e}$ – частота турбулентных пульсаций; $D_t = \alpha_{Dt} \dfrac{\tilde{e}e}{Q}\left[1 + \alpha_2 \dfrac{f_1 |\vec{W}| \sqrt{e}}{\tilde{e}}\right]$ – коэффициент турбулентной диффузии:

Турбулентная диффузия величин и концентраций

Из уравнений (1) – (10) можно выделить те члены, которые описывают процесс турбулентной диффузии:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{1}{\rho} div\left(2\rho D_t \nabla E\right) + \ldots$$

$$\frac{dc_k}{dt} = \frac{1}{\rho} div\left(2\rho D_t \nabla c_k\right),\ k = 1,\ \ldots,\ N$$

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{1}{\rho} div\left(3\rho D_t \nabla \Phi\right) + \ldots$$

$$\frac{de_{ij}}{dt} = div\left(3 D_t \nabla e_{ij}\right) + \ldots$$

$$\frac{dQ}{dt} = div\left(2.3 D_t \nabla Q\right) + \ldots$$

$$\frac{dW_i}{dt} = \frac{1}{\rho} div\left(3\rho D_t \nabla W_i\right) + \ldots$$

$$\frac{dR}{dt} = \frac{1}{\rho^2} div\left(\rho^2 D_t \nabla R\right) + \ldots$$

Из представленной системы уравнений можно выписать общий вид уравнения диффузии концентраций и турбулентных величин:

$$\frac{du}{dt} = \frac{1}{\rho^\alpha} div\left(\chi \nabla u\right)$$

Коэффициент диффузии равен:

$$\chi = k_i \rho^\alpha D_t = \begin{cases} 3\rho D_t \\ 3 D_t \\ 2.3 D_t \\ 2\rho D_t \\ \rho^2 D_t \end{cases}$$

Подобное унифицированное представление коэффициента диффузии облегчает его использование при программной реализации счетных методов при разбиении на группы.

Описание и особенности метода локальных итераций

В основе метода лежит решение уравнения в явном виде за несколько подшагов с использованием специальных коэффициентов [2]. Рассматривается уравнение

$$\frac{\partial u}{\partial t} = Lu$$

где L – линейный эллиптический самосопряженный оператор с коэффициентами, такой, что $Lu = div\left(k(x,t)\, grad\, u\right)$.

В рамках данной работы через u^n обозначается приближенное решение задачи на временном слое n, а через y^m – значение на подшаге m. Принципиальной особенностью метода ЛИ является правило построения многочлена Чебышева, корни которого используются для определения итерационных параметров.

Рассмотрим переход от u^n к u^{n+1} более подробно.

1. Задание начального приближения $y^0 = u^n$.

2. Вычисление верхней границы λ_∞ спектра оператора L_h по формуле:

$$\lambda_\infty = \max_{i \in \Omega_h} \sum_{k \in S_i} |l_k^i|$$

где l_k^i – разностные коэффициенты, связанные с узлом i, и зависящие не только от сетки, но и от коэффициента χ.

3. Вычисление степени многочлена Чебышева p по формуле

$$p = \left\lceil \frac{\pi}{4} \sqrt{\tau \lambda_\infty + 1} \right\rceil$$

где $\lceil\ \rceil$ – округление до целого вверх.

4. Вычисление нулей многочлена Чебышева по формуле:

$$\beta_m \in K_p = \left\{ \cos \frac{2i-1}{2p} \pi,\ i = \overline{1, p} \right\}$$

и их упорядочивание.

5. Вычисление числа подшагов M и итерационных параметров a_m:

Метод ЛИ число $(M = p)$:

$$a_m = \frac{\lambda_\infty}{1 + z_1}\left(z_1 - \beta_m\right), \quad m = \overline{1, p}$$

Метод ЛИ-М ($M = 2p - 1$):

$$a_m = \frac{\lambda_\infty}{1 + z_1}\left(z_1 - \beta_m\right), \qquad m = \overline{1, p},$$

$$a_m = a_{m-p}, \qquad m = \overline{p+1, 2p-1}$$

6. Выполнение итерационного процесса по подшагам $m=\overline{1,M}$ по формуле:

$$y^m=\frac{1}{1+\tau a_m}\left(u^n+\tau a_m y^{m-1}-\tau L_h y^{m-1}\right)$$

7. Значение на последнем подшаге принимается в качестве функции на верхнем слое $u^{n+1}=y^M$.

Если расчет не закончен, то переходим к шагу 1 с $n=n+1$.

В итоге решаются все $10+N$ уравнений трехмерной модели Никифорова – Козлова для величин Φ, e_i, Q, W_i, R, E и c_N, где N равно количеству веществ.

Метод ЛИ не является асимптотически устойчивым при $t\to\infty$, что при больших временах расчета может привести к потере монотонности. Метод ЛИ-М монотонен, практически устойчив, и имеет первый порядок точности по времени.

Алгоритм работы метода локальных итераций

Все диффузионные уравнения модели можно условно разделить на пять групп, отличных коэффициентом диффузии. Таким образом, достаточно рассмотреть схему решения уравнений одной из группы. Решение диффузионного уравнения выполняется в несколько этапов.

1. Вычисление коэффициента диффузии χ. Коэффициент турбулентной диффузии известен.

$$\chi=k_i\rho^{\alpha}D_t=\begin{cases}3\rho D_t\\3D_t\\2.3D_t\\2\rho D_t\\\rho^2 D_t\end{cases}$$

2. Вычисление λ_∞. Коэффициенты l_k^i вычисляются из геометрических коэффициентов, которые известны.

$$\lambda_\infty=\max_{i\in\Omega_h}\sum_{k\in S_i}\left|l_k^i\right|$$

3. Вычисление степени многочлена Чебышева, нулей многочлена Чебышева и итерационных параметров.

$$p=\left\lceil\frac{\pi}{4}\sqrt{\tau\lambda_\infty+1}\right\rceil$$

$$\beta_m\in K_p=\left\{\cos\frac{2i-1}{2p}\pi,\ i=\overline{1,p}\right\}$$

$$a_m=\frac{\lambda_\infty}{1+z_1}\left(z_1-\beta_m\right),\quad m=\overline{1,p}$$

4. Выполнение итерационного процесса метода для каждого диффузионного уравнения из группы.

$$y^m=\frac{1}{1+\tau a_m}\left(u^n+\tau a_m y^{m-1}-\tau L_h y^{m-1}\right)$$

Приведенные выше этапы применяются для каждой группы диффузионных уравнений. Таким образом, каждая группа выполняет свое число подшагов. В настоящее время данный метод реализован для последовательной программы с целью валидации и верификации результатов.

Тестовые расчеты

Синтетический тест № 1

Рассматривается трехмерная область $R=[0,2]\times[0,1]\times[0,5]$. Начальное распределение имеет вид

$$u(x)=\begin{cases}1, & x<1\\2, & x\ge 1.\end{cases}$$

Расчет проводился на сгущающихся сетках, с разными шагами по времени для сетки 4N. Сетка 1N содержала 5 строк, 11 столбцов, 5 листов.

На рис. 1а. сравниваются решения, полученные по неявному методу, методу ЛИ и методу ЛИ-М на сетках с шагом $\tau=0,001$ для величины $u(x)$. Расчеты представлены на момент времени $t=0,1$ мс.

На рис. 1б сравниваются решения, полученные по неявному методу, методу ЛИ и методу ЛИ-М на сетке с разными шагами $\tau=0,01,\ \tau=0,005,$ $\tau=0,001,\ \tau=0,0001$ для величины $u(x)$. Расчеты представлены на момент времени $t=0,1$ мс.

Из рис. 1, видно, что при измельчении сетки метод ЛИ и ЛИ-М имеют тенденцию к сходимости и согласуются с неявным методом. Но с увеличением шага по времени (фактически увеличении числа подшагов) в решении по методу ЛИ проявляется немонотонность. В отличие от метода ЛИ, в его модификации подобная немонотонность не проявляется.

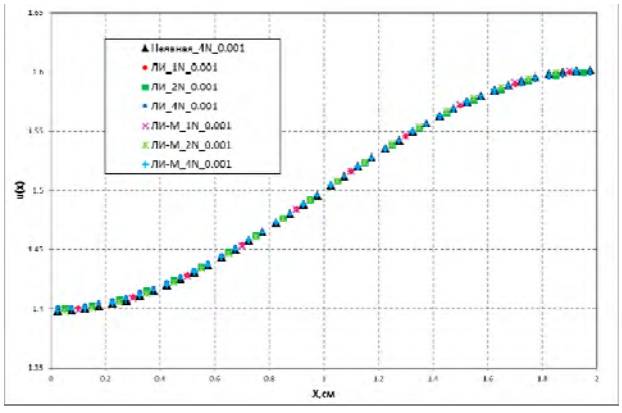
Синтетический тест № 2

Рассматривается трехмерная область $R=[0,2]\times[0,1]\times[0,5]$. Начальное распределение имеет вид

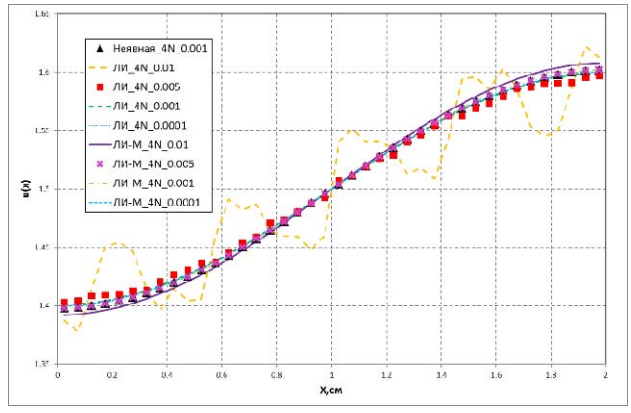
$$u(x)=(x-1)^2$$

Расчет проводился на сгущающихся сетках с разными шагами по времени. Сетка 1N содержала 5 строк, 11 столбцов, 5 листов.

На рис. 2а приведены графики решения тестового расчета для величины $u(x)$, полученные по неявному методу, методу ЛИ и ЛИ-М. Расчеты представ-

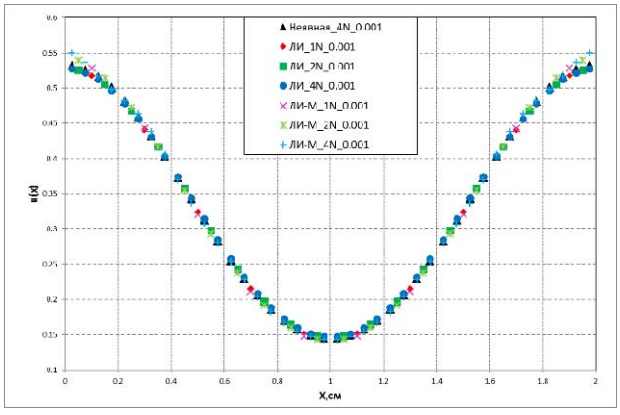


а

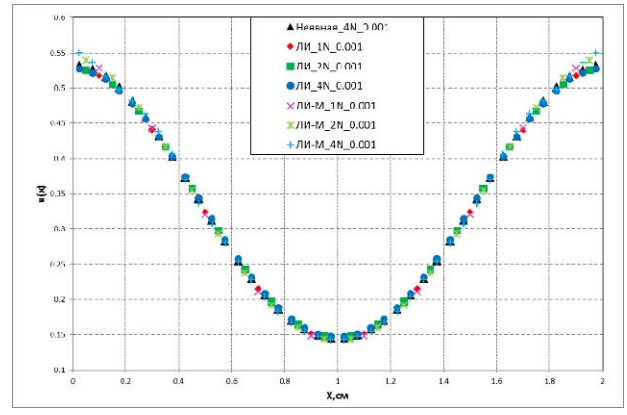


б

Рис. 1. Распределение величины u(x) вдоль оси OX: а – неявный метод, метод ЛИ и метод ЛИ-М на сетках с шагом $\tau = 0,001$, б – неявный метод, метод ЛИ и метод ЛИ-М на сетке с разными шагами по времени



а



б

Рис. 2. Распределение $u(x)$ вдоль оси OX: а – неявный метод, метод ЛИ и метод ЛИ-М на сеткахс шагом $\tau = 0,001$, б – неявный метод, метод ЛИ и метод ЛИ-М на сетке с разными шагами по времени

лены на сетках с шагом $\tau = 0,001$ на момент времени $t = 0,01$ мс.

На рис. 2б сравниваются решения, полученные по неявному методу, методу ЛИ и методу ЛИ-М на сетке с разными шагами $\tau = 0,01$, $\tau = 0,005$, $\tau = 0,001$, $\tau = 0,0001$ для величины $u(x)$. Расчеты представлены на момент времени $t = 0,01$ мс.

Из рис. 2 видно, что имеется тенденция к сходимости при измельчении сетки решений, полученных по методу ЛИ и ЛИ-М, к решению, полученному по неявному методу на самой подробной сетке. Расчеты по методам ЛИ и ЛИ-М почти совпадают. При увеличении числа подшагов решение по методу ЛИ проявляет неустойчивость.

Плоская бегущая волна

В трехмерной области решается уравнение диффузии, для которого точное решение имеет вид $u(x,t) = \sqrt{2(t + a - x)}$, где $a = 0,3$, а коэффициент диффузии равен $\chi = 2(t + a - x)$, плотность постоянна и равна $\rho = 10$. В начальный момент времени задано распределение $u(x,0) = 0$, на левой и правом торце области задано точное решение, на остальных границах – нулевые потоки. Задача была посчитана на достаточно подробной сетке (201 столбец, 6 строк, 6 листов) с шагом $\tau = 0,0001$. Расчет проводился только методом ЛИ-М.

На рис. 3. представлены профили функции u вдоль координаты x на три различных момента времени $t = 0,1$, $t = 0,4$, $t = 0,6$ в сравнении с аналитическим решением. Из графиков видно, что полученное решение хорошо согласуется с точным решением на все моменты времени.

На рис. 4 представлен график зависимости числа «подшагов» от времени. Видно, как с изменением максимального значения коэффициента диффузии изменяется число подшагов метода.

Опыт Poggi

В опыте *Poggi et al* (1998) [3] в ударной трубе исследовалось развитие перемешивания на плоской

границе двух газов (воздуха и SF6. Начальная геометрия задачи представлена на рис. 5, начальные данные для расчетов приведены в табл. 1. На правой границе области задано постоянное давление, равное 2,152 атм., на остальных границах задано условие «жесткая стенка». Для обоих веществ использовалось уравнение состояния идеального газа.

Счет ТП начинается с момента $t_{TM} \approx 4,6$ мс (вскоре после прохождения УВ через границу газов), при этом в окрестностях контактной границы в слое шириной $2L_0$ $(L_0 = 0,15$ см$)$ задаются начальные значения турбулентных величин: $e_0 = \Phi_0 =$

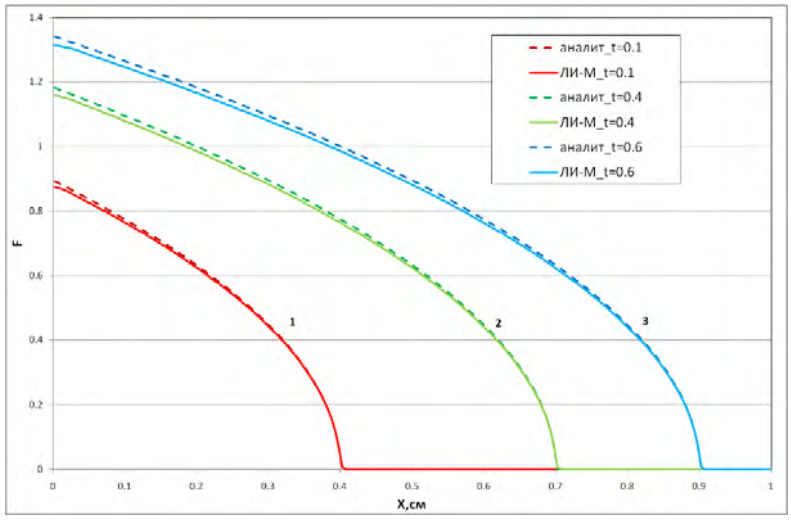


Рис. 3. Профили функции F вдоль координаты x: 1 – $t = 0,1$ мс, 2 – $t = 0,4$ мс, 3 – $t = 0,6$ мс

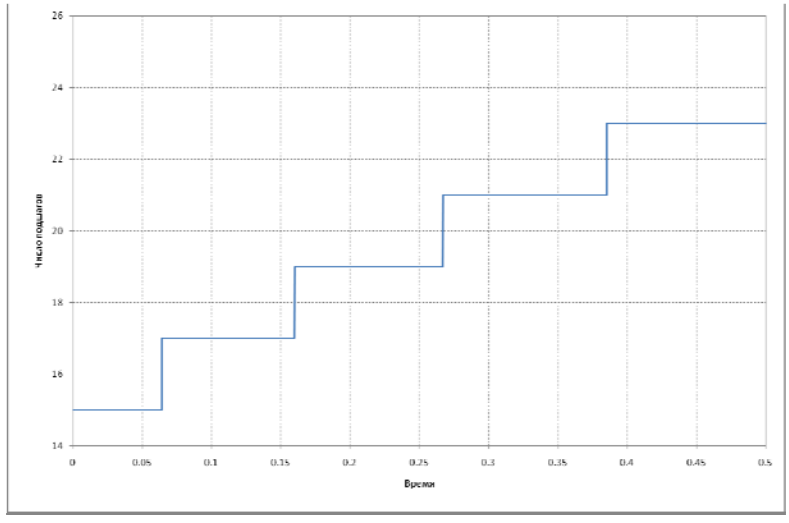


Рис. 4. График зависимости числа «подшагов» от времени

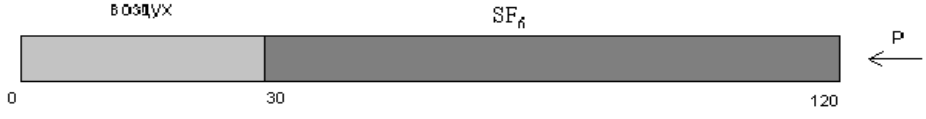


Рис. 5. Начальная постановка опыта Poggietal, 1998

Таблица 1

Начальные данные

Вещество	ρ_0, г/см^3	E_0, см^2/ мс^2	γ	CV, 102 Дж/(кг·К)
воздух	0,0012	2083,33	1,400	7,079
SF6 (эле-газ)	0,0060	1773,05	1,094	6,059

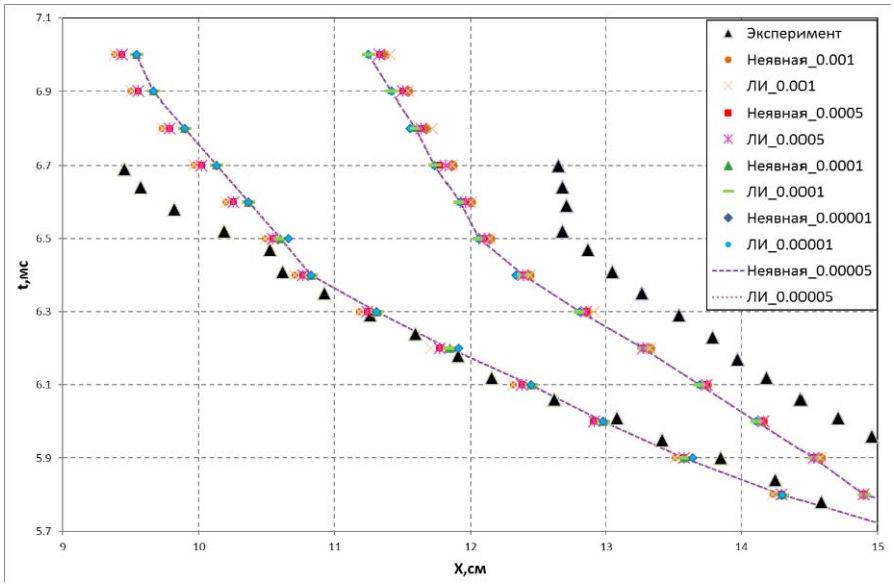


Рис. 6. Зона турбулентного перемешивания

Таблица 2

Времена расчета и ускорение по неявному методу и методу ЛИ-М в зависимости от шага τ

Шаг τ	Неявный метод, сек	Метод ЛИ-М, сек	Ускорение
0,001	5082	538	9,44
0,0005	8505	919	9,25
0,0001	43951	4800	9,15
0,00005	87836	8820	9,95
0,00001	424312	44405	9,56

$= 10\ \text{см}^2/\text{мс}^2$, $e_1 = e_2 = e_0/3$, $Q_0 = 750\ \text{см}^2/\text{мс}^2$, $W_0 = 0$ и $R_0 = 0,444\,R$.

Была проведена серия расчетов с разными шагами по времени $\tau = 0,0005$, $\tau = 0,0001$, $\tau = 0,00005$, $\tau = 0,00001$. Задача считалась до момента времени $t = 7$ мс. Размер сетки 20025 ячеек. Максимальное число подшагов в методе ЛИ-М равно 3.

На рис. 6 приводится эволюция зоны ТП для расчетов по неявному методу и методу ЛИ-М с разными шагами по времени.

Из графика, рис. 6, видно, что зона ТП, полученная в расчетах имеет тенденцию к сходимости. Данные, полученные по неявному методу и методу ЛИ-М, хорошо согласуются.

В табл. 2 представлены времена расчета и ускорение по неявному методу и методу ЛИ-М в зависимости от шага τ.

Из табл. 2 видно, что ускорение по методу ЛИ-М составляет порядка 10 раз.

Заключение

1. Реализован метод ЛИ и ЛИ-М для решения диффузионных уравнений трехмерной модели турбулентного перемешивания Никифорова – Козлова в методике МИМОЗА.

2. Данная программа верифицирована на наборе тестов. Результаты синтетических тестов были удовлетворительны для метода ЛИ-М, однако метод ЛИ показал неустойчивость при возрастании шага по времени. На основе расчета опыта Пожжи были сделаны предварительные замеры повышения производительности. Время расчета диффузионных уравнений уменьшилось примерно на порядок. Результаты, полученные в данной работе, показывают потенциал метода локальных итераций для решения диффузионных уравнений модели ТП Никифорова – Козлова.

3. Планируется дальнейшее развитие данной методики, ее распараллеливание и тестирование на производственно-методических задачах.

Литература

1. Андронов В. А., Козлов В. И., Никифоров В. В., Разин А. Н., Юдин Ю. А. Методика расчета турбулентного перемешивания в одномерных течениях (методика «ВИХРЬ») // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1994. Вып. 2. С. 59.

2. Жуков В. Т. О явных методах численного интегрирования для параболических уравнений. // Математическое моделирование. 2010. Т. 22, № 10. С. 127–158.

3. Poggi F., Thorembey M.-H., Rodriguez G. Velocity measurements in gaseous mixtures induced by Richtmyer – Meshkov instability // Physics of Fluids, 1998. Vol. 10, N 11. P. 2698–2700.

ТРЕХМЕРНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ГЕНЕРАЦИИ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИМПУЛЬСА В ЭЛЛИПТИЧЕСКОМ ИЗЛУЧАТЕЛЕ

Е. С. Столмакова, И. В. Долженков

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Для излучения мощных сверхширокополосных (СШП) электромагнитных импульсов (ЭМИ) используются в основном два типа излучателей, основанных на традиционных технологиях, в которых источники импульсного напряжения сопряжены с решетками рупорных антенн [1] и антеннами с параболическим рефлектором [2]. В настоящее время создается параболический излучатель, работа которого основана на новой технологии генерации СШП ЭМИ, использующей принцип излучения сверхсветовых источников. Метод вычисления характеристик полей для такого типа излучателя описан в [3].

Кроме этого, представляет практический интерес исследование генератора ЭМИ, имеющего форму эллипсоида вращения. Эта конструкция обладает рядом преимуществ по сравнению с излучателями, имеющими параболические формы:

а) фокусировка СШП излучения в локальной области вблизи фокуса, что необходимо в ряде применений генераторов, прежде всего в медицинских целях;

б) пространственная конфигурация излучения на выходе, соответствующая точечному источнику, что оптимально для получения направленного излучения при использовании фокусирующей антенной системы;

в) возможность каналирования СШП ЭМИ для использования в конструкциях с большой площадью поверхности (большой электрической емкостью) и сравнительно небольшой выходной апертурой, что важно для решения технологических проблем создания образцов.

Целью данной работы является описание численной методики расчета характеристик ЭМИ, излучаемого эллиптическим источником. Методика основана на численном интегрировании однородных уравнений Максвелла с поверхностными источниками в эллиптических координатах с использованием метода покоординатного расщепления.

Приведен пример численного расчета тестовой задачи, имеющей аналитическое решение.

Постановка задачи и исходные уравнения

Для получения решения в заданной области необходимо решить трехмерную систему уравнений Максвелла, записанную в эллиптических координатах (v,u,φ) [4]:

$$\begin{cases}
\dfrac{\partial E_v}{\partial t}=\dfrac{1}{h_u\sqrt{1-u^2}}\dfrac{\partial\left(H_\varphi\sqrt{1-u^2}\right)}{\partial u}-\dfrac{1}{h_\varphi}\dfrac{\partial H_u}{\partial\varphi}, & (1)\\
\dfrac{\partial E_u}{\partial t}=\dfrac{1}{h_\varphi}\dfrac{\partial H_v}{\partial\varphi}-\dfrac{1}{h_v\sqrt{v^2-1}}\dfrac{\partial\left(H_\varphi\sqrt{v^2-1}\right)}{\partial v}, & (2)\\
\dfrac{\partial E_\varphi}{\partial t}=\dfrac{1}{h_v\sqrt{v^2-u^2}}\dfrac{\partial\left(H_u\sqrt{v^2-u^2}\right)}{\partial v}-\dfrac{1}{h_u\sqrt{v^2-u^2}}\dfrac{\partial\left(H_v\sqrt{v^2-u^2}\right)}{\partial u}, & (3)\\
\dfrac{\partial H_v}{\partial t}=\dfrac{1}{h_\varphi}\dfrac{\partial E_u}{\partial\varphi}-\dfrac{1}{h_u\sqrt{1-u^2}}\dfrac{\partial\left(E_\varphi\sqrt{1-u^2}\right)}{\partial u}, & (4)\\
\dfrac{\partial H_u}{\partial t}=\dfrac{1}{h_v\sqrt{v^2-1}}\dfrac{\partial\left(E_\varphi\sqrt{v^2-1}\right)}{\partial v}-\dfrac{1}{h_\varphi}\dfrac{\partial E_v}{\partial\varphi}, & (5)\\
\dfrac{\partial H_\varphi}{\partial t}=\dfrac{1}{h_u\sqrt{v^2-u^2}}\dfrac{\partial\left(E_v\sqrt{v^2-u^2}\right)}{\partial u}-\dfrac{1}{h_v\sqrt{v^2-u^2}}\dfrac{\partial\left(E_u\sqrt{v^2-u^2}\right)}{\partial v}. & (6)
\end{cases}$$

Здесь E_u, E_v и E_φ – компоненты напряженности электрического поля, H_u, H_v, H_φ – магнитного, $h_v=a\sqrt{\dfrac{v^2-u^2}{v^2-1}}$, $h_u=a\sqrt{\dfrac{v^2-u^2}{1-u^2}}$, $h_\varphi=a\sqrt{\left(v^2-1\right)\left(1-u^2\right)}$ – коэффициенты Ламе. Используется система единиц, в которой скорость света $c=1$.

В этой системе координат φ – угол вращения относительно оси симметрии вытянутого эллипсоида; область изменения переменных v,u,φ определяется неравенствами:

$$1\le v\le v_{\max},\quad -1\le u\le 1,\qquad 0\le\varphi\le 2\pi,$$

где $v_{\max}$ – граница расчетной области.

Координатные поверхности $v=const$, $u=const$ представляют собой вытянутые эллипсоиды вращения и двухполостные гиперболоиды вращения, соответственно. В декартовой системе координат в разрезе плоскостью $y=0$ эта область представляет собой систему софокусных эллипсов и гипербол с фокусами F, F' (рис. 1).

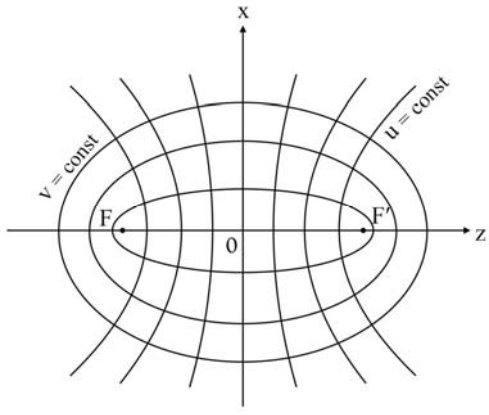


Рис. 1. Ортогональная система софокусных эллипсов и гипербол с фокусами F и F'

Таким образом, сечение области плоскостью ($y = 0$), в которой требуется найти решение уравнений (1) – (6), в декартовой системе координат имеет вид, показанный на рис. 2. На этом рисунке жирной линией обозначен контур эллиптического источника излучения, имеющего размеры, соответствующие координатам v_s и u_s .

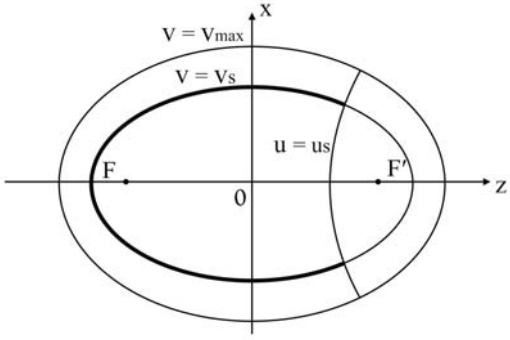


Рис. 2. Геометрия задачи в декартовых координатах (разрез плоскостью $y = 0$)

В плоскости (v,u) границы расчетной области будут иметь вид, показанный на рис. 3.

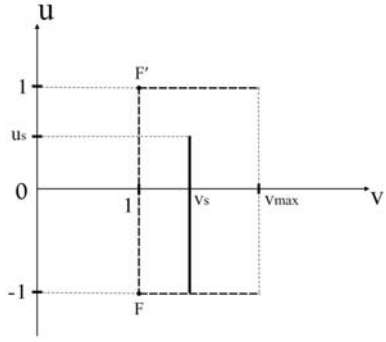


Рис. 3. Геометрия задачи в эллиптических координатах в плоскости $(v,\ u)$

Жирная линия на этом рисунке соответствует контуру поверхности эллиптического источника, а пунктирная обозначает ось симметрии, которой соответствуют следующие значения координат:

$$\begin{cases} v = 1, & -1 \le u \le 1, \\ u = \pm 1, & 1 \le v \le v_{\max}. \end{cases}$$

При решении системы уравнений (1) – (6) ее необходимо дополнить начальными и граничными условиями.

В начальный момент времени $t = 0$ все компоненты $E_\alpha, H_\alpha \ (\alpha = v,u,\varphi)$ равны нулю.

Граничные условия следующие:

– на границе области $v = v_{\max}$, $-1 \le u \le 1$, $0 \le \varphi \le 2\pi$ задаются условия излучения вида

$$E_u - H_\varphi = 0\ ,\ E_\varphi + H_u = 0\ ;$$

– на внутренней поверхности эллиптического излучателя $v = v_s, -1 \le u \le u_s, 0 \le \varphi \le 2\pi$ задаются эффективные граничные условия для тангенциальных компонент электрического поля [5]:

$$E_{eff\ \ell} = -4\pi \frac{\partial}{\partial \ell} P(t, \vec{r}\,),$$

где $P = P(t, \vec{r}\,)$ – функция источника.

– на внешней поверхности эллиптического излучателя $v = v_s + h,\ -1 \le u \le u_s,\ 0 \le \varphi \le 2\pi$ (h – толщина излучателя) тангенциальные компоненты электрического поля полагаются равными нулю:

$$E_\tau = 0\ ;$$

– на оси симметрии предполагается ограниченность всех компонент полей.

Описание метода численного решения

Для нахождения численного решения в расчетной области строится сетка узлов $\Omega = \omega_v \times \omega_u \times \omega_\varphi$, где $\omega_v = \left(v_1 = 1, v_2, ..., v_{Nv} = v_{\max}\right)$, $\omega_u = \left(u_1 = -1,\right.$ $\left. u_2,\ ...,\ u_{Nu} = 1\right)$, $\omega_\varphi = \left(\varphi_1 = 0,\ ...,\ \varphi_{N\varphi} = 2\pi\right)$.

Сеточные аналоги величин размещаются на построенной сетке так, как изображено на рис. 4.

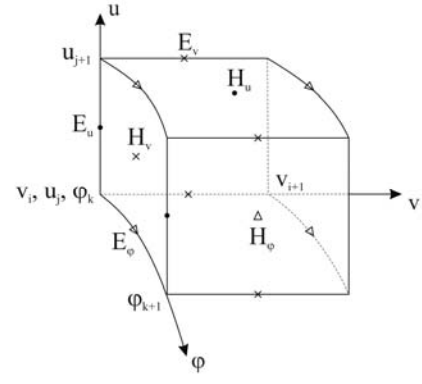


Рис. 4. Расположение сеточных величин

При получении пространственной дискретизации исходные дифференциальные уравнения интегрировались по площади грани соответствующего шестигранника, в качестве которого выбиралась ячейка сетки Ω, показанная на рис. 4. Проинтегрировав уравнение (4) по площади грани $v = v_i$ (введя для нее обозначение $S_{u\varphi}^{(H)}$), можно получить:

$$\iint\limits_{S_{u\varphi}^{(H)}} \frac{dH_v}{dt} dS_{u\varphi} =$$

$$= \iint\limits_{S_{u\varphi}^{(H)}} \left(\frac{1}{h_\varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} E_u - \frac{1}{h_u \sqrt{1-u^2}} \frac{\partial}{\partial u} E_\varphi \sqrt{1-u^2} \right) dS_{u\varphi}.$$

Интеграл в левой части вычисляется по квадратурной формуле вида

$$\iint\limits_{S_{u\varphi}^{(H)}} \frac{dH_v}{dt} dS_{u\varphi} \approx \frac{dH_{v_{i,j+1/2,k+1/2}}}{dt} S_{u\varphi}^{(H)},$$

интеграл в правой части можно вычислить, применив формулу Грина,

$$\iint\limits_{S_{u\varphi}^{(H)}} \left(\frac{1}{h_\varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} E_u - \frac{1}{h_u \sqrt{1-u^2}} \frac{\partial}{\partial u} E_\varphi \sqrt{1-u^2} \right) dS_{u\varphi} =$$

$$= \oint\limits_L h_u E_u du + h_\varphi E_\varphi d\varphi,$$

где через L обозначен контур грани $v = v_i$. Используя при вычислении контурного интеграла квадратурные формулы средних, учитывая, что обход контура производится против часовой стрелки, можно получить

$$\oint\limits_L h_u E_u du + h_\varphi E_\varphi d\varphi =$$

$$= E_{\varphi i,\mathrm{j+1,k+1/2}} a \sqrt{\left(v_i^2 - 1\right)\left(1 - u_{j+1}^2\right)} \left(\varphi_k - \varphi_{k+1}\right) +$$

$$+ E_{u\, i,j+1/2,k} a \sqrt{\frac{v_i^2 - u_{j+1/2}^2}{1 - u_{j+1/2}^2}} \left(u_j - u_{j+1}\right) +$$

$$+ E_{\varphi i,\mathrm{j,k+1/2}} a \sqrt{\left(v_i^2 - 1\right)\left(1 - u_j^2\right)} \left(\varphi_{k+1} - \varphi_k\right) +$$

$$+ E_{u\, i,j+1/2,k+1} a \sqrt{\frac{v_i^2 - u_{j+1/2}^2}{1 - u_{j+1/2}^2}} \left(u_{j+1} - u_j\right) =$$

$$= a \sqrt{\frac{v_i^2 - u_{j+1/2}^2}{1 - u_{j+1/2}^2}} \Delta u_{j+1/2} \left(E_{u\, i,j+1/2,k+1} - E_{u\, i,j+1/2,k}\right) -$$

$$- a \sqrt{\left(v_i^2 - 1\right)} \Delta \varphi_{k+1/2} \left(E_{\varphi i,\mathrm{j+1,k+1/2}} \sqrt{1 - u_{j+1}^2} - \right.$$

$$\left. - E_{\varphi i,\mathrm{j,k+1/2}} \sqrt{1 - u_j^2} \right),$$

где $\Delta \varphi_{k+1/2} = \varphi_{k+1} - \varphi_k$, $\Delta u_{j+1/2} = u_{j+1} - u_j$.

При вычислении $S_{u\varphi}$ также используются квадратурные формулы средних:

$$S_{u\varphi}^{(H)} = \int\limits_{u_j}^{u_{j+1}} du \int\limits_{\varphi_k}^{\varphi_{k+1}} d\varphi\, h_u h_\varphi = \Delta \varphi_{k+1/2} \int\limits_{u_j}^{u_{j+1}} h_u h_\varphi du =$$

$$= \Delta \varphi_{k+1/2} \Delta u_{j+1/2} a^2 \sqrt{\left(v_i^2 - u_{j+1/2}^2\right)\left(v_i^2 - 1\right)}$$

Если собрать воедино полученные результаты, можно получить следующую аппроксимацию уравнения (4):

$$\frac{dH_{v\, i,j+1/2,k+1/2}}{dt} =$$

$$= \frac{1}{\Delta \varphi_{k+1/2} a \sqrt{\left(v_i^2 - 1\right)\left(1 - u_{j+1/2}^2\right)}} \times$$

$$\times \left(E_{u\, i,j+1/2,k+1} - E_{u\, i,j+1/2,k}\right) -$$

$$- \frac{1}{\Delta u_{j+1/2} a \sqrt{\left(v_i^2 - u_{j+1/2}^2\right)}} \times$$

$$\times \left(E_{\varphi i,\mathrm{j+1,k+1/2}} \sqrt{1 - u_{j+1}^2} - E_{\varphi i,\mathrm{j,k+1/2}} \sqrt{1 - u_j^2} \right)$$

Формулу (4) можно записать в более компактном виде:

$$\frac{dH_{v\, i,j+1/2,k+1/2}}{dt} =$$

$$= b_{i,j+1/2}^{(H)} \frac{E_{u\, i,j+1/2,k+1} - E_{u\, i,j+1/2,k}}{\Delta \varphi_{k+1/2}} -$$

$$- a_{i,j+1/2}^{(H)} \frac{E_{\varphi i,\mathrm{j+1,k+1/2}} \sqrt{1 - u_{j+1}^2} - E_{\varphi i,\mathrm{j,k+1/2}} \sqrt{1 - u_j^2}}{\Delta u_{j+1/2}},$$

где

$$a_{i,j+1/2}^{(H)} = \frac{1}{a \sqrt{\left(v_i^2 - u_{j+1/2}^2\right)}},$$

$$b_{i,j+1/2}^{(H)} = \frac{1}{a \sqrt{\left(v_i^2 - 1\right)\left(1 - u_{j+1/2}^2\right)}}.$$

Эти формулы справедливы для всех ячеек сетки Ω, чьи грани не попадают на внутренние границы счетной области, либо ребра не попадают на ось z. Аналогичным образом аппроксимируются остальные уравнения (1)–(3), (5), (6).

Наиболее сложным в данной задаче является вопрос о граничных условиях на оси симметрии эллипсоида. Единственными компонентами, определенными в узлах на оси z и не зависящими от φ являются E_u при $v = 1$, $-1 \le u \le 1$ (участок оси z при $-F \le z \le F$) и E_v при $u = -1$, $v \ge 1$ (участок оси z при $z \le -F$) и при $u = 1$, $v \ge 1$ (участок оси z при $z \ge F$).

Рассмотрим вывод граничных условий на примере компоненты E_u [6]. Для этого нужно умножить уравнение (2) на $dS_{v\varphi}$ и проинтегрировать результирующее соотношение по v, φ в пределах $1 \le v \le v_m$, $0 \le \varphi \le 2\pi$, где v_m – некоторое заданное значение, $v_m \le v_{3/2}$:

$$\int_1^{v_m}\int_0^{2\pi} a^2\sqrt{v^2-u^2}\sqrt{1-u^2}\,\frac{\partial E_u}{\partial t}dv\,d\varphi = $$
$$= -\int_1^{v_m} dv \int_0^{2\pi} \frac{\partial}{\partial v} a\sqrt{v^2-1}\sqrt{1-u^2}\,H_\varphi d\varphi.$$

Отсюда можно получить (при малых v_m) следующее соотношение:

$$a\cdot 2\pi \frac{\partial}{\partial t}E_u\left(v=1,u,t\right)\int_1^{v_m}\sqrt{v^2-u^2}\,dv \simeq$$
$$\simeq -\sqrt{v_m^2-1}\int_0^{2\pi} H_\varphi\left(v=v_m,u,\varphi,t\right)d\varphi.$$

Таким образом, производная по t от E_u в узлах на оси z зависит от интеграла по φ от значений H_φ на некотором контуре, охватывающем ось z. При использовании полученной формулы в разностных уравнениях интегралы по φ заменяются на квадратурные формулы.

При построении разностной аппроксимации по времени t для полученных уравнений используется метод покоординатного расщепления [7]. Согласно этому методу, решение осуществляется в три этапа: на первом этапе учитываются изменения функций по переменной φ, на втором – по u, на третьем – по v.

Для решения уравнений используются безусловно устойчивые разностные схемы с весами α, β ($1/2 \le \alpha \le 1$, $\beta = 1-\alpha$). Например, уравнения для E_u, H_v при учете изменения этих функций по переменной φ в разностном виде будут выглядеть следующим образом:

$$\frac{E_{u\,i,j+1/2,k}^{n+1/3} - E_{u\,i,j+1/2,k}^{n}}{\tau} =$$
$$= b_{i,j+1/2}^{(E)}\frac{H_{v\,i,j+1/2,k+1/2} - H_{v\,i,j+1/2,k-1/2}}{\Delta\varphi_k},$$

$$\frac{H_{v\,i,j+1/2,k+1/2}^{n+1/3} - H_{v\,i,j+1/2,k+1/2}^{n}}{\tau} =$$
$$= b_{i,j+1/2}^{(H)}\frac{E_{u\,i,j+1/2,k+1} - E_{u\,i,j+1/2,k}}{\Delta\varphi_{k+1/2}},$$

где

$$b_{i,j+1/2}^{(E)} = \frac{1}{a\sqrt{\left(v_i^2-1\right)\left(1-u_{j+1/2}^2\right)}},$$

$$b_{i,j+1/2}^{(H)} = \frac{1}{a\sqrt{\left(v_i^2-1\right)\left(1-u_{j+1/2}^2\right)}},$$

$\Delta\varphi_k = \varphi_{k+1/2} - \varphi_{k-1/2}$, $\Delta\varphi_{k+1/2} = \varphi_{k+1} - \varphi_k$, $\Delta\varphi_1 = 2\left(\varphi_{3/2} - \varphi_1\right)$, $1 \le k \le N_\varphi - 1$, $2 \le i \le N_v$, $1 \le j \le N_u - 1$, величины в правых частях определяются по формулам

$$H_v = \alpha H_v^{n+1/3} + \beta H_v^n,\ E_u = \alpha E_u^{n+1/3} + \beta E_u^n.$$

Для решения уравнений на каждом этапе строятся одномерные прогонки (на этапе переноса по φ – циклические прогонки). Вычисленные значения компонент на предыдущих этапах становятся начальными данными для решения уравнений на последующем этапе. При численной реализации граничных условий используются разностные налоги уравнений, записанных для проинтегрированных по углу φ компонент E_u, E_v и E_φ.

Результаты расчетов тестовой задачи

По изложенной в предыдущем разделе численной методике были проведены расчеты по исследованию зависимости погрешности численного решения от значений весовых параметров α, β и размеров шагов Δt, Δu, Δv пространственно-временной сетки.

Для тестирования разработанной численной методики используем задачу, имеющую аналитическое решение. Поскольку СШП ЭМИ имеет вид сходящейся к F' волны со сферическим фронтом, используем решение для дипольного излучения, но в виде сходящейся волны. Источники электромагнитного поля задаются в виде условия на поверхности эллипсоида

$$E_u\left(v=v_s\right) = \frac{\sqrt{1-u^2}}{F^3\sqrt{v_s^2-u^2}}\left\{\frac{2v_s}{r}\left(-\frac{g}{r}+F\dot{g}\right)+\frac{v_s^2-1}{r^2}\times\right.$$
$$\left.\times\left(\frac{3g}{r^2}-\frac{3F\dot{g}}{r}+F^2\ddot{g}\right)\right\},$$

где $r = v_s - u$, $g(\tau) = \begin{cases}\tau^3 e^{-\alpha\tau}, \tau > 0\\ 0\quad\quad, \tau \le 0\end{cases}$, $\tau = t - F\left(1+u\right)$.

В таблице приведены значения основных параметров задачи.

Значения основных параметров задачи

Область решения по u	$-1 \le u \le 1$
Область решения по v	$1 \le v \le 1,7$
Область решения по φ	$0 \le \varphi \le 2\pi$
Границы эллипсоида	$u_s = 0,7;\ v_s = 1,34$
Параметры эллипсоида	$D = 20,\ F = 15,8$

На рис. 5 представлены результаты расчетов, проведенных с целью выбора наиболее подходящего шага по времени. Были выполнены 3 расчета при фиксированном шаге по пространству $\Delta z = 0,05$ $\left(\Delta u = \Delta v = \frac{\Delta z}{F}\right)$: $\Delta t = 0,1$; $\Delta t = 0,05$; $\Delta t = 0,02$.

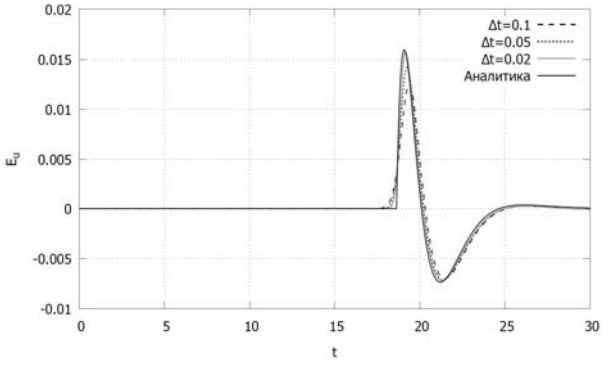


Рис. 5. Зависимость E_u от t точке v = 1,17, $u = 0$

Из рис. 5 видно, что с уменьшением шага по времени численное решение сходится к аналитическому, и при расчете с шагом $\Delta t = 0,02$ получается наилучшее согласие результатов.

Во второй серии расчетов (рис. 6) при $\Delta t = 0,02$ варьировались шаги по пространству ($\Delta z = 0,1$; $\Delta z = 0,05$; $\Delta z = 0,02$). Было проведено 3 расчета, результаты которых сравнивались с аналитическим решением для компоненты E_u.

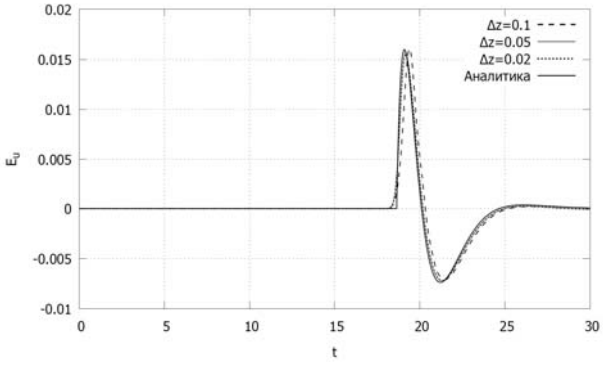


Рис. 6. Зависимость E_u от t в точке v = 1.17, $u = 0$

Видно, что во всех трех вариантах получено хорошее согласие результатов расчетов как между собой, так с аналитическим решением, поэтому для дальнейших расчетов можно рекомендовать шаги по пространству $\Delta u = \Delta v = \frac{\Delta z}{F} = \frac{0,05}{F}$.

Помимо пространственно-временных шагов в разностной схеме присутствует параметр неявности α, который также может оказать влияние на результаты. Было также проведено 3 расчета: 1-ый по центрированной схеме $\alpha = 1/2$, 2-ой – α определяется по формуле $\alpha = \frac{1}{2}\left(e^{-\gamma\cdot\left(\frac{v^2}{\Delta v^2}+\frac{u^2}{\Delta u^2}\right)}+1\right)$ с $\gamma = 0,01$, $\Delta v = \Delta u = 0,1$ и 3-ий по полностью неявной схеме с $\alpha = 1$. На рис. 7 представлены временные зависимости компоненты электрического поля E_u для вариантов расчетов с разными способами задания параметра α. Как можно видеть из этого рисунка, численное решение, получаемое по центрированной и чисто неявной схемам, обладает слишком низкой точностью, поэтому для дальнейших расчетов рекомендуется использовать вариант задания коэффициента α в виде зависящей от координат функции, значения которой меняются в пределах $\{0,5;1\}$.

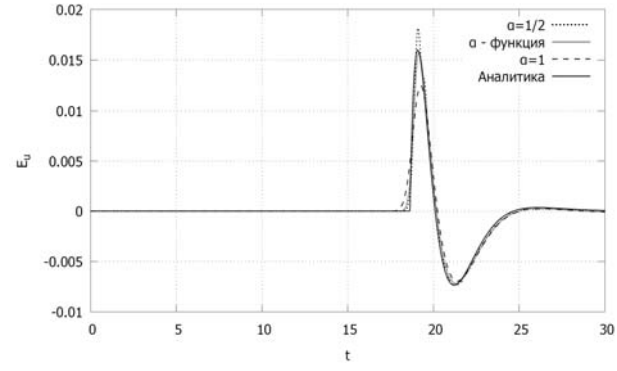


Рис. 7. Зависимость E_u от t в точке v = 1.17, $u = 0$

Для иллюстрации процесса распространения излучения в эллипсоиде на рис. 8 представлено пространственно-временное распределение плотности энергии на разные моменты времени.

Заключение

Сформулирована постановка задачи для численного моделирования генерации и распространения СШП ЭМИ в эллиптическом излучателе. Изложен метод и алгоритм решения поставленной задачи, основанный на интегрировании однородных уравнений Максвелла в эллиптических координатах с использованием метода покоординатного расщепления. Источники электромагнитного поля задавались в виде эффективных граничных условий на внутренней поверхности излучателя. Для определения граничных условий на оси симметрии эллипсоида решалась система уравнений Максвелла для проинтегрированных по углу компонент полей.

Представлено сравнение результатов расчетов тестовой задачи с аналитическим решением; определены счетные параметры, гарантирующие хорошую точность в расчетах.

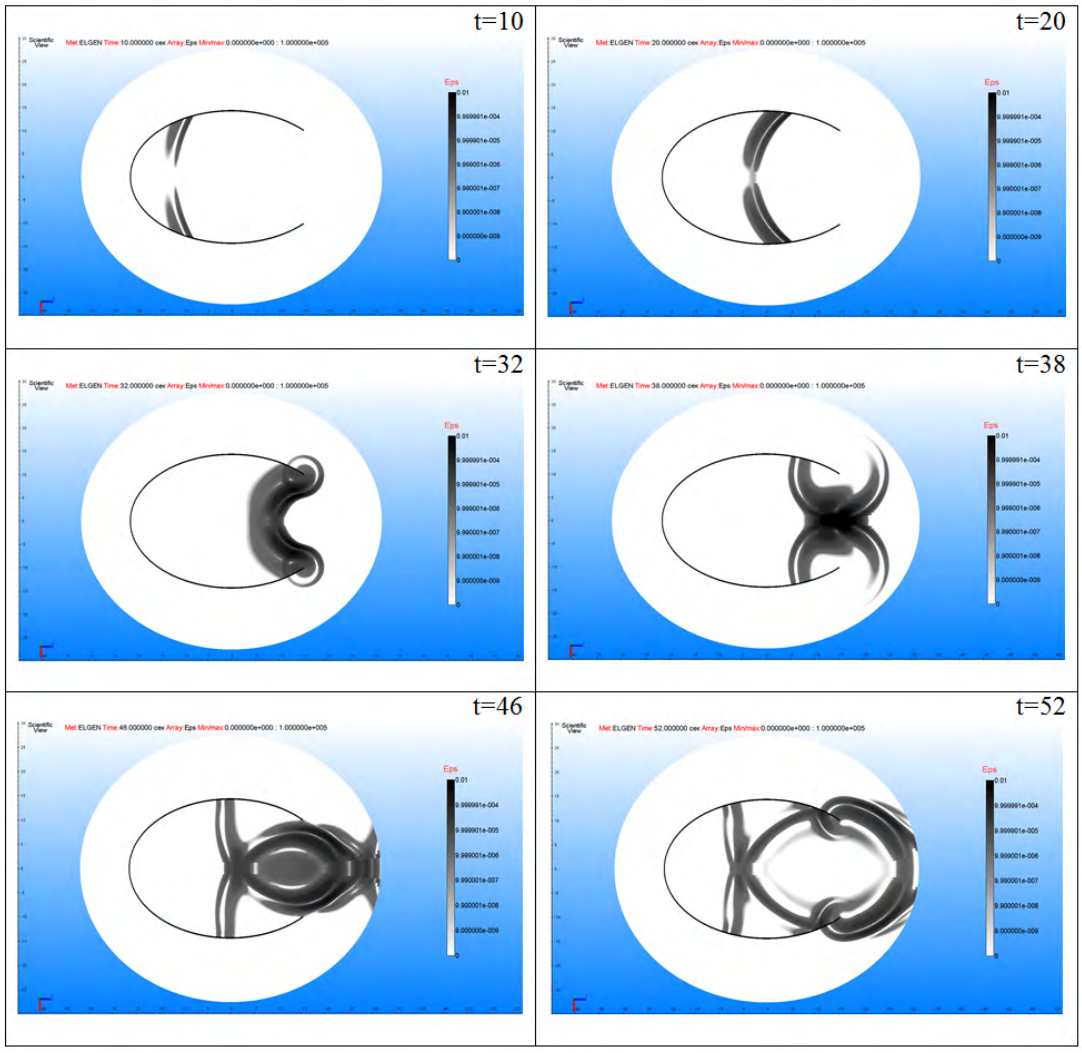


Рис. 8. Пространственно-временное распределение плотности энергии на разные моменты времени

Литература

1. Месяц Г. А., Яландин М. И. Пикосекундная электроника больших мощностей // Успехи физических наук. 2005. Т. 175, № 3. С. 225.

2. Giri D. V. High-Power Electromagnetic Radiators. Harvard University Press, Cambridge-London, 2004.

3. Голубев А. И., Долженков И. В., Солдатов А. В. Разностный метод вычисления распределения электромагнитного поля в полости параболического излучателя // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов. 2008. Вып. 3. С. 3–18.

4. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1970.

5. Солдатов А. В. Эффективные граничные условия для задач электродинамики с приповерхностными источниками // Доклады академии наук. 2007. Т. 413, № 5. С. 1–4.

6. Holland R. THREDS: A Finite-Difference Time-Domain EMP Code in 3D-Spherical Coordinates // IEEE Trans. Nucl. Sci., 1983. Vol. NS-30, N. 6. P. 4592–4595.

7. Марчук Г. И. Методы вычислительной математики. М.: Наука, 1980.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧ АЭРОДИНАМИКИ СО СТАТИЧЕСКОЙ АДАПТАЦИЕЙ СЕТКИ ПОД ОСОБЕННОСТИ РЕШЕНИЯ

А. В. Стручков, Р. Н. Жучков

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

При решении индустриальных задач наиболее применимыми являются неструктурированные расчетные сетки, так как обладают большей гибкостью при дискретизации физических областей сложной геометрической конфигурации и обеспечивают возможность полной автоматизации процесса построения сетки [1–4]. Однако основной проблемой при использовании неструктурированных сеток является возможная потеря точности решения из-за недостаточной сеточной разрешимости, особенно в области ударных волн.

Одним из эффективных методов повышения сеточной разрешимости является применение локального измельчения расчетной сетки. Для выполнения данной задачи часто используют метод адаптивных сеток [5–9]. В основном, разработанные методы адаптивно-встраивающихся сеток применяются на структурированных сетках или на неструктурированных сетках, но с ячейками определенной формы [6–10].

Метод адаптивно-встраивающихся сеток, применяемый на произвольных сетках, а также его использование при решении задач аэродинамики, описано вэтой работе.

Предлагаемый метод на основе анализа градиентов физических величин автоматически определяет область локального измельчения. К ячейкам внутри обозначенной области применяется алгоритм дробления, основанный на разбиении за счет добавления новых узлов [5]. Главным требованием к ячейкам является свойство выпуклости.

Наиболее эффективное применение алгоритма наблюдается при решении задач с ударными волнами, так как области ударных волн имеют достаточно сложной формы фронт и выделить эту область на этапе построения сетки не просто. Алгоритм обеспечивает автоматическое измельчение в области ударной волны, что позволяет более качественно прописать ее фронт. Следует так же отметить, что предлагаемый алгоритм применяется отдельно от процесса решения, то есть вначале проводится расчет на основной сетке, и только затем сетка дробится. В этом заключается статичность алгоритма. Однако это не уменьшает значимости алгоритма и даже применяемый в таком варианте он дает существенный результат по повышению точности получаемого решения, что показывается далее на задачах сверх- и гиперзвукового обтекания различных объектов.

Адаптация расчетной сетки

В основе метода адаптации расчетной сетки лежит алгоритм дробления ячеек, основанный на разбиении граней, образующих ячейку [5, 7]. Рассмотрим алгоритм на примере шестигранной ячейки.

Для формирования новых граней необходимо добавить новые узлы в центр каждой грани и на середину каждого ребра (рис. 1а) исходной ячейки.

Для формирования новых граней внутри исходной ячейки в ее центр добавляется новый узел (рис. 2).

В итоге из исходной ячейки имеем восемь адаптивных ячеек – ячеек первого уровня адаптации. Алгоритм также обобщается на ячейки в форме произвольного выпуклого многогранника. Пример разбиения подобной ячейки показан на рис. 1б.

Для применения алгоритма адаптации необходимо определить области измельчения ячеек сетки, для чего используют критерии адаптации [8, 9].

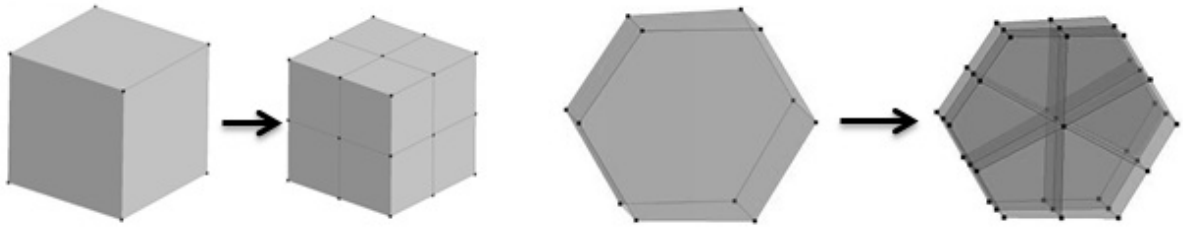
Критерии адаптации расчетной сетки

Для автоматического определения области ударных волн, возникающих при трансзвуковом и сверхзвуковом обтекании, одним из подходящих критериев является функция вида (1), в основе которой лежит величина градиента газодинамических величин [8, 9].

$$f = \left(V_{cell}\right)^{2/3} \cdot \left|\nabla F\right| \qquad (1)$$

V_{cell} – объем ячейки, ∇F – градиент газодинамической величины.

Величина $\left(V_{cell}\right)^{2/3}$ в выражении (1) применяется для оценки геометрического размера ячейки и позволяет учесть зависимость значение критерия f от ее объема. Таким образом, в сочетании со значением градиента газодинамической величины, максимальное значение критерия будет достигаться в ячейках с наибольшим объемом и высоким значением градиента, что обеспечит попадание в область локального измельчения крупных ячеек в области сильного изменения газодинамических величин (например, ударная волна). Минимальное значение кри-



а б

Рис. 1. Добавление новых узлов в центр грани и на середину ребер: а– для шестигранной ячейки, б – для ячейки в форме произвольного многогранника

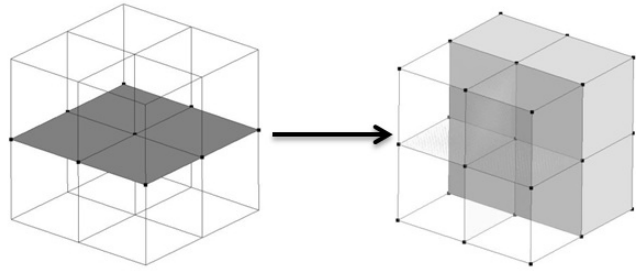
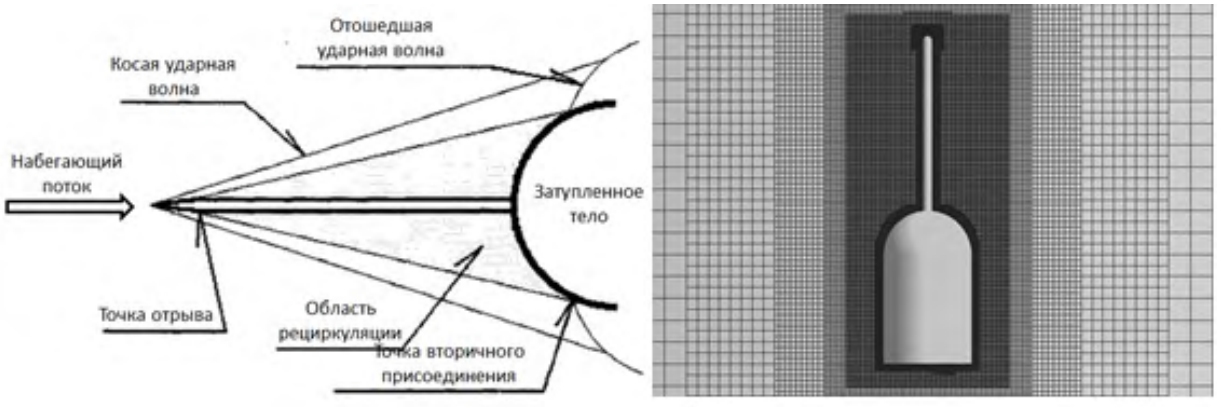


Рис. 2. Формирование граней внутри ячейки и образование ячеек первого уровня адаптации



а б

Рис. 3. Схема течения: а – структура потока вблизи тела с иглой, б – расчетная модель

терия f характерно для области с плавным изменением газодинамических величин и достигается в ячейках с наименьшим объемом и низким значением градиента, что приведет к их исключению из области локального измельчения.

В данной работе в качестве газодинамической величины F используется плотность или давление. Эти величины наиболее подходящие для выделения областей ударной волны [8], так как их градиент в указанной области будет принимать максимальное значение.

Моделирование гиперзвукового обтекания тела с иглой

Согласно [10–12] использование в носовой части летательного аппарата выступающих вперед элементов применяется для снижения аэродинамического сопротивления. Ввиду этого у инженеров в области сверхзвуковой авиационной и ракетной техники возникает интерес к такому типу головных частей. В качестве подобной носовой части может применяться выступающая острая игла (рис. 3). Наличие острой иглы в сочетании с хорошо обтекаемой формой основного тела позволяет снизить сопротивление на сверхзвуковом режиме полета за счет того, что торможение происходит не в системе косых скачков уплотнения, а на одной отошедшей ударной волне [10–12]. Сопротивление уменьшается и в том случае, когда игла установлена перед затупленным телом. С помощью иглы можно лучше использовать тягу двигательной установки высокоскоростного летательного аппарата, значительно снизить тепловые потоки за счет формирования области рецирку-

ляции, размер которой определяется параметрами иглы. Игла, установленная на носовой части, дает преимущества, как при взлете аппарата, так и в условиях полёта [13–15]. Структура потока вблизи тела с иглой в носовой части показано на рис. 3а.

Рассмотрим влияние алгоритма адаптации на получаемое значение коэффициента силы лобового сопротивления и сравним результаты с экспериментальными данными [13–15]. Количество ячеек в неструктурированной расчетной сетке (рис. 3б) составляет ~10 млн. В предполагаемой области возникновения ударных волн задано локальное измельчение ячеек дискретной модели. Для расчета обтекания на внешней границе задан набегающий поток воздуха со скоростью 886,425 м/с (число Маха 6), температурой 54,87° K, давлением 525,67 Па и углами атаки 1°, 2°, 4°.

Для каждого угла атаки выполнен расчет на исходной сетке. Затем, применяя алгоритм адаптации, было построено локальное измельчение в областях косой ударной и отошедшей ударной волны. Из рис.4видно, что в зависимости от заданного угла атаки меняется направление отошедшей ударной волны. Использование алгоритма адаптации в сочетании с критерием на основе числа Маха, позволяет построить адаптивную сетку (рис. 5), характеризующуюся областью локального измельчения, совпадающей с направлением распространения фронта

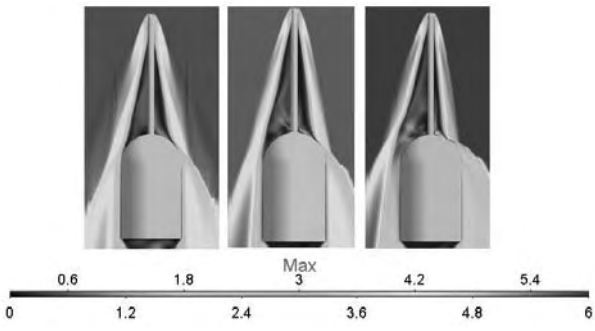


Рис. 4. Поле числа Маха
(слева на право – угол атаки 1°, 2°, 4°)

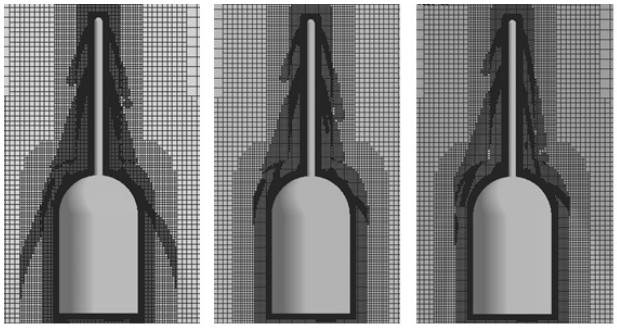


Рис. 5. Адаптивная сетка
(слева на право – угол атаки 1°, 2°, 4°)

Таблица 1

Значение коэффициента силы лобового сопротивления

α°	Эксперимент	Расчет (исходная сетка)	Расчет (сетка 1-го уровня адаптации)
1°	0,242	0,263 (8,9 %)	0,244 (1 %)
2°	0,293	0,316 (8 %)	0,293 (0,13 %)
4°	0,46	0,497 (8,1 %)	0,462 (0,5 %)

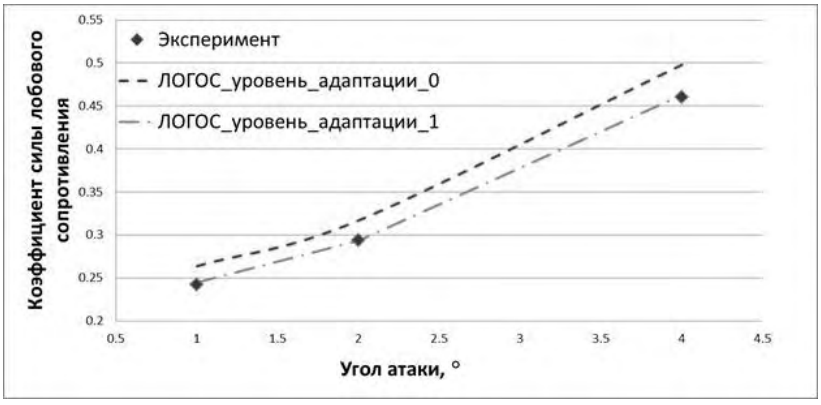


Рис. 6. Значение коэффициента силы лобового сопротивления для углов атаки 1°, 2° и 4°

Таблица 2

Размерность расчетных сеток

α°	Число ячеек, исходная сетка	Число ячеек, сетка 1-го уровня адаптации
1°	3 552 199	5 983 175
2°	3 552 199	5 431 852
4°	3 552 199	5 553 149

ударной волны. То есть на основе исходной сетки средствами алгоритма адаптации были получены три различных адаптивных сетки, характеризующиеся локальным измельчением, повторяющим фронт ударной волны, реализуемой при разных заданных условиях.

По результатам расчета определялось значение коэффициента силы лобового сопротивления (табл. 1, рис. 6).

Сравнение полученных значений проводилось с результатами эксперимента. Приведенные в табл. 1 и на рис. 6 результаты показывают качественное улучшение получаемых значений коэффициента силы лобового сопротивления при использовании алгоритма адаптации, так как в результате его применения удалось более качественно прописать возникающие ударные волны. В табл. 2 представлены размеры сеточных моделей, используемых для расчета.

Видно, что при использовании метода статической адаптации число ячеек расчетной сетки увеличивается по сравнению с исходной сеткой. Практическим путем было установлено, что сетка, характеризующаяся сеточным разрешением сопоставимым с сеткой первого уровня адаптации, имеет более 10 млн ячеек. При такой размерности расчетной сетки время получения численного решения заметно увеличивается. Таким образом, проявляется неоспоримое преимущество адаптивной сетки, заключающееся в меньшем числе ячеек, что напрямую влияет на уменьшение расчетного времени задачи.

Моделирование сверхзвукового обтекания остроконечного конуса, из носовой части которого происходит вдув встречной струи газа

Согласно [16–19] еще одним практическим методом снижения величины силы лобового сопротивления, действующей на летательный аппарат, движущейся в плотных слоях атмосферы, является впрыск встречной струи в набегающий воздушный поток. Так же этот подход применяется для снижения теплового нагрева носовой части изделия за счет того, что вблизи носовой части возникает холодная область рециркуляции [16–19]. В свою очередь при увеличении интенсивности вдуваемой струи, величина силы лобового сопротивления уменьшается, так как область рециркуляции низкого давления увеличивается и отошедшая ударная волна, главным образом являющаяся причиной лобового сопротивления, становится слабее. На рис. 7а представлена схема течения, формируемого вблизи затупленной носовой части изделия. В целом, форма носа может быть так же остроконечной (рис. 7б), в этом случае структура течения аналогична.

Рассмотрим влияние алгоритма адаптации на получаемое значение коэффициента силы лобового сопротивления при сверхзвуковом обтекании остроконечной модели (рис. 7б) и сравним результаты с экспериментальными данными [17]. Расчетная область обладает центральной осевой симметрией и представляет собой конусовидный объект диаметром 40 мм и длиной 85 мм. Количество ячеек в начальной неструктурированной расчетной сетке (рис. 8) составляет ~732 000.

При построении сетки задана общая область локального измельчения вблизи тела, области для более точной детализации возникающих ударных волн не задавались. Для расчета обтекания на внешней границе задан набегающий поток воздуха с числом Маха 3,98, температурой 96,9 K, давлением 9334,7 Па и углом атаки 0°.

Навстречу потоку из зазора круглого сечения радиусом 1 мм, расположенного в носовой части модели подается азот с параметрами потока: число Маха 1, полная температура 300 K, давление 729028,867 Па.

На рис. 9 представлено поле числа Маха вблизи поверхности всего изделия и в области носовой части. Видно, что первоначальная сетка обладает малой сеточной разрешимостью для достаточной детализации возникающих ударных волн и структура течения сильно «замазана». Так же о недостаточной сеточной разрешимости говорит полученное значение коэффициента силы лобового сопротивления – 0,046, отклонение которого от экспериментальных данных составляет 17 %.

После применения алгоритма адаптации расчетная сетка стала характеризоваться наличием областей локального измельчения вдоль фронта ударных волн. Всего для получения решения требуемой точности (отклонение от экспериментальных данных ~10 %) было выполнено три уровня адаптации расчетной сетки. Поле числа Маха для сетки третьего уровня адаптации представлено на рис. 10.

Из рис. 10 видно, что сетка третьего уровня адаптации позволяет качественно прописать структуру течения вблизи изделия. В системе четко можно выделить фронт отделившейся и отошедшей ударной волны, а также область рециркуляции низкого давления. Как следствие лучшей детализации структуры течения, полученное значение коэффициента силы лобового сопротивления имеет отклонение от экспериментальных данных равное 10,2 %. Построенные сетки для каждого из уровней адаптации представлены на рис. 11.

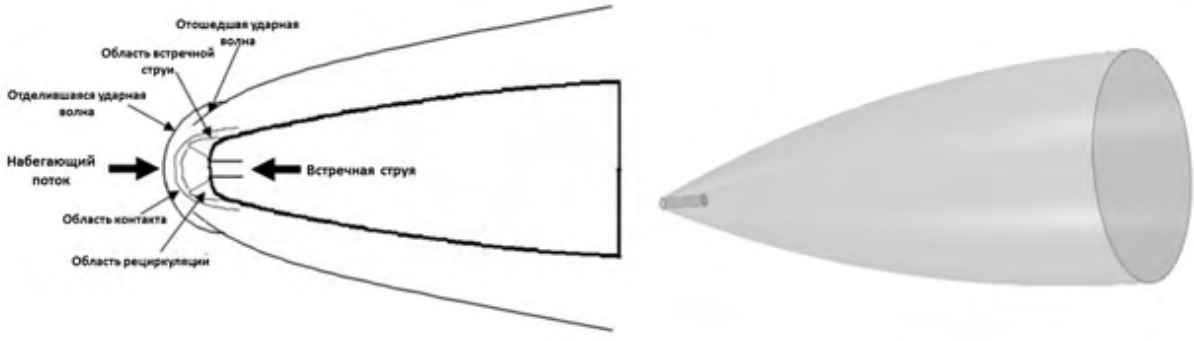
Видно, что локальное измельчение проходит именно в тех областях, где возникает ударная волна. В результате разбиения исходных ячеек формируются произвольные многогранники.

В табл. 3 представлены полученные значения коэффициента силы лобового сопротивления, а так же отклонение от экспериментальных данных.

Таблица 3

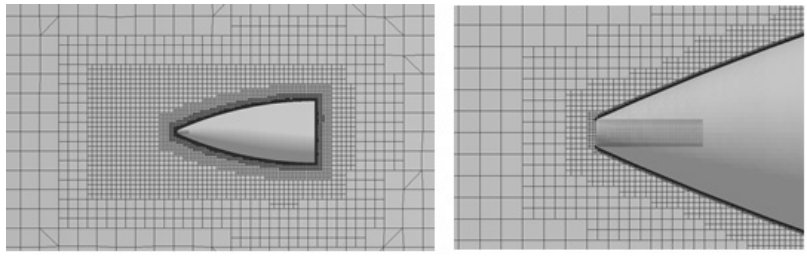
Значение коэффициента силы лобового сопротивления

Сетка, расчет	Значение коэффициента силы лобового сопротивления	Отклонение, в %
Расчет (исходная сетка)	0,0463	17,2
Расчет (сетка 1-го уровня адаптации)	0,0477	14,7
Расчет (сетка 2-го уровня адаптации)	0,0484	13,4
Расчет (сетка 3-го уровня адаптации)	0,0502	10,2
Эксперимент	0,056	–



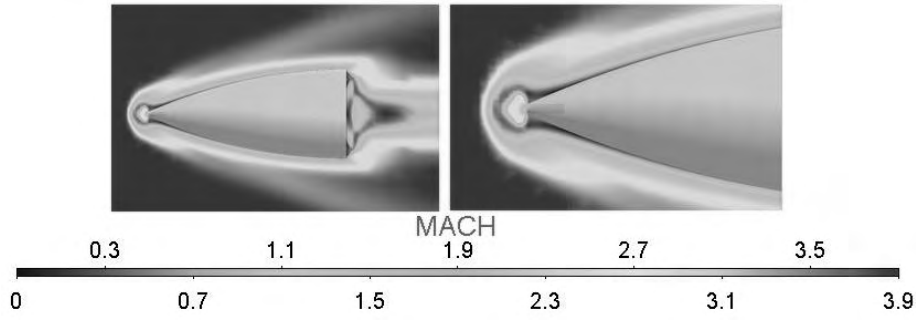
а б

Рис. 7. Структура потока: а – вблизи тела, б – расчетная модель



а б

Рис. 8. Расчетная сетка: а – общий вид, б – вблизи носовой части



а б

Рис. 9. Поле числа Маха, начальная сетка: а – вблизи поверхности всего изделия, б – в области носовой части

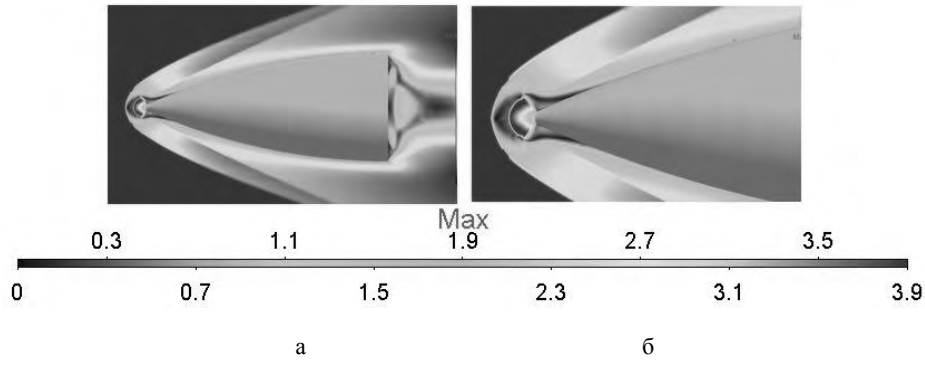


Рис. 10. Поле числа Маха, сетка третьего уровня адаптации: а – вблизи поверхности всего изделия, б – в области носовой части

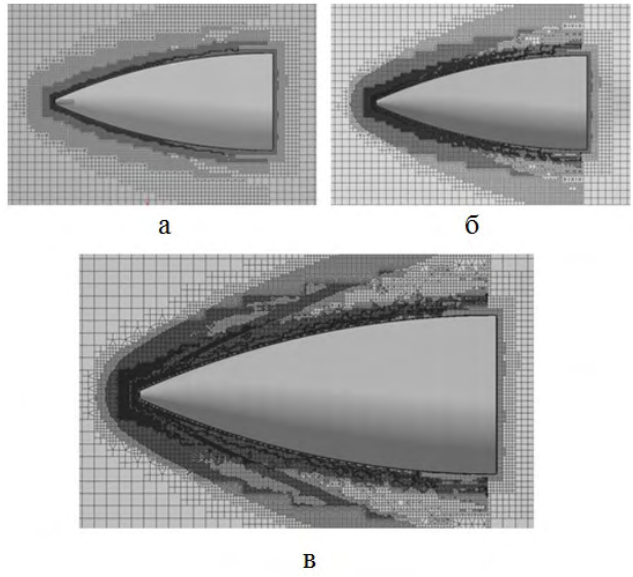


Рис. 11. Сетки вблизи изделия: а – 1 уровень адаптации, б – 2 уровень адаптации, в – 3 уровень адаптации

Можно сделать вывод, что на каждом из уровней адаптации полученная величина погрешности в определении коэффициента силы лобового сопротивления уменьшалась.

Заключение

В работе рассматривается возможность применения метода статической адаптации для решения задач сверх- и гиперзвукового обтекания различных объектов, характерной особенностью которого является формирования головной ударной волны. Предлагаемый алгоритм позволяет в автоматическом режиме построить локальное измельчение сетки в области ударной волны, что качественно сказывается на точности получаемого решения. На рассматриваемых задачах показано уменьшение погрешность в решении до 7 %.

Литература

1. Deryugin Yu. N., Zhuchkov R. N., Zelenskiy D. K., Kozelkov A.S., Sarazov A. V., Kudimov N. F., Lipnickiy Yu. M., Panasenko A. V., Safronov A. V. Validation Results for the LOGOS Multifunction Software Package in Solving Problems of Aerodynamics and Gas Dynamics for the Lift-Off and Injection of Launch Vehicles // Mathematical Models and Computer Simulations, 2015.Vol. 7, N 2. P. 144–153.

2. Jothiprasad G., Mavriplis D. J., Caughey D. A. Higher-order time integration schemes for the unsteady NavierStokes equations on unstructured meshes // Journal of Computational Physics. 2003. Vol. 191, N 2. P. 542–566.

3. Kozelkov A. S., Kurulin V. V., Lashkin S. V., Shagaliev R. M., and Yalozo A. V., Investigation of Supercomputer Capabilities for the Scalable Numerical

Simulation of Computational Fluid Dynamics Problems in Industrial Applications // Computational Mathematics and Mathematical Physics, 2016.Vol. 56, N 8. P. 1506–1516.

4. Mavriplis D. J. Unstructured mesh discretizations and solvers for computational aerodynamics // AIAA Paper. N 2007-3955.

5. Стручков А. В., Козелков А. С., Жучков Р. Н., Уткина А. А., Саразов А. В. Численное моделирование задач аэродинамики со статической адаптацией сетки под особенности решения. ВАНТ, сер. Математическое моделирование физических процессов. 2019. Вып. 2. С. 55–67.

6. Гильманов А. Н. Методы адаптивных сеток в задачах газовой динамики. М.: Наука. Физматлит, 2000.С. 248.

7. Adaptivemeshrefinement– theory and applications: Proc. Chicago Workshop on Adaptive Mesh Refinement Methods (Lecture Notes in Comp. Sci. and Eng. September, 35, 2003) / Ed. by T. Plewa, T. Linde, Weirs V. Gregory. Chicago: Springer, 2005.

8. Daunenhofer J. F., Baron J. R. Grid Adaption for the 2D Euler Equations // Technical report AIAA-85-0484, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1985.

9. Warren G. P., Andersom W. K., Thomas J. L., Krist S. L. Grid convergence for adaptive methods // AIAA-91-1592. AIAA 10th Computational fluid dynamics conference.

10. Kalimuthu R., Mehta R. C., Rathakrishnan E. Drag Reduction for Spike Attached to Blunt-Nosed Body at Mach 6 // JOURNAL OF SPACECRAFT AND ROCKETS. 2010. Vol. 47, N 1.

11. Reding J. P., Guenther R. A., Ritchter B. J. Unsteady Aerodynamic Consideations in the Design of a Drag-Reduction Spike // Journal of Spacecraft and Rockets.1977. Vol. 14, N 1. P. 54–60.

12. Koeing K., Bridges D. H., and Chapman G. T. Transonic Flow Modes of an Axisymmetric Blunt Body // AIAA Journal. 1989. Vol. 27, N 9. P. 1301–1302.

13. Motoyama N., Mihara K., Miyajima R.,Watanuki T., and Kubota H. Thermal Protection and Drag Reduction with Use of Spike in Hypersonic Flow // AIAA Paper. N 2001-1828.

14. Kalimuthu R. Experimental Investigation of Hemispherical Nosed Cylinder with andWithout Spike in a Hypersonic Flow // Ph.D. Thesis. Department of Aerospace Engineering, Indian Inst. of Technology, Kanpur, India, April 2009.

15. Mehta R. C. Flowfield Computations over Conical, Disc and Flat Spiked Body at Mach 6 // AIAA Paper. N 2009-0325.

16. Tamada, S.Aso, and Y.Tani. Numerical Study of the Effect of the Opposing Jet on Reduction of Aerodynamic Heating with Different Nose Configurations / 26th International Congress of the Aeronautical Sciences, Anchorage, AL, September 14 – 19, 2008

17. HayashiK., AsoS. and TaniY. Numerical Study of Thermal Protection System by Opposing Jet // AIAAPaper. N 2005-188.

18. HayashiK., AsoS., and TaniY. Experimental Study of Thermal Protection System by Opposing Jet in Supersonic Flow // Journal of Spacecraft and Rockets. 2006. Vol. 43, N 1. P. 233–238.

19. Cheng G., Neroorkar K., Chen Y., Wang T. and Daso E. Numerical Study of Flow Augmented Thermal Management for Entry and Re-entry Environments / 25th AIAA Applied Aerodynamics Conference, Miami, FL, June 25–28, 2007.

ПАКЕТ ПРОГРАММ ЛОГОС-ПРОЧНОСТЬ. ВЕРИФИКАЦИЯ МОДУЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МОДАЛЬНОГО АНАЛИЗА

З. Д. Трунова, С. С. Косарим, В. А. Юносова

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Пакет программ (ПП) ЛОГОС-Прочность предназначен для решения двумерных и трехмерных задач анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) и прочности конструкций при динамических, статических и вибрационных нагрузках [1, 2].

ПП ЛОГОС-Прочность находится в постоянном развитии, ежегодно пополняясь новыми возможностями, поэтому необходимо проводить его тестирование на регулярной основе.

Одним из расчетных модулей, входящих в состав ПП ЛОГОС-Прочность, является модуль решения задач модального анализа, который позволяет получать собственные частоты и соответствующие им собственные формы колебаний конструкций.

Вычисление собственных частот и соответствующих им форм колебаний является важной составной частью расчетных исследований динамического отклика конструкций на действие вибрационных нагрузок.

В некоторых случаях расчет собственных частот и форм колебаний конструкций необходимо проводить с учетом действующих на них статических нагрузок, вызывающих начальное напряженно-деформируемое состояние (НДС).Появление значительного уровня напряжений в конструкциях в следствие действия статических нагрузок может приводить к существенному изменению величин собственных частот конструкций.

Система уравнений для получения собственных частот и соответствующих форм колебаний конструкций, полученная с использованием метода конечных элементов, имеет следующий вид:

$$\left(\left[K\right]+\left[K_g\right]-\omega_j^2\left[M\right]\right)\left\{\varphi_j\right\}=0 \quad \left(j=1,2,\ldots,n\right) \quad (1)$$

$\left[K\right]$ – матрица жесткости системы $\left(n\times n\right)$;

$\left[K_g\right]$ – геометрическая матрица жесткости системы $\left(n\times n\right)$ (учет предварительного НДС);

$\left[M\right]$ – матрица масс системы $\left(n\times n\right)$;

$\left[\omega_j\right]$ – j-я частота собственных колебаний конструкции;

$\left\{\varphi_j\right\}$ – j-й собственный вектор системы (форма колебаний), соответствующий собственной частоте ω_j;

n – количество степеней свободы конечно-элементной модели.

Для данной системы уравнений решается неполная проблема собственных значений. Как правило, ищутся собственные частоты с наименьшими значениями.

Текущая реализация модуля решения задач модального анализа в ПП ЛОГОС-Прочность имеет следующие особенности:

- обеспечивается поддержка работы как с закрепленными, так и с незакрепленными моделями;
- используются только линейные упругие материалы. Поддерживаются изотропный, ортотропный и анизотропный варианты материалов;
- в 2017–2018 годах появилась поддержка оболочечных и балочных конечных элементов;
- в 2017–2018 годах появилась возможность учета контактного взаимодействия для определения пятна контакта.

Для оценки работоспособности и точности получаемого решения при использовании рассматриваемого модуля проведена работа по решению набора из 18 верификационных задач. Выбранные задачи имеют либо точное аналитическое решение, либо данные экспериментального исследования.

Для исследования сходимости результатов, получаемых при численном решении задач, генерировалось по три последовательно сгущающихся конечно-элементных сетки (КЭС). Также, проводилось исследование влияния типа используемого конечного элемента на точность получаемого решения. Использовались, как объемные, так и балочные и оболочечные конечные элементы.

Теперь перейдем к рассмотрению части решенных задач.

Задача 1. Свободные частоты колебаний прямоугольной пластины, шарнирно опертой по контору

Геометрия задачи представлена на рис. 1.

Пластина размером $a_x=1$ [м], $a_y=0,6$ [м] и толщиной $h=0,04$ [м] шарнирно оперта по контуру.

Расчет проводился с использованием модели упругого изотропного материала.

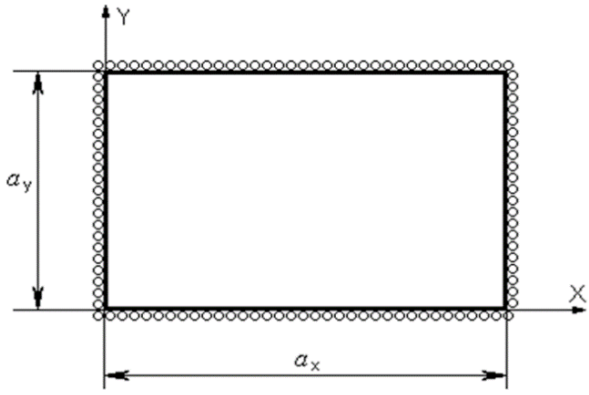


Рис. 1. Геометрия задачи

При проведении расчета использовались следующие типы конечных элементов (КЭ):

- 8-узловые шестигранные объемные КЭ;
- 20-узловыешестигранные объемные КЭ;
- оболочечные КЭ.

Также, использовались три вида последовательно сгущающихся КЭС:

- 50×30 ячеек;
- 75×45 ячеек;
- 100×60 ячеек.

В задаче вычислялось три собственных частоты колебаний пластины.

Рассмотрим аналитическое решение данной задачи. Собственные частоты колебаний прямоугольной пластины вычисляются по формуле [3]:

$$\omega_{n,m} = \pi^2 \cdot \left[\left(\frac{n}{a_x} \right)^2 + \left(\frac{m}{a_y} \right)^2 \right] \cdot \sqrt{\frac{D}{\rho \cdot h}}, \qquad (2)$$

где n, m – количество полуволн соответственно в направлении осей OX и OY;

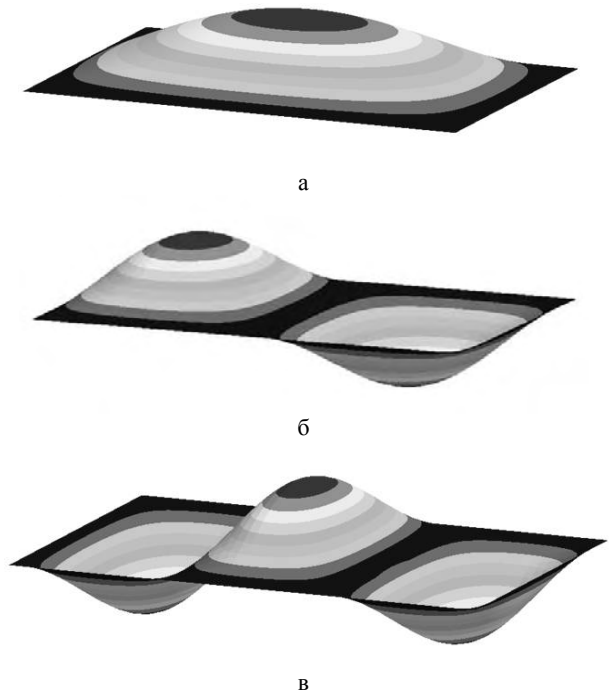
$D = \dfrac{E \cdot h^2}{12 \cdot \left(1 - \mu^2\right)}$ – цилиндрическая жесткость;

ρ – плотность материала пластины;

E – модуль упругости;

μ – коэффициент Пуассона.

На рис. 2 представлены полученные формы колебаний для трех собственных частот: рис. 2а – первая форма колебаний для собственной частоты $\omega = 354{,}413$, рис. 2б – вторая форма колебаний для собственной частоты $\omega = 628{,}438$, рис. 2в – третья форма колебаний для собственной частоты $\omega = 1085{,}152$.



а

б

в

Рис. 2 Формы колебаний пластины: а – 1-ая форма колебаний б – 2-ая форма колебаний, в – 3-я форма колебаний,

На рис. 3 представлены графики зависимости первой собственной частоты от характерного размера ячейки для различных типов КЭ, $\omega_{аналит.1} = 363{,}72$.

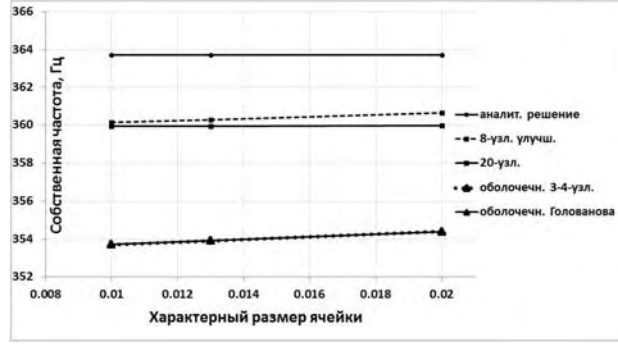


Рис. 3. Графики зависимости 1-ой собственной частоты от характерного размера ячейки для различных типов КЭ

Наилучшую точность показали 8-узловые шестигранные объемные КЭ. Наибольшая погрешность с использованием этих КЭ получена на сетке с размером 100×60 ячеек, и составила 0,98 % по отношению к аналитическому решению.

Наибольшая погрешность по отношению к аналитическому решению получена при проведении расчетов с использованием оболочечных КЭ на сетке с размером 100×60 ячеек. Она составила 2,75 %, что удовлетворяет требованиям при проведении расчетов. Таким образом, получено хорошее качественное и количественное согласование по частотам и формам собственных колебаний с аналитическим решением.

Задача 2. Свободные частоты колебаний балки постоянного прямоугольного поперечного сечения, закрепленной одним торцом

Геометрия задачи представлена на рис. 4.

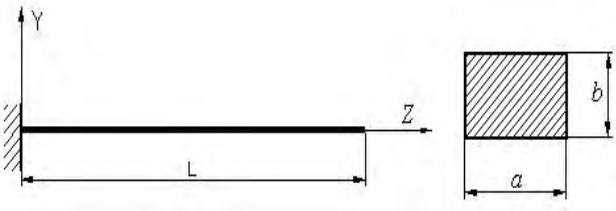


Рис. 4. Геометрия задачи

Балка длиной $L = 1\,[\text{м}]$, с высотой поперечного сечения $a = 0{,}1\,[\text{мм}]$ и шириной поперечного сечения $b = 0{,}05\,[\text{м}]$ закреплена одним торцом. Расчет проводился с использованием модели упругого изотропного материала.

При расчете использовались различные типы конечных элементов:

- 8-узловые шестигранные объемные КЭ;
- 20-узловые шестигранные объемные КЭ;
- оболочечные КЭ;
- балочные КЭ.

Также, использовались три вида последовательно сгущающихся КЭС:

- 100×2×2 ячеек;
- 200×3×3 ячеек;
- 300×4×4 ячеек.

В задаче вычислялось три собственных частоты колебаний балки.

Рассмотрим аналитическое решение данной задачи.

Собственные частоты колебаний балки постоянного прямоугольного поперечного сечения, закрепленной одним торцом, вычисляются по формуле [4]:

$$\omega_k = \lambda_k^2 \cdot \sqrt{\frac{EI_{x,y}}{\rho F_x L^4}}, \quad k = 1, 2, 3, \ldots \qquad (3)$$

где $\lambda_1 = 1{,}875, \quad \lambda_2 = 4{,}694, \quad \lambda_k = \dfrac{2k-1}{2} \cdot \pi;$

E – модуль упругости;

$I_{x,y}$ – момент инерции поперечного сечения I_x или I_y;

ρ – плотность материала балки;

F_x – площадь поперечного сечения балки.

На рис. 5 представлены графики зависимости второй собственной частоты от характерного размера ячейки для различных типов КЭ, $\omega_{\text{аналит.2}} = 81{,}79$.

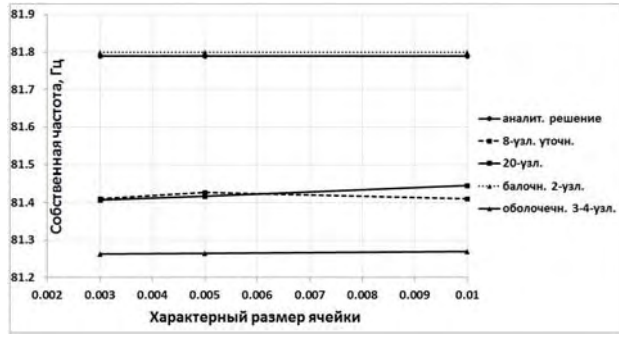


Рис. 5. Графики зависимости 2-ой собственной частоты от характерного размера ячейки для различных типов КЭ

Наилучшую точность показали балочные конечные элементы, практически 100 % совпадение с аналитическим решением. Наибольшая погрешность при расчетах с этими элементами составила 0,01 %.

Наибольшая погрешность по отношению к аналитическому решению получена при проведении расчетов с использованием оболочечных КЭ на сетке с размером 300×4×4 ячеек. Она составила 0,65 %, что удовлетворяет требованиям при проведении расчетов. Таким образом, получено хорошее качественное и количественное согласование по собственным частотам колебаний с аналитическим решением.

Задача 3. Расчет основных собственных частот колебаний консольно-закрепленной балки постоянного поперечного сечения при действии осевой сжимающей силы

Геометрия задачи представлена на рис. 6.

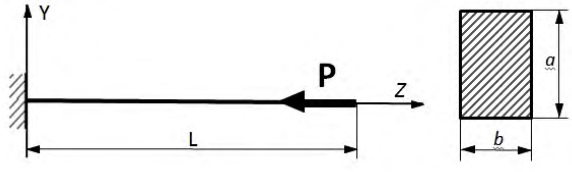


Рис. 6. Геометрия задачи

Балка длиной $L = 0{,}508\,[\text{м}]$, с высотой поперечного сечения $a = 0{,}0508\,[\text{м}]$ и шириной поперечного сечения $b = 0{,}0254\,[\text{м}]$ закреплена одним торцом. Расчет проводился с использованием модели упругого изотропного материала.

При расчете использовались различные типы конечных элементов:

- 8-узловые шестигранные объемные КЭ;
- 20-узловые шестигранные объемные КЭ;
- оболочечные КЭ;
- балочные КЭ.

Также, использовались три вида последовательно сгущающихся КЭС:

- 40×4×2 ячеек;

• 80×8×4 ячеек;
• 160×16×4 ячеек.

В задаче вычислялось три собственных частоты колебаний балки.

Рассмотрим аналитическое решение данной задачи.

Собственные частоты колебаний консольно-закрепленной балки постоянного поперечного сечения при действии осевой сжимающей силы вычисляются по формуле [5, 6]:

$$f_i = f_i^0 \sqrt{1 - \frac{5PL^2}{14EI_{X,Y}}} \qquad (4)$$

где f_0 – i-ая собственная частота колебаний без учета нагружения;

P – осевая сжимающая сила; E – модуль упругости;

$I_{X,Y}$ – момент инерции поперечного сечения I_X или I_Y.

На рис. 7 представлены графики зависимости третьей собственной частоты от характерного размера ячейки для различных типов КЭ, $\omega_{аналит.3} = 474{,}26$.

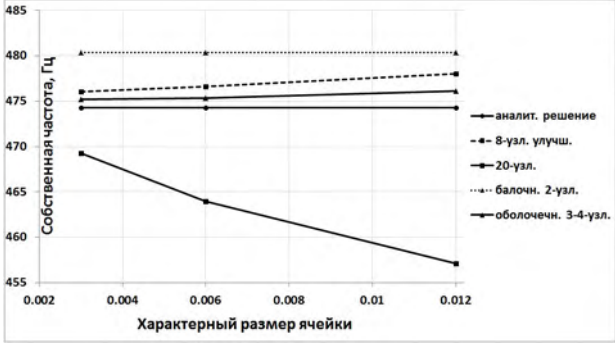


Рис. 7. Графики зависимости 3-ей собственной частоты от характерного размера ячейки для различных типов КЭ

Хорошую точность показали оболочечные КЭ и 8-узловые шестигранные объемные КЭ. Наибольшая погрешность по отношению к аналитическому решению при расчетах с этими элементами составила соответственно 0,39 % и 0,8 %.

Наибольшая погрешность по отношению к аналитическому решению получена при проведении расчетов с использованием 20-узловых шестигранных объемных КЭ на сетке с размером 40×4×2 ячеек. Она составила 3,62 %, что удовлетворяет требованиям при проведении расчетов. Таким образом, получено хорошее качественное и количественное согласование по собственным частотам колебаний с аналитическим решением.

Задача 4. Расчет основных собственных частот колебаний прямоугольной пластины, жестко закрепленной на вращающемся цилиндре, для различных скоростей вращения

Геометрия задачи представлена на рис. 8.

Прямоугольная пластина длиной $L = 0{,}508$ [м], с высотой поперечного сечения $a = 0{,}0508$ [мм] и шириной поперечного сечения закреплена одним торцом на абсолютно жестком цилиндре радиусом $R = 0{,}15$ [м]. Цилиндр вращается вокруг своей оси. Расчет проводился при следующих значениях скорости вращения системы: 0 рад/с; 157 рад/с; 314 рад/с; 471 рад/с. При расчете использовалась модель упругого изотропного материала.

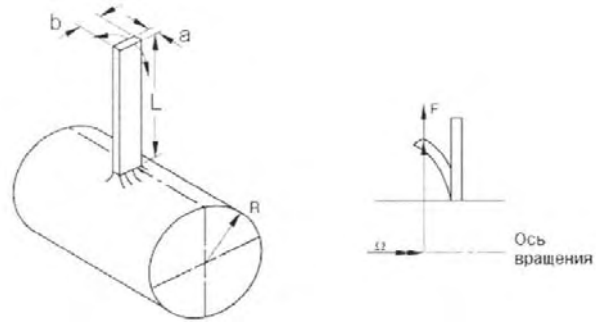


Рис. 8. Геометрия задачи

При расчете использовались различные типы конечных элементов:

• 8-узловые шестигранные объемные КЭ;
• 20-узловые шестигранные объемные КЭ;
• оболочечные КЭ;
• балочные КЭ.

Также, использовались три вида последовательно сгущающихся КЭС:

• 109×9×1 ячеек;
• 218×18×2 ячеек;
• 328×28×3 ячеек.

Аналитическое решение данной задачи представлено в [7].

На рис. 9 представлены графики зависимости первой собственной частоты от характерного размера ячейки для различных типов КЭ при нулевой скорости вращения системы, $\omega_{аналит.1} = 23{,}68$.

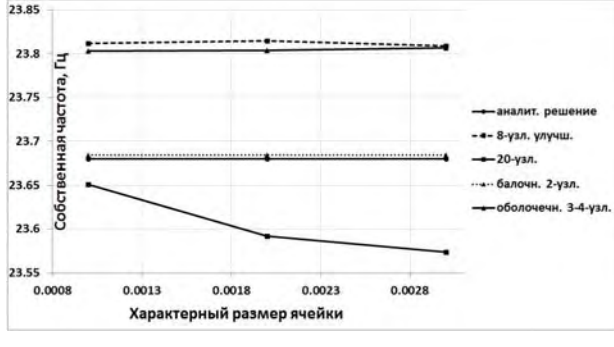


Рис. 9. Графики зависимости 1-ой собственной частоты от характерного размера ячейки для различных типов КЭ

Наилучшую точность показали балочные конечные элементы, практически 100 % совпадение с аналитическим решением. Наибольшая погрешность при расчетах с этими элементами составила 0,02 % по отношению к аналитическому решению.

Наибольшая погрешность по отношению к аналитическому решению получена при проведении расчетов с использованием 8-узловых шестигранных объемных КЭ на сетке с размером 218×18×2 ячеек. Она составила 0,57 %, что удовлетворяет требованиям при проведении расчетов. Таким образом, получено хорошее качественное и количественное согласование по собственным частотам колебаний с аналитическим решением.

Заключение

Проведена работа по верификации текущего состояния модуля решения задач модального анализа ПП ЛОГОС-Прочность на наборе задач, имеющих или точное аналитическое решение, или данные экспериментального исследования. Для расчетов использовались конечно-элементные сетки различной размерности с различными типами конечных элементов.

Сравнение результатов, полученных при расчетах в ПП ЛОГОС-Прочность показало, что отклонение от аналитического решения и от экспериментальных данных не превысило 5 %, что удовлетворяет требованиям расчетчиков.

Таким образом, можно сделать вывод о возможности применимости ПП ЛОГОС-Прочность к решению задач модального анализа.

Литература

1. Циберев К. В., Авдеев П. А., Александрова О. Л., Артемова Е. О. и др. Обзор возможностей моделирования задач прочности с использованием пакета программ ЛОГОС / XV международный семинар «Супервычисления и математическое моделирование» // Материалы семинара. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2014.

2. Александрова О. Л., Барабанов Р. А., Дьянов Д. Ю., Косарим С. С., Наумов А. О., Спиридонов В. Ф., Филимонкин Е. А., Циберев К. В. Пакет программ ЛОГОС. Конечно-элементная методика расчета задач статической прочности конструкций с учетом эффектов физической и геометрической нелинейности // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов. 2014. Т. 3. С. 3–17.

3. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник. Под ред. Биргера И. А. и Пановко Я. Г. М.: Машиностроение, 1968. Т. 3.

4. Феодосьев В. И. Сопротивление материалов. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999.

5. Воробьев Ю. С., Шепель А. И., Романенко Л. Г., Водченко В. Н., Сапелькина В. Конечно-элементный анализ собственных колебаний статически напряженных лопаток турбомашин // Проблемы прочности. 1990. № 7. С. 88–94.

6. Timoshenko S. Vibration Problems in Engineering // D. Van Nostrand Company. Inc. New York, 2nd. 1937.

7. Lindberg B. Berechnung der ersten Eigenfrequen zeines Balkens in Fliehkraftfeld mit Rayleigh Quotient // Internal report HTGE-ST-0051, Brown Boveri&Cie. Baden, Switzerland, 1986.

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВСЕХ СТАДИЙ ЦУНАМИ ОПОЛЗНЕВОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ В РАМКАХ ЕДИНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Е. С. Тятюшкина, А. С. Козелков, В. В. Курулин, О. Л. Крутякова, Д. А. Уткин, К. С. Плыгунова, Н. В. Чухманов, Д. Н. Смолкина, В. Ю. Герасимов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Цунами является одной из самых разрушительных природных стихий. Для прогнозирования цунами необходимы надежные методы его численного моделирования. Существующие подходы к численному моделированию цунами подразумевают использование разных математических моделей на стадиях генерации, распространения в океане и наката волн на сушу. Однако современный уровень развития вычислительных технологий позволяет перевести моделирование цунами на новый уровень

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-05-80019.

Математическая модель моделирования распространения волн цунами оползневого происхождения

Наиболее полной математической моделью, позволяющей учитывать все стадии и особенности жизненного цикла цунами оползневого происхождения, начиная с его формирования из источника и заканчивая накатом на береговые структуры, является модель, состоящая из системы уравнений Навье-Стокса и уравнений переноса объемной доли, согласно методике Volume of Fluid (VOF) [1]. Это позволяет единым образом моделировать движение и взаимное влияние оползневой, водной и воздушной сред с учетом вязкого, турбулентного и радиационного трения (учет взаимного влияния оползень – водная среда).

Метод VOF основан на решении уравнений Навье-Стокса совместно с уравнениями переноса объемной доли дисперсных фаз. Рассмотрим задачу о движении среды, состоящей из произвольного числа веществ с различными фазовыми состояниями. Примем во внимание упрощающие допущения о том, что все вещества описываются одним полем скорости и давления, фазовые переходы отсутствуют, рассматриваемые вещества являются несжимаемыми, отсутствуют стоки и источники, а также о том, что процессами теплообмена можно пренебречь. В связи с этим система основных уравнений в декартовых координатах примет вид:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \\ \dfrac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \dfrac{\partial}{\partial x_j}\left(u_i u_j\right) = -\dfrac{\partial p}{\partial x_i} + \dfrac{\partial}{\partial x_j}\tau_{ij} + \rho g_i, \\ \dfrac{\partial \alpha_w}{\partial t} + \dfrac{\partial}{\partial x_i}\left(u_i \alpha_w\right) = 0, \\ \dfrac{\partial \alpha_l}{\partial t} + \dfrac{\partial}{\partial x_i}\left(u_i \alpha_l\right) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где i, j – нижние индексы, указывающие на принадлежность векторных компонент к декартовым координатам, $i, j = \{x, y, z\}$; ρ – плотность смеси, вычисляемая как $\rho = \left(\rho_w \alpha_w + \rho_l \alpha_l + \rho_a \alpha_a\right)$; w – (water) нижний индекс, указывающий на принадлежность к фазе «вода»; l – (landslide) нижний индекс, указывающий на принадлежность к фазе «оползень»; a – (air) нижний индекс, указывающий на принадлежность к фазе «воздух»; α_ξ – объемная доля фазы, $\xi = \{w, l, a\}$; u_i – компонента вектора скорости, $i = \{x, y, z\}$; t – время; p – давление; x_i – компонента вектора декартовых координат, $i = \{x, y, z\}$; τ_{ij} – тензор вязких напряжений, который, согласно гипотезе Буссинеска, принимает вид:

$$\tau_{ij} = \mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{2}{3}\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\delta_{ij}\right),$$

где μ – динамическая вязкость; δ_{ij} – дельта Кронекера; g_i – компонента вектора ускорения свободного падения.

Первые два уравнения системы (2.1) представляют собой уравнения сохранения массы и импульса. Третье и четвертое уравнения – уравнение переноса объемной доли жидкой фазы и объемной доли оползневой фазы соответственно. Для фазы «воздух» уравнение переноса объемной доли решать не требуется, поскольку, согласно принципам метода *VOF*, объемная доля α_a вычисляется из соотношения $\left(\alpha_w + \alpha_l + \alpha_a\right) = 1$.

Данная система уравнений позволяет моделировать следующие стадии оползневых цунами: движение оползня с учетом реологии, турбулентного и радиационного трения, возникновение волн цунами, распространение волн цунами, и последующий их наката на берег. Учет рельефа дна акваторий производится путем применения соответствующих граничных условий, что означает необходимость построение расчетной сетки, соответствующей рельефу дна акватории.

Дискретизация уравнений системы (1) производится согласно методу конечных объемов с учетом неструктурированности расчетной сетки. Метод конечных объемов подразумевает переход от дифференциалов к алгебраическим выражениям относительно ячеек расчетной сетки

Алгоритм учета неоднородной гравитационной силы в численном алгоритме

Определяющей характеристикой для задач возникновения и распространения волн цунами является сила гравитации. Сила гравитации в области свободной поверхности терпит резкие изменения вследствие существенного изменения плотности среды, что приводит к разрыву градиента давления, который в случае покоя среды полностью уравновешивает действие гравитационных сил. Построение численного алгоритма, обеспечивающего корректный учет силы гравитации и расчет значений градиента давления, является нетривиальной задачей.

Численный алгоритм реализации неотражающих граничных условий для задач со свободной поверхностью

Задача моделирования распространения волн цунами ставится как в ограниченных акваториях, так и в неограниченных незамкнутых акваториях. Для ограниченных акваторий ставится граничное условие непроникания потока, что не представляет особых трудностей. Другое дело постановка граничных условий для незамкнутых акваторий. Волны при достижении границы расчетной области должны свободно без отражения ее покидать. Постановка таких условий как, например, условие «твердая стенка приведет к тому, что при численном моделировании волны, дошедшие до искусственных границ, отражаются и искажают решение внутри области. Поэтому необходимо разработать и реализовать эффективный алгоритм неотражающих граничных условий [2], чтобы волны покидали расчетную область свободно, без образования нефизичных отраженных волн.

Верификация

Для верификации методов для расчета волн цунами существует международный базис задач NTHMP [3]. Базис содержит такие задачи, как распространение и накат одиночной волны в бассейне постоянной глубины, распространение и накат одиночной волны в бассейне с изменяющейся глубиной, моделирование схода клиновидного тела, обтекание острова. Данные базиса позволяют оценить правильность описания физико-математической моделью, процесса распространения волны и ее наката на берег. В базисе представлены данные записи мареографов, которые позволяют провести количественную оценку погрешности результатов математического моделирования в сравнении с экспериментом. Этот базис решено было дополнить международно-признанными задачами, такими, как возникновения волн в результате падения тела в воду [4], возникновения волн в результате сход надводного оползня с натеканием волн на «фьорды» [5].

Моделирование распространения и наката одиночной волны в бассейне постоянной глубины

В задаче моделируется распространение одиночной волны высотой H в бассейне с постоянной глубиной d = 1 м. Затем волна набегает на наклонную плоскость, угол наклона которой β = 2,88°. Схематично конфигурация бассейна представлена на рис. 1.

Рассматривалось несколько вариантов постановок задачи, отличающихся друг от друга отношением H/d. В первом случае отношение $H/d = 0{,}0185$, во втором случае $H/d = 0{,}3$.

Проводилось сравнение профилей волны, полученных при расчете в пакете программ ЛОГОС, с аналитическими данными.

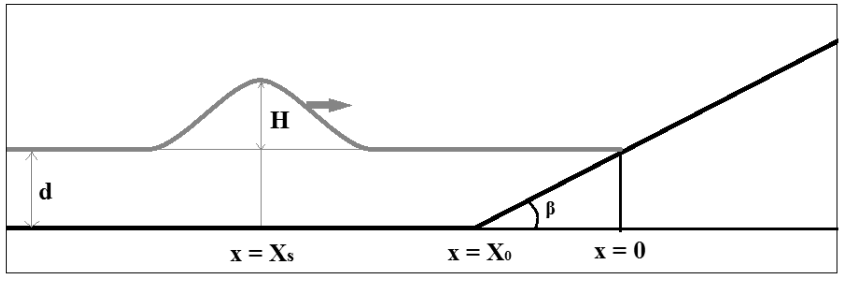


Рис. 1. Конфигурация бассейна

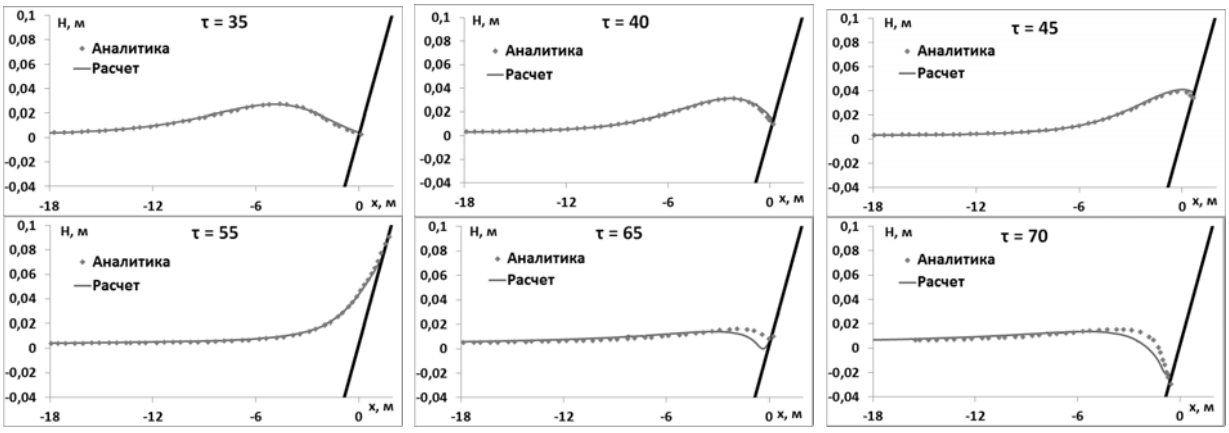


Рис. 2. Сравнение профилей волны для случая H/d = 0,0185

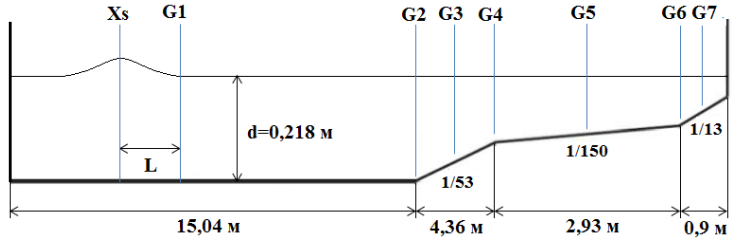


Рис. 3. Конфигурация бассейна

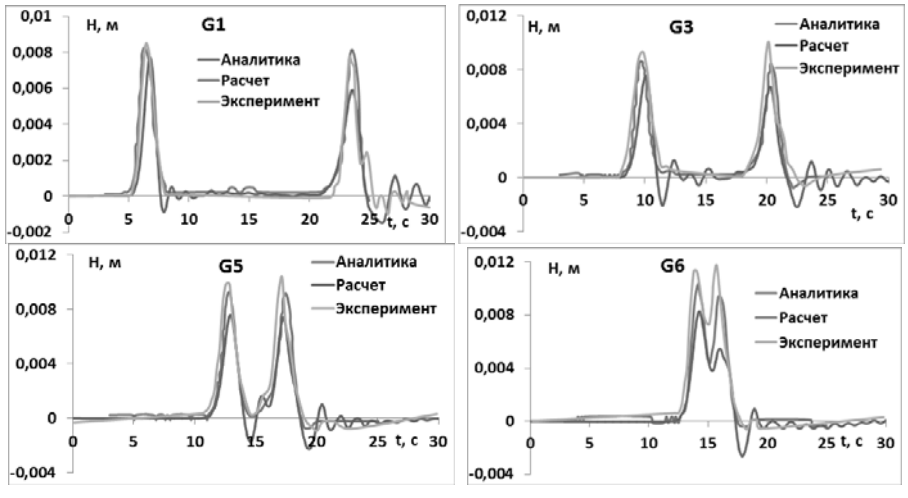


Рис. 4. Сравнение профилей волны, полученных расчетным путем в пакете программ ЛОГОС, с аналитическими и экспериментальными данными мареографов

На рис. 2 приведены сравнения результатов для первого случая $H/d = 0{,}185$ на различные моменты времени $t = \tau\sqrt{d/g}$.

Из рис. 2 видно, что имеется хорошее согласие полученных расчетных результатов с аналитическими данными. Результаты, полученные в пакете программ ЛОГОС, хорошо описывают как распространения волны, так и ее набегание на наклонную плоскость.

Моделирование распространения и наката одиночной волны в бассейне изменяющейся глубины

В задаче моделируется распространение одиночной волны высотой H в бассейне с изменяющейся глубиной d. Конфигурация и размеры бассейна представлены на рис. 3.

Соотношение H/d = 0,038; L = 2,4 м, расстояние между мареографами $G1$ и $G2$ равно 2,4 м.

Получаемые в результате моделирования количественные характеристики волновой картины в бассейне можно оценить по данным мареографов. На рис. 4 представлено сравнение профилей

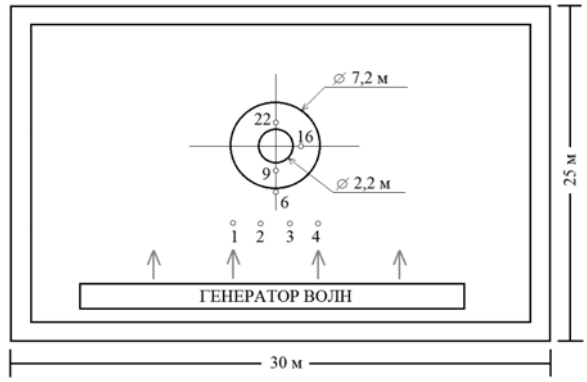


Рис. 5. Геометрия задачи и расположение датчиков

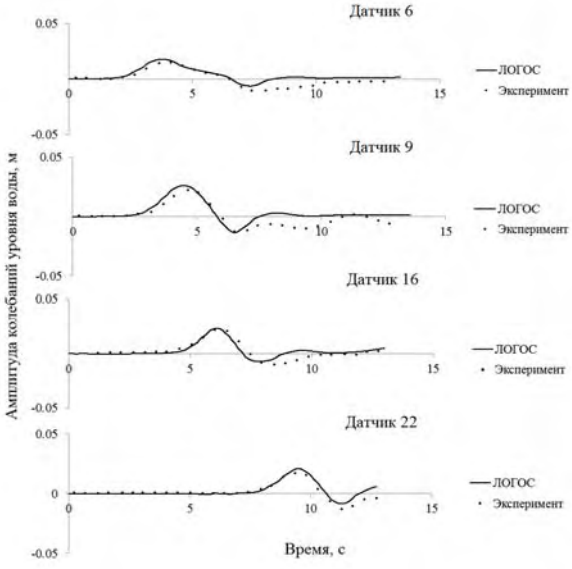


Рис. 6. Амплитуда колебаний уровня воды в бассейне для $H = 0{,}016$ м

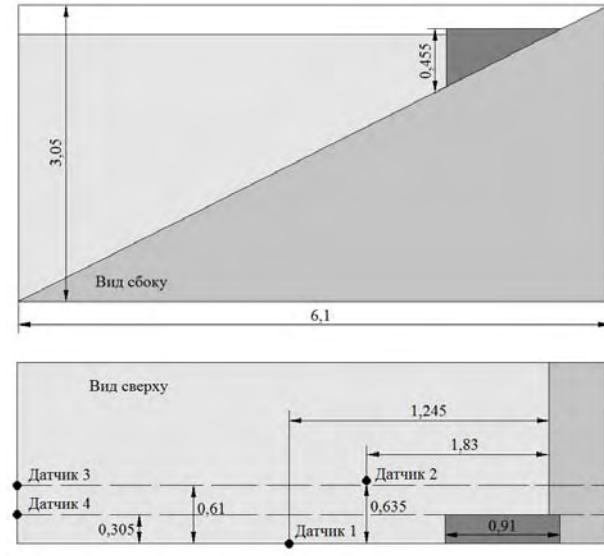


Рис. 7. Геометрия задачи и расположение датчиков

волны, полученных расчетным путем в пакете программ ЛОГОС, с аналитическими и экспериментальными данными мареографов.

Обтекание одиночной волной острова конической формы

В данном эксперименте в прямоугольном бассейне: длиной 25 м и шириной 30 м, заполненном водой на 0,32 м, с помощью спектрального генератора волн создается одиночная волна, которая обтекает остров: высотой 0,625 м, с диаметром основания 7,2 м и диаметром вершины 2,1 м.

Стенки бассейна облицованы абсорбирующим веществом, чтобы минимизировать отражение волн. Колебания водной поверхности фиксируются с помощью датчиков. Геометрия задачи и расположение опорных датчиков показаны на рис. 5.

Рассматривалось несколько вариантов постановок задачи, отличающихся друг от друга высотой волн H. Для первого случая $H = 0{,}016$ м, для второго – $H = 0{,}032$ м, для третьего – $H = 0{,}064$ м.

На рис. 6 приведены зависимости амплитуды колебаний уровня воды в бассейне от времени для первой постановки задачи: $H = 0{,}016$ м.

Сравнение записей датчиков показывает достаточно хорошее совпадение для первой приходящей волны, наблюдается различие для дальнейших колебаний поверхности. Это может быть связано с качеством расчетной сетки.

Генерация волн в результате движения клиновидного тела

В данной задаче проводится численное моделирование скольжения клиновидного тела под действием сил тяжести по наклонной плоскости в бассейне с водой, в результате которого образуются волны.

Геометрия задачи и расположение датчиков показаны на рис. 7. Все размеры указаны в метрах.

На рис. 8 приведены зависимости амплитуды колебаний уровня воды в бассейне от времени для датчиков 2 и 4.

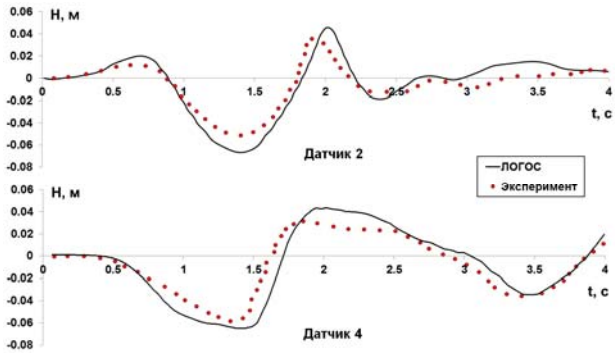


Рис. 8. Амплитуда колебаний уровня воды в бассейне

По графикам на рис. 8 наблюдается хорошее качественное и количественное согласие с экспериментальными данными.

Сход надводного оползня с натеканием волн на «фьорды»

В рамках данной задачи проводилось численное моделирование схода оползня в воду, в результате чего образуются волны, впоследствии натекающие на наклонные плоскости, имитирующие «фьорды».

Рассматривается бассейн, заполненный до определенного уровня водой, в котором расположены две наклонные плоскости, имитирующие «фьорды». На одной из них расположен оползень, который сходит в воду, в результате чего образуются волны, впоследствии натекающие на «фьорды». Схематично конфигурация бассейна и расположение мареографа изображены на рис. 9, все размеры указаны в метрах.

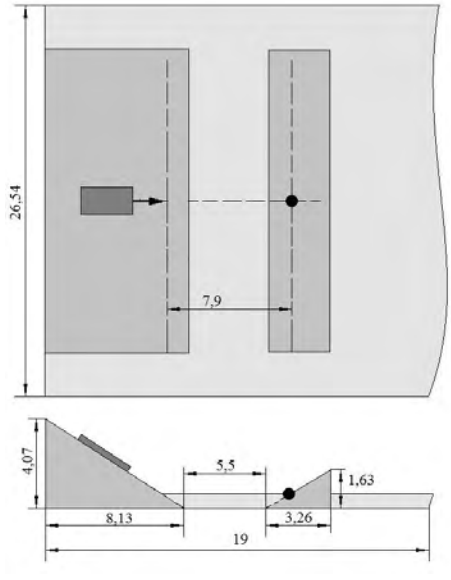


Рис. 9. Конфигурация бассейна и расположение мареографа

Размеры оползня составляют 2,1×1,2×0,3 м, причем задний его край находится на расстоянии 2,8 м от верхнего края наклонной плоскости. Оползень начинает движение с заданной начальной скоростью 3,8 м/с. Высота уровня воды от дна бассейна 0,6 м..

Во время эксперимента измеряется скорость входа оползня в воду, мареограф измеряет заплеск на «фьорд».

Получаемые в результате моделирования количественные характеристики волновой картины в бассейне можно оценить по данным мареографа. На рис. 10 представлена зависимость амплитуды колебаний водной поверхности от времени, зарегистрированная мареографом. Наблюдается хорошее совпадение амплитуд колебаний первых двух волн.

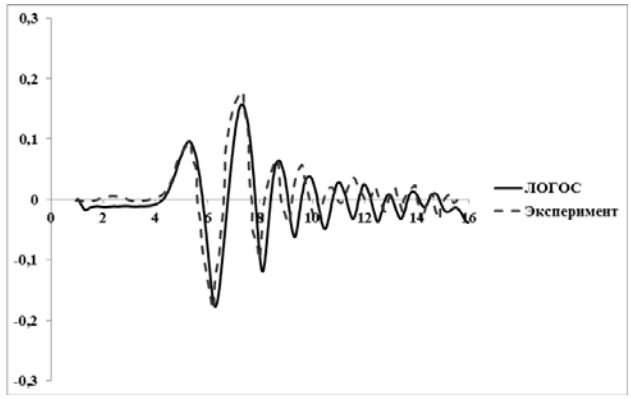


Рис. 10. Зависимость амплитуды колебаний водной поверхности от времени

Амплитуда первой приходящей волны в мареографе – 0,0945 м в эксперименте и 0,0961 м в расчете, отклонение составляет 1,8 %.

Задача о падении параллелепипеда в жидкость

В рамках данной задачи проводится численное моделирование падения прямоугольного параллелепипеда в воду.

В этом эксперименте с высоты H вдоль торцевой стенки бассейна в воду свободно падает прямоугольный параллелепипед высотой H_1 и длиной l. Прямоугольный бассейн с горизонтальным дном заполнен водой на высоту $h < H_1$. В натурном эксперименте длина бассейна составляла 4,3 м., ширина 0,2 м. В начальном состоянии вода находится в состоянии покоя. Расчетная модель представлена на рис. 11.

Рассматривалось несколько вариантов постановок задачи, отличающихся друг от друга размерами тела, высотой, с которой оно падает, и глубиной заполнения бассейна. В безразмерной форме эти параметры выглядят следующим образом [Букреев, 1996]:

$$H\mathrm{PP}^0\mathrm{P} = H/h,\ H_1^0 = H\mathrm{RR}_1\mathrm{RR}/h,\ l\mathrm{PP}^0\mathrm{PP} = l/h,$$
$$\rho\mathrm{PP}^0\mathrm{PP} = (\rho\mathrm{RR}_1\mathrm{RR} - \rho)/\rho,\ x\mathrm{PP}^0\mathrm{PP} = x/h,$$

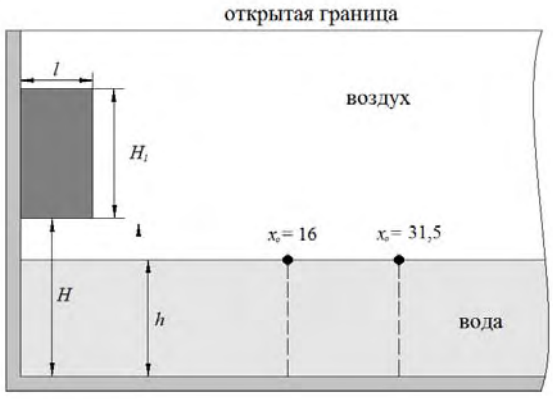


Рис. 11. Схема экспериментальной установки

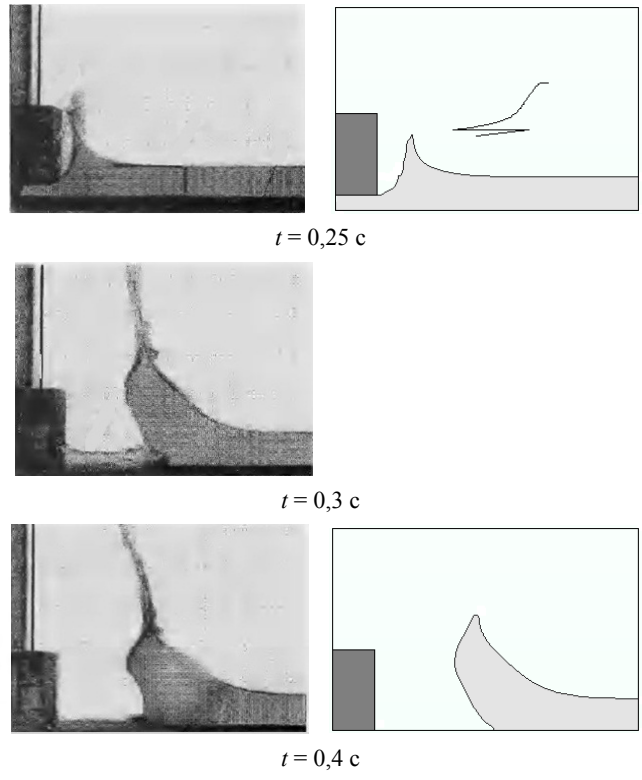


Рис. 12. Образование волн от падения параллелепипеда для первой постановки задачи – HРР^{0}Р = H/h: а – фотографии эксперимента; б – результаты численного моделирования ЛОГОС

где ρRR$_1$RR, ρ – плотность твердого тела и плотность жидкости соответственно. Значения h, HРР^{0}РР, H_1^0, lРР^{0}РР, ρРР^{0}РР, xРР^{0}РР меняются в зависимости от постановки.

На рис. 12 показано образование волн от падения параллелепипеда для первой постановки задачи – HРР^{0}Р = H/h .

На рис. 13 приведены зависимости амплитуды колебаний уровня воды в бассейне от времени для второй постановки задачи.

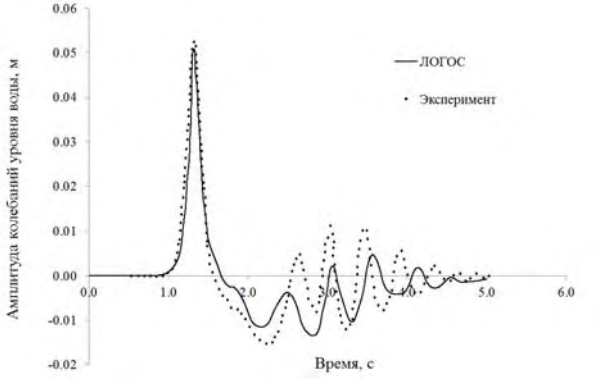


Рис. 13. Амплитуда колебаний уровня воды в бассейне для второй постановки задачи

Генерация цунами подводными оползнями

В рамках данной задачи проводится численное моделирование схода подводного оползня на о. Сахалин [6].

На восточном склоне о. Сахалин обнаружен и закартирован подводный оползень (рис. 14).

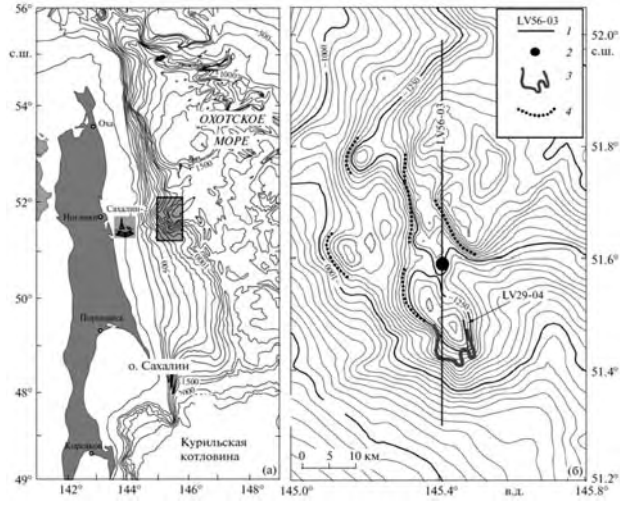


Рис. 14. Карта восточного склона о. Сахалин и район обнаруженного оползня

Подводные оползни могут генерировать значительные волны цунами в прибрежных зонах океана, а поскольку восточное побережье Сахалина является районом нефте- и газодобычи, цунами здесь может привести к экологической катастрофе. Площадь обнаруженного оползня составляет 42 км^2, его объем равен 4 км^3. Стенка отрыва оползня наклонена под углом 25–300. Сход подводного оползня сопровождается образованием волн на поверхности воды над областью дна, затронутого смещением осадочных слоев. Сход подобного оползня может вызвать значительное цунами.

Оползень моделировался как тяжелая вязкая жидкость, плотность которой равна $1800\,\text{кг}\cdot\text{м}^3$, а вязкость $\nu = \mu/\rho = 0{,}3\,\text{м}^2\text{с}^{-1}$.

На рис. 15 показано распределение максимального уровня водной поверхности.

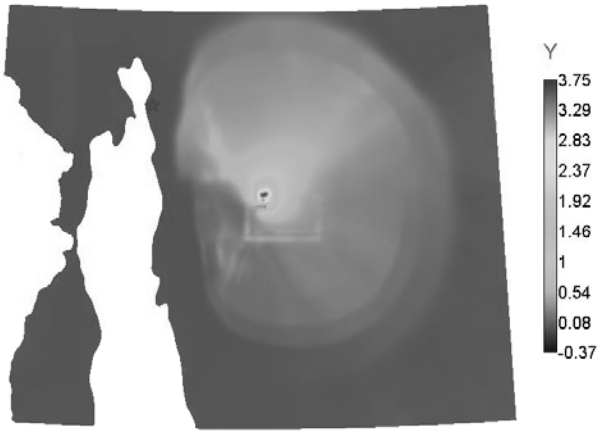


Рис. 15. Распределение максимального уровня водной поверхности

На рис. 15 звездочкой отмечен мареограф. На рис. 16 показана амплитуда волны, дошедшая до этой точки.

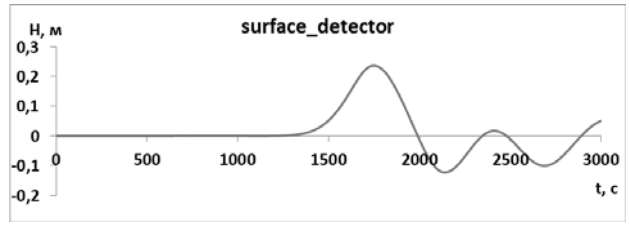


Рис. 16. Амплитуда волны в мареографе

Как видно из рис. 16, максимальная высота волны, зафиксированная в этой точке, составляет 25 см.

Литература

1. Hirt C. W., Nichols B. D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries // J. Comput. Phys. 1981. Vol. 39. P. 201–225.

2. Дородницын Л. В. Неотражающие граничные условия для систем уравнений газовой динамики // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2002. Т. 42, № 4. С. 522–549.

3. National Tsunami Hazard Mitigation Program: Proceedings and Results of the 2011 NTHMP Model Benchmarking Workshop. Boulder: U.S. Department of Commerce, 2012. P. 436.

4. Букреев В. И., Гусев А. В. Гравитационные волны при падении тела на мелкую воду // Прикладная механика и техническая физика. 1996. Т. 37, № 2. С. 90–98.

5. Mohammed F., Frits H. M., Experiments on tsunamis generated by 3D Granular Landslides // Submarine Mass Movements and Their Consequences, Advances in Natural and Technological Hazards Research. 2010. Vol. 28. P. 705–718.

6. Баранов Б. В. и др. Оползни на восточном склоне о. Сахалин как источники возможных цунами // Доклады Академии наук, 2013. Т. 449, № 3. С. 1–4.

НЕСТАЦИОНАРНАЯ ВОЛНОВАЯ МОДЕЛЬ ЛАЗЕРА-ГЕНЕРАТОРА С МНОГОУРОВНЕВОЙ КИНЕТИКОЙ НАСЕЛЕННОСТЕЙ

А. А. Хлебников, М. В. Волков

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Созданы физико-математическая и численная модели лазера-генератора для расчета как одномодового, так и многомодового режимов генерации лазерного излучения на основе решения трехмерного волнового параболического уравнения. Так как резонансные частоты поперечных мод генератора отличаются друг от друга, то для расчета многомодового режима генерации предложено в резонаторе задавать ряд независимых некогерентных полей. Кинетика населенностей лазерных уровней в работе рассматривается в трёхуровневом приближении.

Математическая постановка задачи

Для определения характера распределения лазерного поля внутри резонатора решается трехмерное неоднородное волновое уравнение в параксиальном приближении в декартовой системе координат. Геометрия задачи показана на рис. 1.

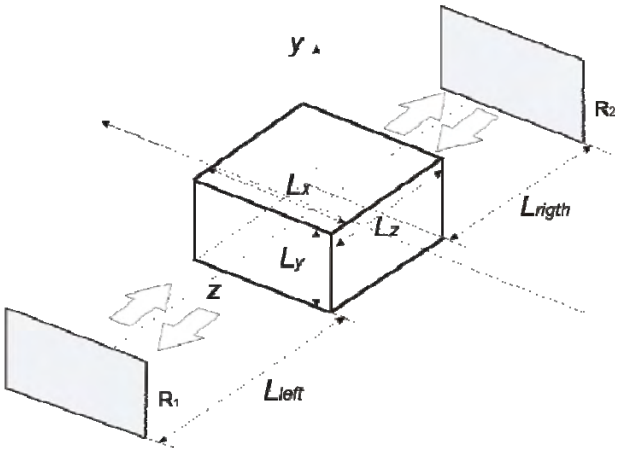


Рис. 1. Геометрия задачи

Лазерное излучение распространяется в направлении вдоль оси Z, активная область имеет прямоугольную форму размерами L_x L_y и L_z. Счетная область имеет размеры $H_x > L_x$, $H_y > L_y$, $H_z \geq L_z$ и разбивается на $N_x \times N_y \times N_z$ одинаковых элементарных ячеек Левое плечо резонатора имеет длину L_{left}, правое – L_{rigth}. Таким образом, счетная область имеет размеры H_x H_y и $H_z = L_{left} + L_z + L_{rigth}$ по осям X, Y и Z соответственно. На границах счетной области расположены зеркала резонатора (плоские или сферические) с коэффициентами отражения R_1 и R_2.

Рассмотрим волновое уравнение в параксиальном приближении[1] и запишем его в декартовых координатах:

$$2ik_0\left(\frac{1}{c}\frac{\partial E}{\partial t}+\frac{\partial E}{\partial z}\right)+\Delta E+k_0^2\left[i\frac{n_0}{k_0}\alpha+n^2-n_0^2\right]E=0\,, \quad (1)$$

где E – комплексная амплитуда поля, $\Delta=\frac{\partial^2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2}{\partial y^2}$ - оператор Лапласа по поперечным координатам, n_0 – исходный средний показатель преломления активной среды, $n(x,y,z)$ – показатель преломления среды, изменяющийся в процессе генерации, $\alpha(x,y,z)$ – коэффициент усиления, $k_0=2\pi/\lambda$ – волновое число, c – скорость света.

При помощи замены $t'=z-ct$ уравнение (1) сводится к следующему уравнению:

$$2ik_0\frac{\partial E}{\partial z}+\Delta E+k_0^2\left[i\frac{n_0}{k_0}\alpha+n^2-n_0^2\right]E=0\,, \quad (2)$$

Заменим $n^2(x,y,z)-n_0^2$ на $2n_0\left(n(x,y,z)-n_0\right)$, и введем $k=k_0n_0$, тогда получим:

$$2ik_0\frac{\partial E}{\partial z}+\Delta E+2k^2\frac{\delta n}{n_0}E+ik\alpha E=0\,, \quad (3)$$

где $\delta n=n(x,y,z)-n_0$.

Данное уравнение решается следующим образом: уравнение (3) расщепляется по физическим процессам и на каждом шаге по z последовательно решается 3 уравнения:

$$2ik_0\frac{\partial E(x,y,z)}{\partial z}+\Delta E(x,y,z)=0\,; \quad (4)$$

$$2ik_0\frac{\partial E(x,y,z)}{\partial z}+2k_0^2\frac{\delta n}{n_0}E(x,y,z)=0\,; \quad (5)$$

$$2ik_0\frac{\partial E(x,y,z)}{\partial z}+i\alpha k_0E(x,y,z)=0\,. \quad (6)$$

Схема интегрирования системы уравнений (4–6) следующая. Сначала решается уравнение (4) с шагом $dz/2$. Полученное решение используется в качестве начальных данных для решения уравнения (5) с шагом dz. После решается уравнение (6) с шагом dz. На последнем этапе вновь решается уравнение (4) с шагом $dz/2$. При численном решении уравнения (4) используется конечно-разностная схема интегрирования и расщепление по направлениям x и y. Амплитудная ошибка при вычислении поперечного дифференциального оператора в (4) нулевая, а фазовая погрешность может быть доведена до 4–6 порядка [2].

Поле лазерного излучения в резонаторе описывается системой параболических уравнений для комплексных амплитуд двух волн $E_1(x,y,z)$ и $E_2(x,y,z)$, которые имеют вид:

$$\begin{aligned} 2ik_0\frac{\partial E_1}{\partial z}+\Delta E_1+2k^2\frac{\delta n}{n_0}E_1+ik\alpha E_1=0 \\ -2ik_0\frac{\partial E_2}{\partial z}+\Delta E_2+2k^2\frac{\delta n}{n_0}E_2+ik\alpha E_2=0. \end{aligned} \quad (1)$$

Каждое из уравнений (1) решается по описанной выше схеме.

Отражение лазерного излучения от зеркал учитывается в виде граничных условий

$$E_1(x,y,0)=\sqrt{R_1}\cdot\exp\left(-\frac{ik\left(x^2+y^2\right)}{2F_1}\right)E_2(x,y,0)$$

$$E_2(x,y,L_z)=\sqrt{R_2}\cdot\exp\left(+\frac{ik\left(x^2+y^2\right)}{2F_2}\right)E_1(x,y,L_z), \quad (8)$$

где F_1 и F_2 – фокусные расстояния сферических зеркал.

Коэффициент усиления в активной среде определяется выражением:

$$\alpha=\sigma_{yc}\Delta n, \quad (2)$$

В свою очередь инверсия Δn определяется из решения уравнений кинетики:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_3}{\partial t}&=W_p-\frac{n_3}{\tau_{31}}-\gamma_{32}\cdot n_3+\gamma_{23}\cdot n_2-q_3n_3 \\ \frac{\partial n_2}{\partial t}&=-\alpha_{amp}\cdot I_{\text{sum}}-\frac{n_2}{\tau_{21}}+\gamma_{32}\cdot n_3-\gamma_{23}\cdot n_2-q_2n_2, \quad (3) \\ n_1&=n_0-n_2-n_3 \end{aligned}$$

где n_0 – суммарная концентрация атомов, n_3 – концентрация атомов в состоянии $5^2P_{3/2}$, W_P – скорость накачки с первого уровня на третий под действием излучения накачки, γ_{32},γ_{23} – скорости переходов между уровнями 2 и 3, τ_{21},τ_{31} – времена радиационного распада второго и третьего уровней на первый, q_2,q_3 – скорости безызлучательной релаксации с уровней 2 и 3, I_{sum} – суммарная интенсивность, под действием которой происходит изменение населенностей.

Общая система уравнений включает в себя $N_x\times N_y$ пар уравнений (7), которые решаются на сетке по Z. Уравнения для населенностей уровней (3) решаются для всех $N_x\times N_y\times N_z$ пространственных ячеек. Решение временной задачи ведется до установки выходной мощности на стационарные значения. Расчеты ведутся в каждой счетной ячейке, шаг по времени $\Delta\tau$ включает 4 этапа.

1. Расчет скорости накачки W_p. Используются значения населенностей уровней с предыдущего шага по времени.

2. Рассчитывается изменение населенностей уровней под действием накачки без учета лазерного излучения. При расчете применяется неявная разностная схема, в которой производная по времени в уравнениях (3) заменяется делением на малый временной шаг $\Delta\tau$.

3. Рассчитывается изменение населенностей уровней под действием лазерного излучения без учета члена, соответствующего накачке. При расчете суммарной интенсивности, под действием которой происходит изменение населенностей, используется выражение из работы [4]: $I_{sum,k}=\sqrt{\hat{I}_{1,k}\cdot\hat{I}_{1,k+1}}+$ $+\sqrt{\hat{I}_{2,k}\cdot\hat{I}_{2,k+1}}$. Здесь индексы 1 и 2 соответствуют двум встречным волнам, индексы k и $k+1$ – соседним узлам, а шляпка означает, что значение интенсивности берется с предыдущего момента времени.

4. Рассчитываются новые значения коэффициентов усиления и соответственно выходной мощности лазерного излучения.

Описанный выше подход вполне годится для моделирования одномодового режима генерации (имеется в виду одна поперечная мода). В случае многомодового режима в резонаторе будут одновременно существовать множество типов колебаний поперечных и продольных мод. Согласно общей теории резонаторов [3] длины волн различных типов колебаний резонатора различаются. Причем это отличие таково, чтобы для каждого типа колебания фазовый сдвиг на один проход между зеркалами резонатора был кратен π. Следовательно, использование волнового уравнения в параболическом приближении для моделирования многомодового режима генерации в данной постановке не совсем корректно. Поэтому для моделирования многомодового режима генерации предлагается в резонаторе задавать ряд некогерентных полей $E_1,E_2,E_3,\ldots,E_N$, где N – число мод в резонаторе. Распространение каждого поля считать независимо от других с помощью уравнения (3). Суммарная интенсивность лазерного излу-

чения в этом случае будет определяться выражением $I_{\text{сум}} = \sum_{i=1}^{N} |E_i|^2$.

Результаты тестовых расчетов

По разработанной компьютерной программе была проведена серия расчетов для одномодового и многомодового режима генерации в устойчивом резонаторе.

Одномодовый режим генерации

Принципиальная схема устойчивого резонатора показана на рис. 2.

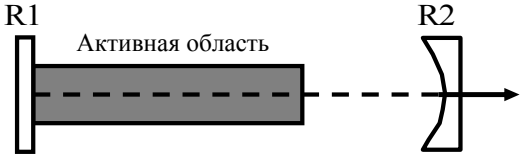


Рис. 2. Принципиальная схема устойчивого резонатора с активной средой

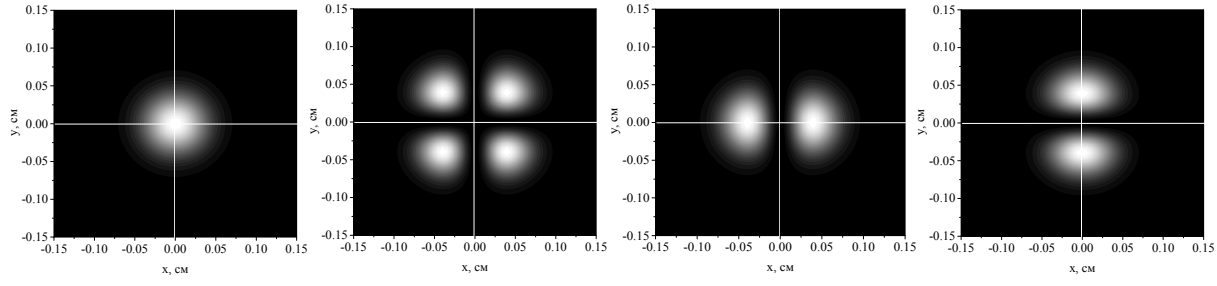
Длина резонатора $L_z = 10$ см. Глухое зеркало имеет радиус кривизны $R_1 = \infty$, выходное – $R_2 = 10^3$ см. Длина активной области 4 см. Левое плечо резонатора – 0 см, правое – 6 см. Радиус основной моды для такого резонатора ~0,05 см. Размер активной среды в поперечном сечении $w_x = w_y = 0,03$ см. Длина волны 1 мкм. Оценка числа Френеля по формуле $N_F = \omega_x^2 / (\lambda L_z) < 1$. Можно предположить, что при таком размере активной среды в резонаторе установится одномодовый (или близкий к одномодовому) режим генерации. Несмотря на это, для проверки модели в резонаторе задавалось четыре некогерентных поля (четыре моды) с начальным распределением интенсивности в виде мод TEM_{00}, TEM_{01}, TEM_{10} и TEM_{11}. Начальная мощность излучения всех мод равна 1 мВт. Начальное нормированное распределение интенсивности исходных мод показано на рис. 3.

Распределение мод TEM_{01}, TEM_{10}, TEM_{01} и TEM_{11} в итоге трансформировалось в основную моду, нормированное распределение которой показано на рис. 4а. На рис. 4б, показана пропись распределения суммарной лазерной интенсивности в дальней зоне.

Опираясь на представленные выше расчетные данные можно утверждать, что в резонаторе устанавливается одномодовый режим генерации с модой TEM_{00} независимо от начального распределения поля в резонаторе. Стоит отметить, что квадратное поперечное распределение коэффициента усиления отражается на выходном распределении интенсивности лазерного излучения. Расходимость лазерного излучения составляет ~3 мрад, что соответствует дифракционному пределу.

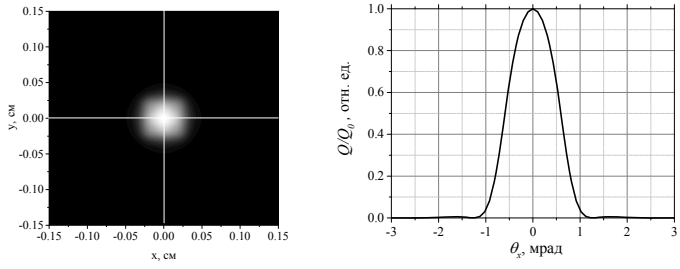
Многомодовый режим генерации

Ниже представлены результаты расчетов аналогичного резонатора при размере активной среды $w_x = w_y = 0,06$ см. Оценка числа Френеля:



TEM_{00} TEM_{11} TEM_{10} TEM_{01}

Рис. 3. Исходное нормированное распределение интенсивности для задаваемых в резонаторе мод



а б

Рис. 4. Распределение лазерной интенсивности: а –нормированное распределение в ближней зоне, б – пропись распределения суммарной лазерной интенсивности в дальней зоне при $y = 0$

$N_F = \omega_x^2 / (\lambda L_z) \approx 3{,}6$. Можно ожидать, что в резонаторе кроме основной моды должны существовать моды первого порядка. Поэтому для расчета такого резонатора задавалось четыре некогерентных поля E_1, E_2, E_3, E_4. Начальное распределение амплитуды поля задавалось в виде мод TEM_{00}, TEM_{01}, TEM_{10}, TEM_{11} соответственно, исходная мощность излучения каждой моды составляла 1 мВт. Исходные распределения интенсивности аналогичны, распределениям, представленным на рис. 3.

На рис. 5 показано распределение интенсивности многомодового лазерного излучения на выходе резонатора и распределение интенсивности в дальней зоне. На рис. 6 показана пропись распределения интенсивности многомодового лазерного излучения в дальней зоне при $y = 0$.

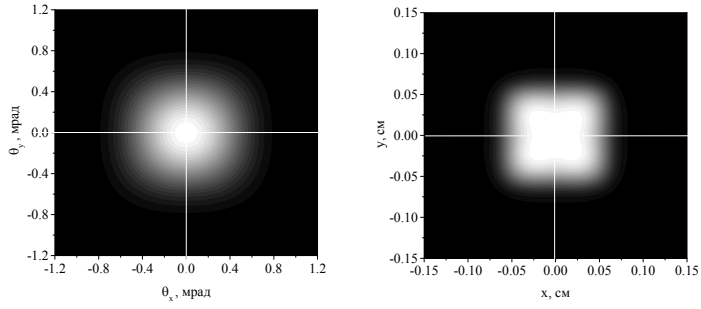
Из рис. 6 видно, что в распределении интенсивности в дальней зоне отсутствуют дифракционные минимумы, это связано с некогерентным сложением лазерного излучения различных мод. Расходимость многомодового лазерного излучения составляет ~2 мрад, что превышает дифракционную расходимость.

На рис. 7 представлены нормированные на единицу распределения интенсивности для различных мод в ближней зоне.

Из рис. 7 видно, что в резонаторе «выживают» все 4 начальные моды, хотя и в слегка деформированном виде. Энергетика мод из-за различных дифракционных потерь отличается друг от друга: преобладает мода TEM_{00}, далее по мощности следуют моды TEM_{01} и TEM_{10}, а затем мода TEM_{11}. В силу «квадратной» симметрии поперечного распределения коэффициента усиления мощность мод TEM_{01} и TEM_{10} совпадает.

В итоге из представленных расчетов можно заключить, что созданная физико-математическая модель одномодовой и многомодовой лазерной генерации согласуется с общей теорией резонаторов:

– при размере активной среды меньше размера основной моды в резонаторе формируется одномодовый режим генерации, моды высших порядков затухают,



а б

Рис. 5. Распределение интенсивности многомодового лазерного излучения: а – в ближней зоне, б – в дальней зоне

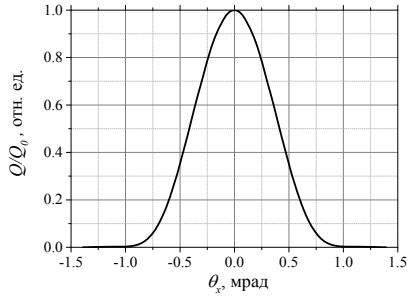
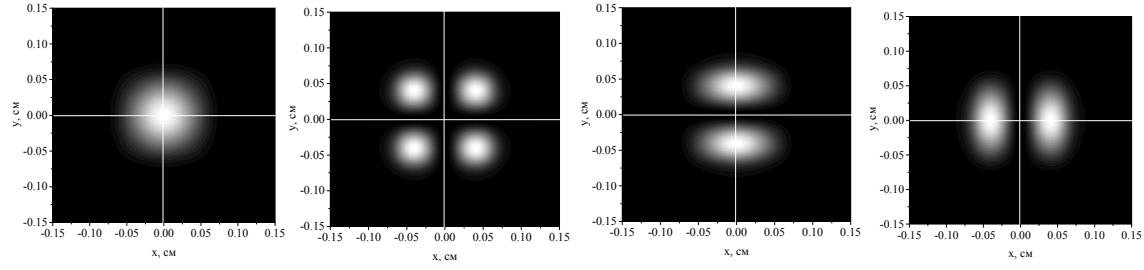


Рис. 6. Пропись распределения интенсивности многомодового лазерного излучения в дальней зоне при $y = 0$



TEM_{00} TEM_{11} TEM_{10} TEM_{01}

Рис. 7. Нормированное на единицу распределение интенсивности для различных мод на выходе резонатора

– при размере активной среды больше размера основной моды в резонаторе формируется многомодовый режим генерации,

– при увеличении количества мод, участвующих в генерации, доля мощности основной моды в суммарной мощности генерации падает.

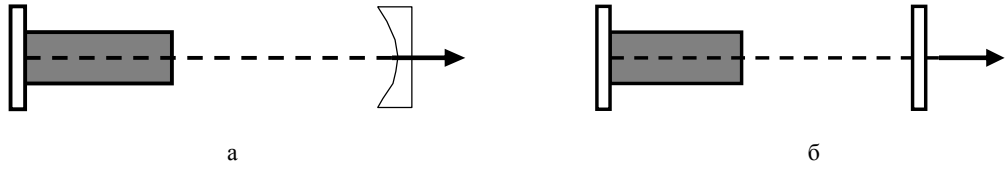
Компенсация тепловой линзы в резонаторе

В реальных физических экспериментах конструктивные особенности лазера приводят к возникновению оптических неоднородностей внутри резонатора, которые значительно влияют на качество пучка выходного излучения. Одна из самых значительных аберраций – дефокусировка. Наличие дефокусировки часто связано с возникновением тепловой линзы в активной среде, проявляющейся при нагреве зеркал резонатора под действием лазерного излучения. Разумно предположить, что дефокусировка приведет к трансформации плоскопараллельного резонатора в устойчивый. Это повлечет за собой рост числа мод в резонаторе, и, следовательно, рост расходимости лазерного излучения. При компенсации дефокусировки, например, путем постановки адаптивного зеркала в резонатор, расходимость лазерного излучения должна уменьшиться.

Продемонстрируем качественно этот эффект на примере рассмотрения двух резонаторов, принципиальная схема которых показана на рис. 8.

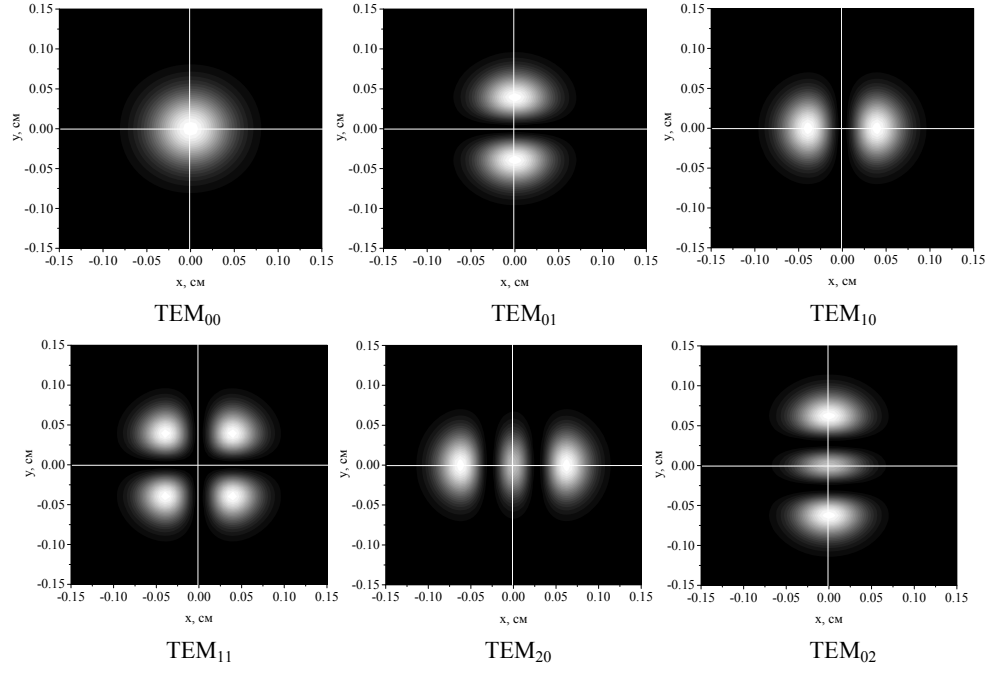
В данной постановке устойчивый резонатор соответствует ситуации с наличием тепловой линзы, а плоскопараллельный резонатор – ситуации, когда тепловая линза скомпенсирована, например, средствами адаптивной оптики. Длина резонаторов 10 см. Глухое зеркало – плоское, выходное зеркало имеет радиус кривизны $R_2 = 10$ см в первом случае и $R_2 = \infty$ во втором. Длина активной области 4 см. Левое плечо резонатора – 0 см, правое – 6 см. Размер активной среды в поперечном сечении $w_x = w_y = 0,085$ см, число Френеля $N_F = \omega_x^2 / (\lambda L_z) \approx 7$. В расчете в резонаторе в обоих случаях задавалось девять некогерентных полей, начальное распределение амплитуды поля соответствовало модам TEM_{ij}, где $i, j = 0, 1, 2$. На рис. 9 показано начальное распределение интенсивности лазерного излучения для различных мод, начальная мощность излучения всех мод равна 1 мВт.

Ниже на рис. 10–13 представлены результаты расчетов для устойчивого и плоскопараллельного резонаторов.



а б

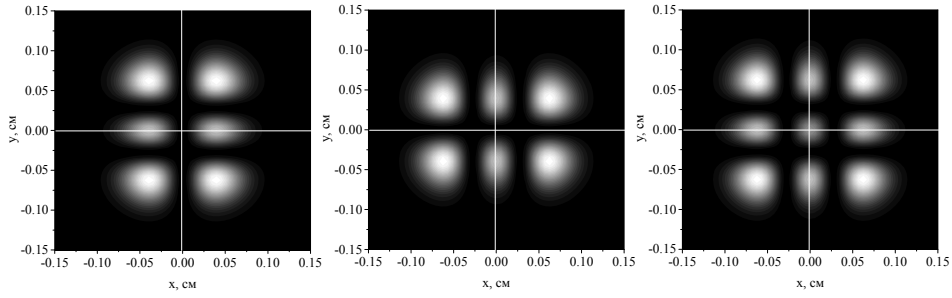
Рис. 8. Принципиальная схема резонатора с активной средой: а – устойчивого, б – плоскопараллельного



TEM_{00} TEM_{01} TEM_{10}

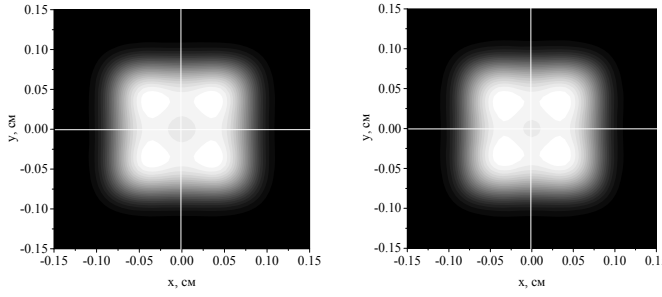
TEM_{11} TEM_{20} TEM_{02}

Рис. 9. Начальное распределение интенсивности излучения для различных мод (окончание на с. 156)



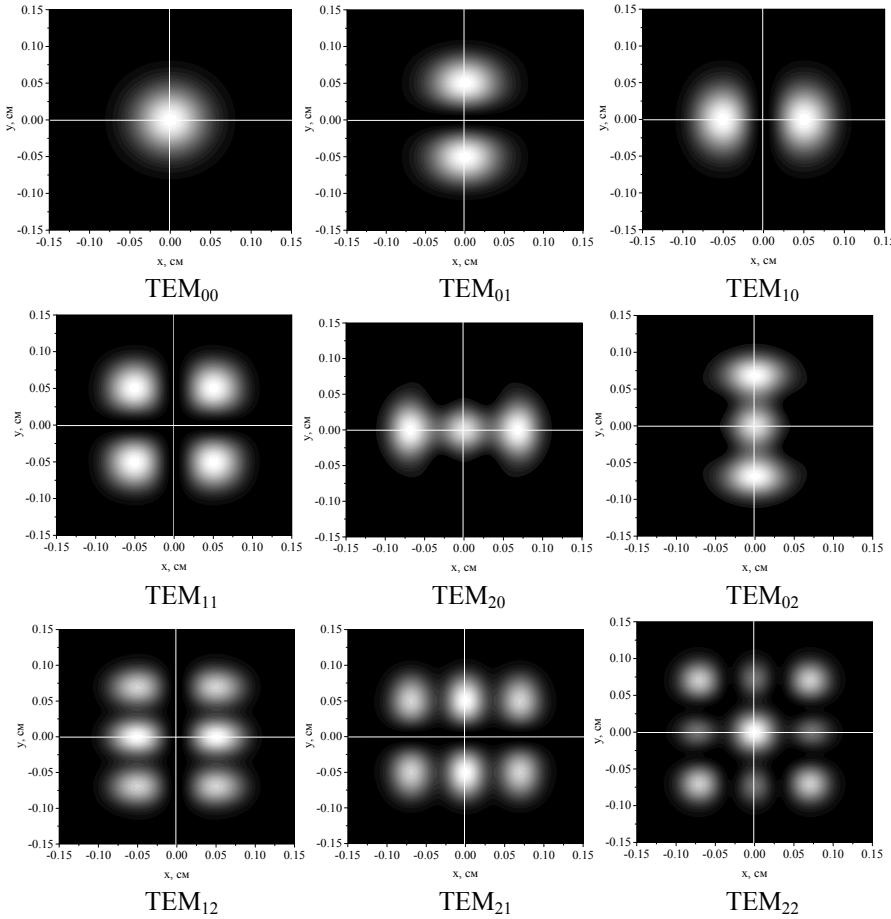
TEM_{12} TEM_{21} TEM_{22}

Рис. 9. (Окончание)



а б

Рис. 10. Распределения интенсивности многомодового лазерного излучения в ближней зоне резонатора: а – устойчивого, б – плоскопараллельного



TEM_{00} TEM_{01} TEM_{10}

TEM_{11} TEM_{20} TEM_{02}

TEM_{12} TEM_{21} TEM_{22}

Рис. 11. Распределения интенсивности лазерного излучения для различных мод в ближней зоне полученные после 10000 обходов через устойчивый резонатор

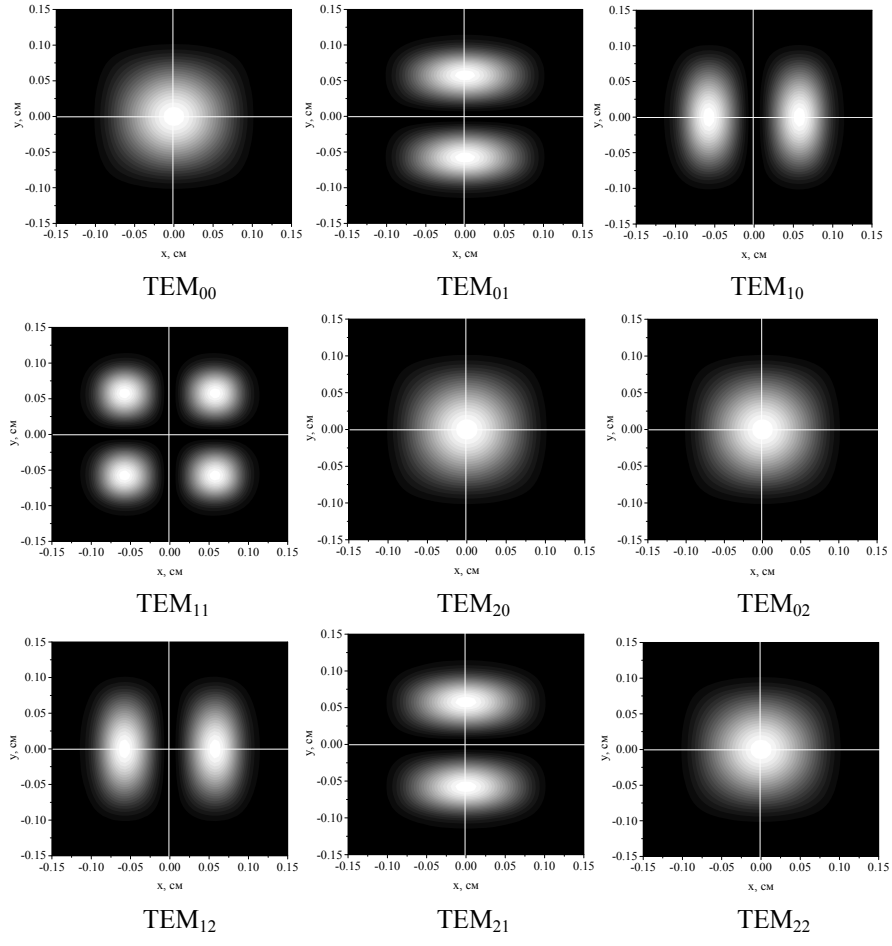


Рис. 12. Распределения интенсивности лазерного излучения для различных мод в ближней зоне полученные после 10000 обходов через плоскопараллельный резонатор

В случае плоскопараллельного резонатора моды второго порядка трансформировались в моды низших порядков: TEM_{12} в TEM_{10}, TEM_{21} в TEM_{01}, TEM_{22} в TEM_{00}, TEM_{20} и TEM_{02} в TEM_{00}. Это обусловлено более высокими дифракционными потерями в плоскопараллельном резонаторе по сравнению с устойчивым. Очевидно, что в случае плоскопараллельного резонатора мощность, например, моды TEM_{00} суммируется из всех мод, которые в нее трансформировались в результате многократного распространения через резонатор и взаимодействия с активной средой. Аналогично для всех остальных выживших мод.

Из представленных расчетных результатов можно сделать следующие выводы. Уменьшение мощности выходного лазерного излучения в плоскопараллельном резонаторе по сравнению с устойчивым не заметно. В устойчивом резонаторе «выжили» хотя и слегка деформировались все девять исходных мод, в плоско параллельном резонаторе дифракционные потери для мод высших порядков возросли, поэтому «выжили» только моды TEM_{00}, TEM_{01}, TEM_{10}, TEM_{11}. При этом произошла перекачка энергии из высших мод в основную моду. В связи с чем расходимость многомодового лазерного излучения в плоскопараллельном резонаторе уменьшилась по сравнению с устойчивым, что ясно видно из рис. 13.

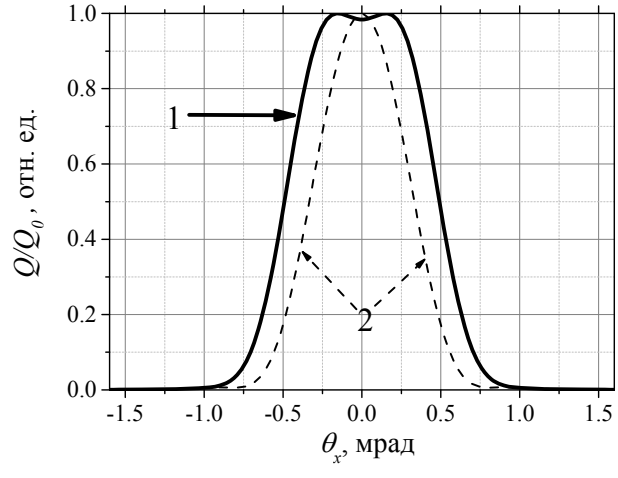


Рис. 13. Пропись распределения интенсивности многомодового лазерного излучения в дальней зоне при $y = 0$: 1 – для устойчивого резонатора; 2 – для плоскопараллельного

Стоит отметить характерное отличие расчетного распределения интенсивности мод от распределения

интенсивности мод Эрмит – Гаусса – отсутствие нулей интенсивности между максимумами (см. рис. 11).

В итоге на примере рассмотрения устойчивого и плоскопараллельного резонаторов показана возможность уменьшения расходимости многомодового лазерного излучения за счет компенсации тепловой линзы. В условиях реального физического эксперимента число мод в резонаторе много больше, поэтому, возможно, перекачка энергии из потухших мод произойдет не в только в одну основную моду, а во множество мод более низкого порядков.

Заключение

Представлена физико-математическая модель лазера-генератора для расчета как одномодового, так и многомодового режимов генерации лазерного излучения на основе решения трехмерного волнового параболического уравнения. Резонансные частоты мод отличаются друг от друга, поэтому для расчета многомодового режима генерации предложено в резонаторе задавать ряд независимых некогерентных полей. Кинетика населенностей лазерных уровней в работе рассматривается в трёхуровневом приближении. Получены следующие результаты.

1. Показано, что полученные с помощью модели результаты не противоречат общей теории резонаторов. При размере активной среды меньше размера основной моды в резонаторе формируется одномодовый режим генерации (независимо от исходного модового состава), в обратной ситуации – многомодовый.

2. Продемонстрирован в расчетах широко известный эффект уменьшения расходимости некогерентного многомодового лазерного излучения при компенсации тепловой линзы за счет затухания мод высших порядков и перекачки их энергии в моды низших порядков.

Литература

1. Ярив А., Юх П. Оптические волны в кристаллах. Пер. с англ. М.: Мир, 1987.

2. Ладагин В. К. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Методики и программы численного решения задач математической физики. 1985. № 1. С. 19.

3. Kogelnik H., Li T. Laser beams and resonators // Applied Optics. 1966. Vol. 5, N 10. P. 1550–1567.

4. Кондрашенко А. В. Об использовании кусочно-экспоненциальных функций в теории переноса// ЖВМ и МФ. 1983. Т. 23. Вып. 4. С. 965–972.

СЕКЦИЯ 2

Экспериментальная физика

Председатели секции:
д-р. физ.- мат. наук В. С. Гордеев
д-р. физ.- мат. наук Ю. Б. Кудасов
д-р. физ.- мат. наук Н. В. Житков

ДИНАМИКА ФОТОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ИНДУЦИРОВАННЫХ ФЕМТОСЕКУНДНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ В СМЕШАННЫХ МОЛЕКУЛЯРНЫХ КЛАСТЕРАХ

О. С. Аблясова, Д. Г. Пойдашев, В. О. Компанец, С. В. Чекалин, Е. А. Рябов

Институт спектроскопии РАН, Москва

Введение

Одним из наиболее быстро развивающихся направлений исследований в физике и химии в последнее время являются исследования с кластерными пучками. Молекулярными кластерами называются агрегаты, насчитывающие от нескольких единиц до нескольких миллионов молекул, которые удерживаются вместе различными типами связи с энергией этой связи в диапазоне от нескольких десятых электронвольта до нескольких электронвольт.

Кластерные пучки используют для приготовления тонких пленок и для получения новых материалов, особенно таких, в которых кластеры внедрены в однородную матрицу в виде нанометровых зерен, так что такой материал является одним из типов наноструктурных материалов. Кроме этого, кластерные пучки можно использовать для реализации методов лазерного разделения изотопов.

Кластеры многоатомных молекул, являющиеся предметом исследования в данной работе, представляют собой слабосвязанные объекты, энергия связи в которых лежит в диапазоне $\varepsilon_0 \approx 0{,}1$–$0{,}5$ эВ, что соответствует ван-дер-ваальсовой между молекулами в кластере. Характерный радиус R_n кластера сферической формы, состоящего из n молекул, можно оценить из соотношения

$$R_n = R_0 n^{1/3}, \qquad (1)$$

где R_0 – радиус одной молекулы (радиус Вигнера–Зейтца).

Можно выделить однородные (состоящие из одного сорта молекул или атомов) и смешанные кластеры (состоящие из нескольких сортов молекул или атомов). В данной работе будут рассматриваться процессы, протекающие именно в смешанных молекулярных кластерах, полученных при истекании различных смесей газов.

Рассматриваемые фотохимические процессы

Для наблюдения Xe^+ и $Fe(CO)_5^+$ использовалась смесь $Fe(CO)_5$:Xe = 1:300 с общим давлением при комнатной температуре $P_0 = 200$ кПа, в которой Xe выступает в качестве газа-носителя. В силу сильного разбавления формировались смешанные кластеры $(Fe(CO)_5)_n(Xe)_m$.

В рамках данной работы было проведено экспериментальное исследование динамики образования продуктов фрагментации смешанных кластеров $(Fe(CO)_5)_nXe_m$, образующихся в результате релаксационных процессов, вызванных действием фемтосекундного ИК-импульса, – нейтральных атомов ксенона и молекул $Fe(CO)_5$.

Формирование кластеров в молекулярной струе

В настоящее время конденсация газа при процессе истечении из сопла в вакуум является наиболее распространенным методом получения кластеров. Процесс конденсации газа и формирования кластеров в сопловых источниках довольно хорошо изучен, например, в работах Хагена [1] и Оберто, которые определили условия для начала кластеризации в газовых струях. Для характеристики процесса формирования свободных кластеров инертных газов Хагена вывел зависимость размера кластера от давления над соплом P_0:

$$N = N_{cr}\left(\frac{P_0}{P_{cr}}\right)^{\alpha}, \qquad (2)$$

где P_{cr} – это определенная величина давления над соплом, при котором начинается эффективное образование стабильных кластеров, размером более некоторой пороговой величины N_{cr}. Вероятность формирования кластеров в сверхзвуковых струях можно увеличить за счет разбавления исследуемых частиц в инертном газе-носителе.

Детектирование кластеров проводилось по продуктам распада с помощью времяпролетного масс-спектрометра при лазерной ионизации. Из полученных масс-спектров извлекается информация о наличии кластеров определенного типа в области ионизации и о наличии продуктов распада кластеров.

Схема экспериментального комплекса на базе времяпролетного масс-спектрометра для исследования молекулярных кластерных пучков описана в работе [2] и наглядно проиллюстрирована на рис. 1.

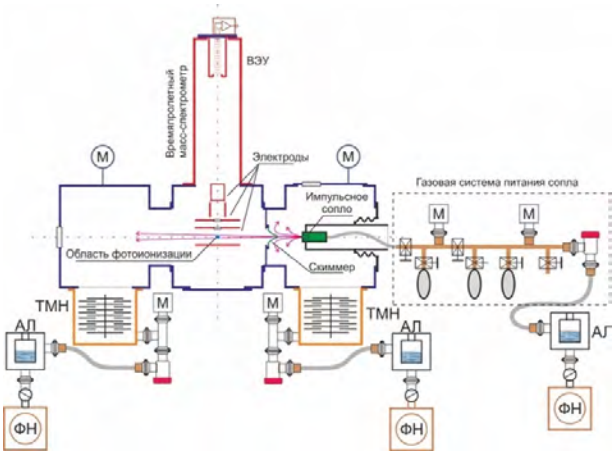


Рис. 1. Схема экспериментального комплекса: ТМН – турбомолекулярный насос, ФН – форвакуумный насос, М – манометр, АЛ – азотная ловушка

Лазерная ионизация

Источником фемтосекундного излучения в данной работе является титан-сапфировый лазер (Spectra Physics, λ = 800 нм, τ_{pulse} = 50 фс, F = 1 кГц). Выходной пучок используемого фемтосекундого лазера разделялся на два канала, один из которых использовался для генерации зондирующего импульса длительностью около 100 фс на частоте второй (400 нм) гармоники. Второй же канал использовался для генерации перестраиваемого фемтосекундного ИК-излучения с длиной волны λ = 5 мкм (2000 см$^{-1}$), с помощью которого производилось селективное возбуждение колебаний CO-связей в молекулах $Fe(CO)_5$.

Время задержки между импульсом накачки и зондирующим импульсом плавно регулировалось с помощью оптической линии задержки.

Экспериментальные исследования

При наличии ИК-импульса при больших временах задержки между импульсом накачки и зондирующим импульсом наблюдается увеличение пиков ионов масс-спектра в отличии от рассмотрения данного спектра при использовании только импульса с длинной волны λ = 400нм. Облучение кластеров $(Fe(CO)_5)_nXe_m$ достаточно интенсивным фемтосекундным ИК-излучением (центральная частота 2000 см$^{-1}$) приводит к их диссоциации (распаду). Это проявляется в достаточно сильном уменьшении амплитуды ионных пиков кластерных осколков, а также в увеличении амплитуды пика молекулярного иона.

Однако особый интерес уделяется не всему масс-спектру продуктов ионизации кластеров и мономеров, образовавшихся при распаде кластеров, а только двум пикам: от ионов Xe^+ и от ионов $Fe(CO)_5^+$.

Кинетическая кривая выхода последнего иона представлена на рис. 2. Она имеет схожие характеристики со случаем рассмотрения данного иона при ионизации однородного кластера $(Fe(CO)_5)_n$ [3]. Однако кинетическая кривая выхода иона Xe^+ требует особого внимания и описания.

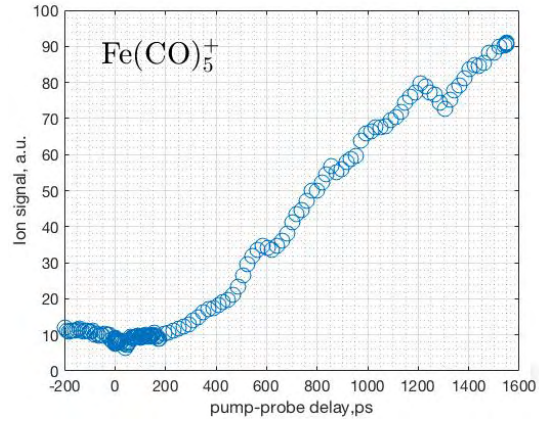


Рис. 2. Кинетика выхода иона $Fe(CO)_5^+$ из кластера $(Fe(CO)_5)_nXe_m$

Область масс-спектра в районе атомов Xe^+ при двухимпульсном зондировании кластерного пучка содержит сильно перекрывающиеся между собой пики.

Характерный масс-пик в области 127 а.е.м. при двухимпульсном зондировании представлен на рис. 3 (точками).

Для выделения сигнала от ионов, пики которых в масс-спектре значительно перекрываются, требуется использовать моделирование. Такое моделирование было проведено, в расчет включены основные изотопы Xe с массами 128, 129, 130, 131, 132, 134 и 136 а.е.м. Результат данного моделирования и продемонстрирован на рис. 3. В данном случае, помимо интересующего нас канала образования ионов Xe^+ (кривая 1, рис.3), в данной области масс-спектра присутствует сигнал от ионов Xe^+, образующихся в результате ионизации атомов газа-носителя (кривая 2, рис. 3). Полученные данные, отмеченные синими кружочками, были аппроксимированы суммарной кривой (кривая 3, рис. 3).

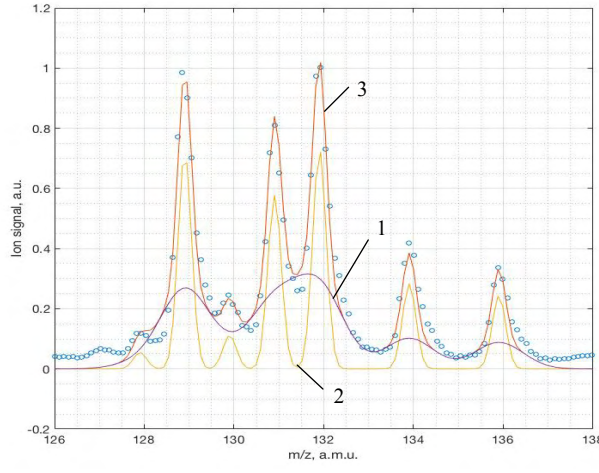


Рис. 3. Масс-спектр смешанного кластера $(Fe(CO)_5)_nXe_m$ в диапазоне масс [126:138] с сегрегацией пиков каждого иона

Для получения кинетики от ионов Xe^+, образующихся по интересующему нас каналу, моделирование, подобное изображенному на рис. 3, было проведено для каждого значения времени задержки между импульсом накачки и зондирующим импульсом. После чего полученные для сигнала от ионов Xe^+ огибающие были проинтегрированы, и, таким образом, извлечена кинетика, изображенная на рис. 4.

Кинетика на рис. 4 содержит характерный пик в области пересечения лазерных импульсов и последующий монотонный рост вплоть до величины задержки между лазерными импульсами, равной 300 пс, и последующее монотонное падение сигнала вплоть до времени задержки порядка 1,6 нс. Изменение сигнала можно описать экспоненциальной функцией вида $f(t) \sim \exp(-t/\tau_1) - \exp(-t/\tau_2)$, где величины характерных времен составляют $\tau_1 = 315$ пс и $\tau_2 = 292$ пс.

Анализ полученных данных позволяет рассмотреть процесс диссоциации как первоначально процесс отрыва свободных молекул в результате первоначального нагрева исходных кластеров. В результате внутримолекулярной релаксации энергия возбужденных CO колебаний уходит в низкочастотные колебания самой молекулы и передается межмолекулярным колебаниям кластера, приводя к нагреву самого кластера и последующему отрыву свободных молекул. Данное перераспределение энергии приводит к нагреву самого кластера и последующему отрыву свободных молекул, сначала более легких ионов Xe^+, а затем более тяжелых ионов $Fe(CO)_5^+$. За счет этого наблюдается сначала значительный рост сигнала от Xe^+ с характерным временем τ_1 и последующее падение со временем τ_2.

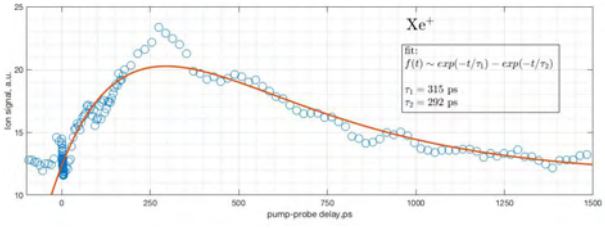


Рис. 4. Кинетика выхода молекулярного иона Xe^+ из кластера $(Fe(CO)_5)_nXe_m$

Заключение

В рамках работы:

– проведено экспериментальное исследование динамики образования продуктов фрагментации смешанных кластеров $(Fe(CO)_5)_nXe_m$, образующихся в результате релаксационных процессов, вызванных действием фемтосекундного ИК-импульса;

– использовано компьютерное моделирование для разделения пиков и получения информации о характерных временах фотохимических процессов;

– построена феноменологическая модель, описывающая релаксационные процессы, приводящие к распаду смешанного кластера $(Fe(CO)_5)_nXe_m$. Согласно данной модели, распад кластера происходит за счет передачи первоначально запасенной колебательной энергии сначала в низкочастотные колебания самой молекулы, а после в межмолекулярные колебания, что приводит к последовательному отрыву молекул;

– обнаружено, что имеет место последующая релаксация этого сигнала, описываемая двумя характерными временами, $\tau_1 = 315$ пс и $\tau_2 = 292$ пс.

Литература

1. Hagena O. F. Nucleation and growth of clusters in expanding nozzle flows // Surf. Sci. 1981. Vol. 106. P. 101–116.

2. Иващенко А. А., Асеев С. А., Баграташвили В. Н., Панченко В. Я., Рябов Е. А. Сверхбыстрая электронная дифракция и электронная микроскопия: современное состояние и перспективы // УФН. 2014. № 184. С. 681–722.

3. Poydashev D. G., Lokhman V. N., Kompanets V. O., Chekalin S. V., Ryabov E. A. Ultrafast Dissociation Dynamics of the $[Fe(CO)_5]_n$ Clusters Induced by Femtosecond IR Radiation // J. Phys. Chem. A. 2014. Vol. 118. P. 11177−11184.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ОТРАБОТКА ВЗРЫВНЫХ МЕТАЮЩИХ УСТРОЙСТВ, ФОРМИРУЮЩИХ КОМПАКТНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СО СКОРОСТЬЮ ПОЛЕТА ОТ 1,5 ДО 4,5 КМ/С

А. С. Балабанов, Г. Р. Валиева, Д. В. Маляров, Д. А. Пукита, Д. А. Рыбин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Околоземное космическое пространство является самым используемым участком космоса на данном этапе развития человечества. Ежегодно на различные орбиты выводится большое количество спутников, обеспечивающих нашу повседневную жизнь. Однако их стабильной работе угрожают объекты естественного (микрометеориты) и искусственного происхождения – так называемый «космический мусор» (КМ). КМ – это фрагменты космических аппаратов (КА), частицы твердого ракетного топлива и т. д. Их размеры могут варьироваться от долей миллиметра, до десятков сантиметров [1]. На орбите частицы КМ могут представлять опасность для КА, так как скорость их сближения с КА может составлять километры в секунду [2].

Для экспериментальной проверки и оценки возможных последствий воздействия частиц КМ на незащищенные узлы необходимо разработать устройства, которые могли бы воспроизводить в наземных условиях такие воздействия – удар компактным (удлинением не более 3) элементом (КЭ), с характерным размером около 5 мм, и скоростью полета от 1,5 и выше километров в секунду.

Наиболее простым способом создания элементов, обладающих требуемыми характеристиками является взрывной разгон ударников с помощью контактного подрыва заряда взрывчатого вещества (ВВ) [3]. Предельной скоростью метания в такой постановке является скорость детонации использованного взрывчатого состава заряда ВВ (скорость разлета продуктов взрыва в вакуум), ограниченная значением (7÷8,5) км/с [4].

Для формирования КЭ со скоростью полета порядка 4,0 км/с предложена схема взрывного метающего устройства (ВМУ), показанная на рис. 1.

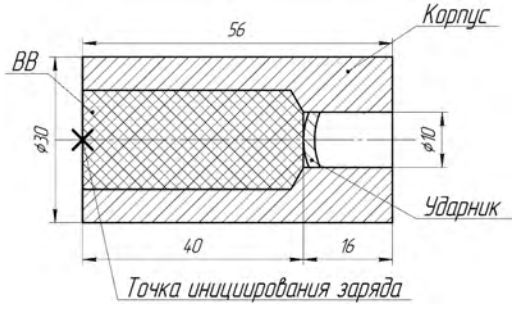


Рис. 1. Схема ВМУ для формирования КЭ со скоростью полета 4,0 км/с

Заряд ВВ располагался в стальном корпусе, имеющим ствольную часть, в которой установлен ударник. Диаметр заряда примерно в 1,5 раз превышал диаметр ствольной части для компенсации боковых волн разгрузки. Ударник представлял собой сферический сегмент диаметром 10 мм, толщиной 2 мм из алюминиевого сплава АМг-6. Такая форма позволяет придать периферийным участкам изначально относительно тонкостенной сегмента радиальную составляющую скорости и сформировать из него компактный элемент. Инициирование ВМУ производилось по центру левого (на рис. 1) торца заряда ВВ.

Двумерное численное моделирование рассматриваемых задач проводилось в осесимметричной постановке на неподвижной эйлеровой сетке. Счетная сетка была прямоугольной, при этом в наиболее интересующих областях (в районе ударника и оси его полета) ячейки представляли собой квадраты, а в менее интересных (зона инициирования, периферия заряда ВВ) – прямоугольники. Минимальные размеры ячейки составляли $h \approx 0{,}2$ мм и были выбраны из условия, чтобы на толщину ударника приходилось не менее 10 ячеек.

Уравнения состояния материалов задавалось в форме Ми–Грюнайзена [5]. Значения физико-механических характеристик конструкционных материалов выбраны из библиотеки используемого программного комплекса.

Результаты расчета этой схемы ВМУ представлены на рис. 2 разрезом (полем плотности) на момент $t = 15$ мкс от инициирования заряда.

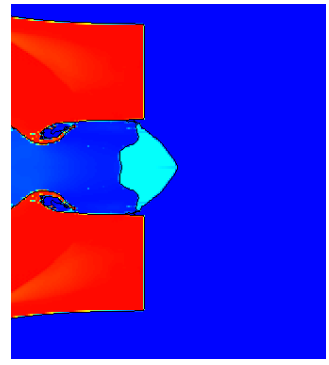


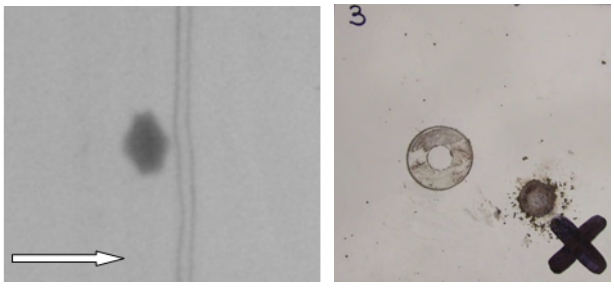
Рис. 2. Поле плотности момент $t = 15$ мкс

Согласно расчету, устройство формирует компактный элемент размерами (6,0×5,8) мм, движу-

щийся со скоростью около 3,7 км/с. В элементе равномерное распределение плотности и скорости, что позволяет надеяться на формирование сохранного (не разрушенного) КЭ.

С этой конструкцией ВМУ проведена серия экспериментов. Скорость КЭ определялась хронографическим способом по временам срабатывания лавсановых контактных датчиков, установленных на траектории его полета. Форма КЭ и его сохранность (неразрушенность) контролировалась по изображению на рентгенограмме. После прохождения зоны регистрации параметров элемент взаимодействовал со стальной преградой, оставляя кратер, по форме которого можно косвенно судить о сохранности и компактности образовавшего его ударника – воздействию компактного элемента соответствует одиночный кратер, формой, близкой к полусферической.

В экспериментах варьировался прогиб ударника. Величина прогиба влияет на компактность и сохранность формируемого элемента. Так, при прогибе 1,5 мм происходит сильное радиальное схождение материала ударника к оси. При этом формируется кумулятивная струя, которая отделяется от основной массы ударника. В итоге элемент получается разрушенным. При снижении прогиба до 0,9 мм формируется сохранный компактный элемент размерами (6,5×5,5) мм, движущийся со скоростью 3,8 км/с. Фрагмент рентгенограммы с изображением такого КЭ и фотография кратера, оставленного им в стальной преграде (форма которого, близкая к полусферической, свидетельствует о сохранности и компактности элемента), приведены на рис. 3.



а б

Рис. 3. Фрагмент рентгенограммы с изображением КЭ и фотография кратера, оставленного им в стальной преграде: а – фрагмент рентгенограммы; б – фотография кратера в стальной преграде

Для формирования КЭ с более высокой скоростью полета предложена схема ВМУ, представленная на рис. 4. Основное ее отличие от предыдущей – толщина ударника уменьшена вдвое – до 1 мм. Так как при этом несколько изменилась динамика формирования элемента, внесены изменения и в конфигурации корпуса ВМУ и заряда ВВ – переход от диаметра заряда к диаметру ствольной части выполнен в виде прямоугольной ступеньки.

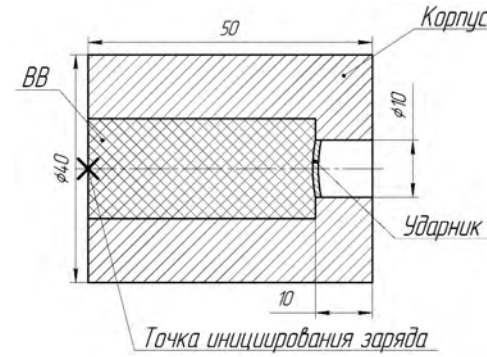


Рис. 4. Схема ВМУ для формирования КЭ со скоростью полета 4,5 км/с

Результаты расчета этой схемы ВМУ представлены на рис. 5 разрезом (полем плотности) на момент $t = 10$ мкс от инициирования заряда.

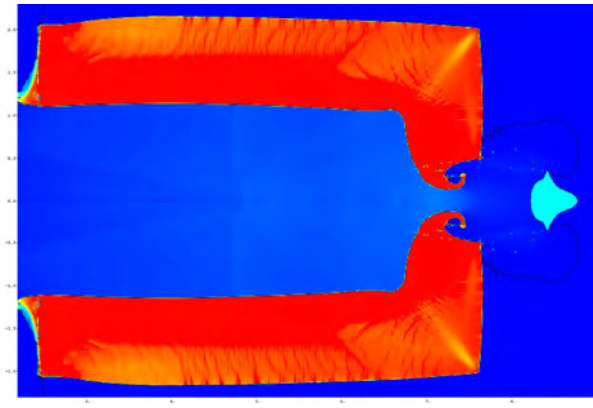
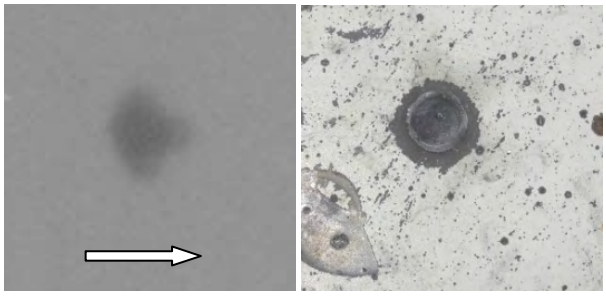


Рис. 5. Поле плотности момент $t = 10$ мкс

Согласно расчету сформирован компактный элемент размерами (5,8×5,5) мм. Его скорость составила 4,5 км/с, т. е. при уменьшении толщины, а, следовательно, и массы ударника вдвое (при сохранении размеров и массы заряда ВВ), скорость КЭ увеличилась на 700 м/с (около 18 %). Дальнейшее уменьшение толщины ударника (или увеличение размеров заряда при сохранении толщины ударника) приведет к незначительному увеличению скорости ударника. Об этом говорит пологий характер функций скорости при больших значениях относительных размеров заряда в модели одномерного метания Гарни [6].

В ходе экспериментальной отработки данного ВМУ было проведено 4 опыта, во всех из которых был сформирован сохранный КЭ размерами около (6,0×5,2) мм, движущийся со скоростью 4,3 км/с. Фрагмент рентгенограммы с изображением КЭ, а также фотографии кратера, оставленного им в стальной преграде, показаны на рис. 6.

Для формирования КЭ, со скоростью полета около 1,5 км/с, толщина заряда в предыдущей конструкции уменьшена до 2 мм. Полученная таким образом схема ВМУ, представлена на рис. 7.



а б

Рис. 6. Фрагмент рентгенограммы с изображением КЭ и фотография кратера, оставленного им в стальной преграде: а – фрагмент рентгенограммы; б – фотография кратера в стальной преграде

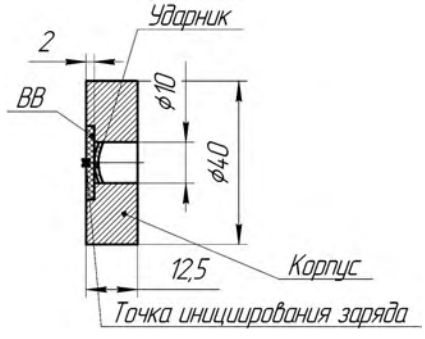


Рис.7. Схема ВМУ для формирования КЭ со скоростью полета около 1,5 км/с

Результаты расчета этой схемы ВМУ представлены на рис. 8 разрезом (полем плотности) на момент $t = 10$ мкс от инициирования заряда. Согласно расчету сформирован компактный элемент размерами (5,9×4,8) мм, движущийся со скоростью 1,5 км/с.

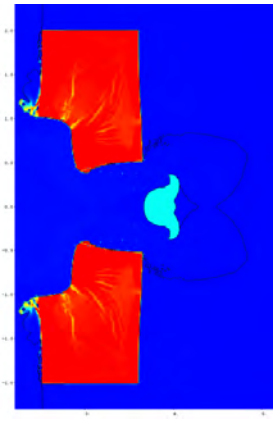


Рис. 8. Поле плотности момент $t = 10$ мкс

Необходимо отметить, что при экспериментальной отработке этой конструкции обнаружилось сильное влияние электродетонатора на разгон и формирование элемента. Электродетонатор в своем составе имеет заряд мелкодисперсного тэна массой около 0,4 г, что составляет примерно половину массы заряда ВВ ВМУ. Поэтому в первом эксперименте скорость элемента составила около 2,2 км/с и при торможении в уловителе он разрушился. Для устранения влияния электродетонатора на работу ВМУ предложено инициирование производить через относительно тонкий (около 1 мм) жгут пластического ВВ, помещенного в слое пенопласта. Окончательная конструкция ВМУ, и его фотография приведены на рис. 9.

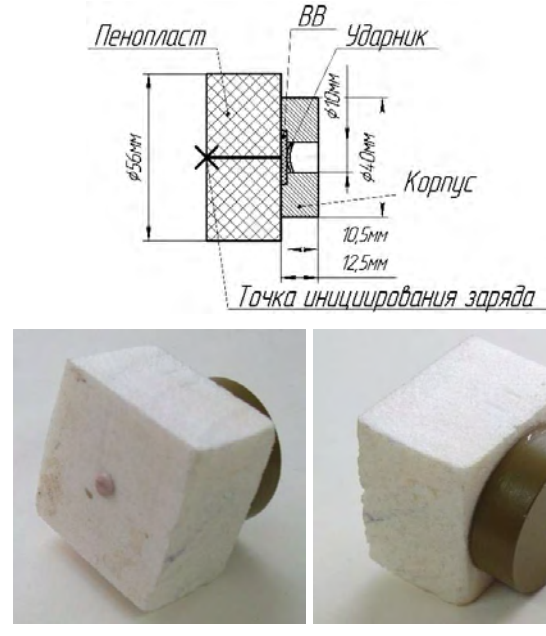


Рис. 9. Конструкция ВМУ и его фотографии, формирующая КЭ со скоростью полета 1,5 км/с

Так как скорость КЭ относительно невысокая, для определения его массово-габаритных параметров прямыми обмерами, предложено уловить его в тормозящей среде, состоящей из слоев пенопласта различной плотности и слоев опилок. Использование в качестве тормозящей среды материалов низкой плотности создает воздействие (давление) на сформированный элемент ниже динамического предела текучести, что позволяет остановить его без разрушения и существенных деформаций.

Для оценки толщин слоев тормозящей среды использовалась математическая модель торможения тела под действием скоростного напора [7].

$$m\frac{dV}{dt} = -\frac{\rho C_x V^2 S}{2}. \qquad (1)$$

Из которой получено уравнение для скорости КЭ $V(h)$ в зависимости от пройденного расстояния h в уловителе

$$\frac{dV}{dt} = \frac{dV}{dh}\frac{dh}{dt}, \text{ где } \frac{dh}{dt} = V, \qquad (2)$$

$$V(h) = V_0 \Big/ e^{\frac{C_x \rho S h}{2m}}. \qquad (3)$$

где m - масса КЭ, V – его скорость; h – расстояние, пройденное КЭ в тормозящей среде; C_x – коэффициент лобового сопротивления КЭ; S – площадь миделевого сечения КЭ, ρ – плотность тормозящей среды.

Дополнительно контролировалось значение давления скоростного напора, реализующееся на передней поверхности КЭ $P = \frac{\rho V^2}{2}$, которое не должно превышать прочность материала КЭ.

Рассчитано, что для улавливания КЭ необходимо применить отсекатель, состоящий из 600 мм пенопласта марки ПС-35 и 40 мм сухих сосновых опилок.

В результате серии экспериментов, в которых варьировался прогиб ударника, отработана конструкция ВМУ, формирующая компактный элемент размерами около (6,5×3,5) мм, движущийся со скоростью около 1,5 км/с. Изображение КЭ на рентгенограмме, и его фотография после извлечения из уловителя приведены на рис. 10.

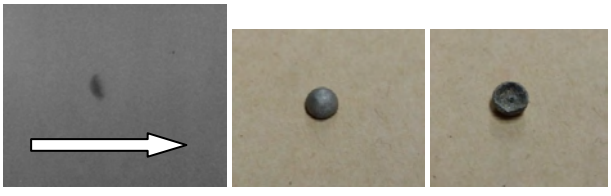


Рис. 10. Рентгеновский снимок и фотографии КЭ

Таким образом, расчетно обоснованы и экспериментально отработаны три конструкции ВМУ, формирующие сохранный КЭ из алюминиевого сплава в диапазоне скоростей от 1,5 до 4,3 км/с, средний характерный размер которых составил 5,4 мм.

Литература

1. Вениаминов С. С. Космический мусор – угроза человечеству. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Под ред. Р. Р. Назирова, О. Ю. Аксенова М.: ИКИ РАН, 2013.С. 208.

2. Новиков Л. С. Воздействие твердых частиц естественного и искусственного происхождения на космические аппараты // Учебное пособие. М.: Университетская книга, 2009. С. 104.

3. Физика взрыва / Под ред. Л. П. Орленко Изд. 3-е, перераб. М.: Физматлит, 2002. Т. 2. С. 832.

4. Физика взрыва / Под ред. Л. П. Орленко. Изд. 3–е, переработанное. М.: Физматлит, 2002. Т. 1. С. 656.

5. Копышев В. П. О простейшем уравнении состояния твердых тел // ВАНТ. Сер. ТПФ. 2002. Вып. 1–2.

6. Gurney R. W. The initial velocities of fragments form bombs, shells and grenades // BRL Report. 1943. N 405.

7. Остославский И. В., Титов В. М. Аэродинамический расчет самолета. М.: Оборонгиз, Главная редакция авиационной литературы, 1947. С. 354.

РЕГИСТРАЦИЯ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ФОНЕ НОЧНОГО НЕБА ВИДЕОКАМЕРАМИ С НИЗКИМ ПОРОГОМ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

А. А. Бобков, Л. И. Зыков, С. П. Смышляев, А. Ю. Сюндюков

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Засорение околоземного космического пространства становится проблемой, которая представляет опасность для пилотируемых полетов и эксплуатации автоматических космических аппаратов. По разным оценкам, вокруг Земли обращается более 700 тысяч техногенных объектов размерами более 1 см [1]. Проблема контроля космического пространства становится актуальной, как с позиций защиты от столкновения с «космическим мусором» [2–3], так и с позиций астероидной опасности [4].

При регистрации слабосветящихся космических объектов (звезды, нефункционирующие КА) на фоне ночного неба требуются видеокамеры, обладающие высокой чувствительностью и низким уровнем собственных шумов. К таким видеокамерам, сочетающим эти свойства, можно отнести видеокамеры с усилителем яркости (ICCD) [8], с электронным умножением сигнала (EMCCD) [5, 6], а также видеокамеры, построенные на фотоприемных научных КМОП матрицах (sCMOS [5, 6]).

Целью работы являлось испытание конкретных образцов видеокамер на указанных принципах построения, определение порога их чувствительности и выбор видеокамеры, позволяющей получить лучшее качество визуализации космических объектов (большее отношение сигнал/шум) на фоне ночного неба.

Характеристики исследуемых видеокамер

В табл. 1 приведены характеристики исследованных видеокамер SIM-ICCD, Andor iXon 860 и Dhyana 400D, выписанные из паспортных данных, даваемых производителем. Испытываемая видеокамера SIM-ICCD построена на основе кремниевой видеокамеры Sony XC-ST70CE. По сравнению с образцом от изготовителя (Германия) матрица камеры была сопряжена при помощи волоконной шайбы с отечественным электронно-оптическим преобразователем (ЭОП) имеющим фотокатод типа ФПМ-4-1 от производителя НПО «Геофизика – НВ». Подробное описание принципа работы такого типа видеокамер приведено в работе [8].

Видеокамера Andor iXon 860 построена по технологии EMCCD (Electron Multiplying Charge-Coupled Device) с электронным умножением сигнала до 1000 раз. Причем, сигнал усиливается выше уровня шума считывания усилителя, что приводит к более высокой чувствительности по сравнению с ПЗС (приборы с зарядовой связью) видеокамерами [6, 8]. В видеокамере Andor iXon 860 используется фотоприемная ПЗС матрица CCD60 от фирмы E2V.

В видеокамере Dhyana 400D применяется фотоприемная матрица FL-400, созданная по технологии научного КМОП (sCMOS). Такого типа фотоприемные матрицы имеют раздвоенную схему считывания, в которой верхняя и нижняя половинки матрицы считываются независимо друг от друга. Каждый столбец в каждой половине сенсора оснащен двумя усилителями и двумя аналого-цифровыми преобразователями (АЦП), в результате этого удается достигать низких значений шума считывания, как следствие высокого динамического диапазона [6].

Из табл. 1 видно, что самый минимальный (3,1×3,1 мм) и максимальный размер (13,3×13,3 мм) фотоприемной матрицы у видеокамеры Andor iXon 860 и Dhyana 400D, соответственно. Пиксель наибольшего размера равный 17,5 и 24 мкм имеют видеокамеры SIM-ICCD и Andor iXon 860. Наибольший диапазон переключения экспозиции предусмотрен в видеокамере Dhyana 400D (от 13 мкс до 10 с) и видеокамере Andor iXon 860 (от 1 мс до 1 с). Видеокамеры SIM-ICCD, Andor iXon 860 и Dhyana 400D работают в полно кадровом режиме с частотой 25 Гц, 513 и 35 Гц, соответственно. В видеокамерах Andor iXon 860 и Dhyana 400D предусмотрено дополнительное бинирование (объединение) пикселей матриц.

В видеокамерах Andor iXon 860 и Dhyana 400D реализовано охлаждение фотоприемных матриц до -100 и –10 °С, соответственно. За счет их охлаждения удается достигать низких значений темновых токов у видеокамер Andor iXon 860 и Dhyana 400D. Паспортные значения шумов у видеокамеры SIM-ICCD не приводятся.

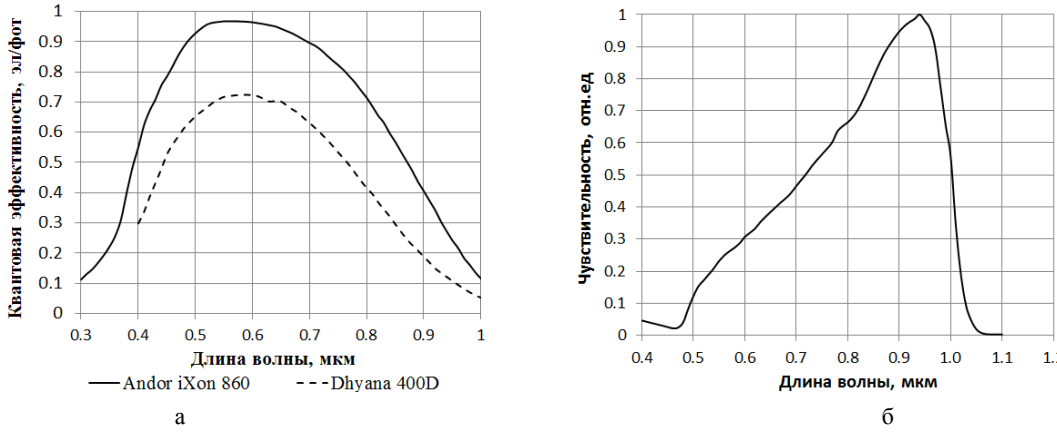
На рис. 1 приведена зависимость квантовой эффективности видеокамер Andor iXon 860 и Dhyana 400D, а также спектральной чувствительности фотокатода усилителя яркости видеокамеры SIM-ICCD в относительных единицах от длины волны.

Как видно из рис. 1а, наибольшее значение квантовой эффективности на длине волны 0,55 мкм имеет видеокамера Andor iXon 860 равное 0,95 эл/фот, что в 1,3 раза выше, чем у видеокамеры Dhyana 400D. Из рис. 1б видно, что у видеокамеры SIM-ICCD максимум чувствительности сдвинут в ближнюю инфракрасную область на длину волны 0,95 мкм.

Таблица 1

Характеристики исследуемых видеокамер

Видеокамера	SIM-ICCD	Andor iXon 860	Dhyana 400D
Тип и марка матрицы	Sony ICX024AL	ПЗС матрица CCD60 от E2V	Научная КМОП матрица FL-400
Технология усиления входного сигнала	ЭОП с фотокатодом ФПМ-4-1	Дополнительный регистр умножения сигнальных электронов	–
Коэффициент усиления		до 1000 раз	–
Разрешение, пикселей	736×544	128×128	2048×2048
Размер матрицы, мм	12,9×9,5	3,1×3,1	13,3×13,3
Размер пикселя, мкм	17,5×17,5	24×24	6,5×6,5
Биннинг, пкс	–	2×2, 4×4	2×2
Время экспозиции, мс	40	1–1000	0,013–10000
Частота кадров, Гц	25	513 (в полнокадровом режиме)	35 (в полнокадровом режиме)
Глубина потенциальной ямы, ke^-		160	30
Темновой ток, эл/сек		0,002 (при $T = -85$ °C)	0,35 (при $T = -10$ °C)
Шум считывания, эл		< 1	1,3
Охлаждение, °C	–	–80 – воздушное, –100 – жидкостное	–10 – жидкостное
Формат сигнала	Аналоговый, 8 бит	Цифровой, 14 бит	Цифровой, 16 бит



а б

Рис. 1. Зависимости: а – квантовая эффективность видеокамер Andor iXon 860 и Dhyana 400D; б – спектральная чувствительность фотокатода видеокамеры SIM-ICCD

Измерение чувствительности исследуемых видеокамер

Для определения чувствительности исследуемых видеокамер снимались их светосигнальные характеристики. Регистрация проводилась в затемненном лабораторном помещении по схеме, приведенной на рис. 2.

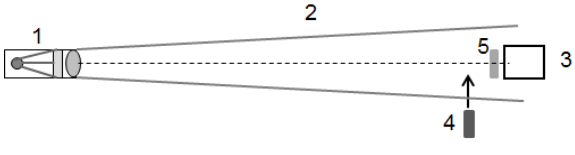


Рис. 2. Схема измерения светосигнальных характеристик: 1 – источник монохроматического света (532 нм), 2 – световой пучок, 3 – исследуемая видеокамера, 4 – измеритель мощности Ophir Nova PD-300, 5 – нейтральные светофильтры

Источник монохроматического света *1*, рис.1, на длине волны 532 нм расходящимся пучком *2* освещал фотоприемную матрицу исследуемой видеокамеры *3*. Источник монохроматического света *1* был устроен следующим образом. На выходе светодиода с белым светом излучения ставился интерференционный светофильтр выделяющий длину волны 532 нм с шириной полосы 5 нм. Далее свет с помощью линзы с фокусным расстоянием 4 см расширялся в пучок диаметром около 15 см. Расстояние от источника света до фотоприемной матрицы составляло 180 см для видеокамер SIM-ICCD, Andor iXon 860 и 98 см для видеокамеры Dhyana 400D. Сигнал с видеокамеры регистрировался на компьютере. При снятии светосигнальной характеристики поток падающего на матрицу света изменялся путем установки перед видеокамерой нейтральных светофильтров *5*. В измерениях использовались светофильтры НС1, НС6,

НС13 размером 80×80 мм толщиной 3 мм и НС6, НС7, НС8, НС9 и НС13 размером 40×40 мм толщиной 2 мм, а также их комбинации. Пропускание светофильтров изменялось в интервале от 0,73 до $1{,}2\cdot10^{-5}$. Измерение падающего на матрицу светового потока производилось путем временной постановки светочувствительной площадки измерителя мощности *4* на место фотоприемной матрицы видеокамеры. При измерениях время экспозиции на видеокамерах SIM-ICCD и Dhyana 400D было постоянным и составляло 40 мс. На видеокамере Andor iXon 860 время экспозиции в основном было равное 40 мс, но некоторые точки были сняты при времени экспозиции 20 и 1 мс. В измерениях на видеокамере SIM-ICCD выставлялось максимальное усиление ЭОПа. На видеокамере Andor iXon 860 было выставлено предусиление сигнала равное 4,5 и режим умножения сигнала EM 300.

Число фотонов, упавших на один пиксель фотоприемной матрицы (независимо от того как были накоплены фотоны – при вариации интенсивности светового потока или времени экспозиции) находилось по формуле:

$$N = \frac{Pt_э}{h\nu}, \qquad (1)$$

где P – измеренная мощность излучения, пересчитанная на один пиксель матрицы; $t_э$ – время экспозиции, установленное на видеокамере при съемке; $h\nu = 3{,}73\cdot10^{-19}$ Дж – энергия фотона на длине волны используемого источника света ($\lambda = 532$ нм).

Полученные светосигнальные характеристики для видеокамер SIM-ICCD, Andor iXon 860 и Dhyana 400D представлены на рис. 3. Следует отметить, что светосигнальные характеристики видеокамер приведены в своей глубине оцифровки видеосигнала, которая была индивидуальной для каждой камеры. А именно 8, 14 и 16 бит соответственно для видеокамер SIM-ICCD, iXon 860 и Dhyana 400D.

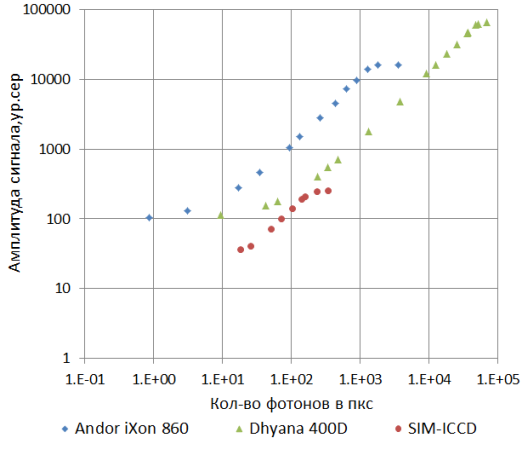


Рис. 3. Светосигнальные характеристики исследуемых видеокамер

По полученным характеристикам определялся угол наклона кривой светосигнальной характеристики на линейном участке, который определяет монохроматическую чувствительность $s(\lambda)$ видеокамеры. Найденные значения этих чувствительностей (см. табл. 2) составляют: 1,3 (SIM-ICCD), 10,8 (Andor iXon 860) и 1,2 (Dhyana 400D) ур.сер/фотон. Видеокамера Andor iXon 860 обладает самой высокой чувствительностью на длине волны 532 нм, т. е. дает наибольший отклик на фиксированную порцию монохроматического света с этой длиной волны, а видеокамера Dhyana 400D – наименьший отклик.

При регистрации звезд и космических объектов в широком спектре фотоприемника необходимо пользоваться интегральной чувствительностью S, которая связана с монохроматической чувствительностью выражением [7]:

$$S = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \phi(\lambda)s(\lambda)d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \phi(\lambda)d\lambda}, \text{ (ур.сер/фотон)}, \qquad (2)$$

где $\phi(\lambda)$ (Вт/м^2·мкм) – падающий на приемник поток излучения, $s(\lambda)$ (ур.сер/фот) – спектральная чувствительность исследуемой видеокамеры.

Интегральная чувствительность испытанных камер находилась в предположении, что регистрируемый поток от звезды имеет солнечно-подобный спектр. При пересчете от измеренной спектральной чувствительности на длине волны 532 нм на интегральную чувствительность использовалась форма кривой спектральной чувствительности видеокамер от производителя, приведенная на рис. 1. Посчитанные по формуле (2) значения интегральной чувствительности в полосе от 0,4 до 1,1 мкм приведены также в табл. 2. Для сопоставления полученных чувствительностей между собой можно найти долю заполнения динамического диапазона каждой камеры, приходящуюся на один фотон светового воздействия. Это равносильно операции пересчета сигнала на одну цифровую размерность. Проделав, можно получить долю заполнения равную $1{,}65\cdot10^{-2}$ для камеры SIM-ICCD, $4{,}88\cdot10^{-4}$ для камеры Andor iXon 860 и $1{,}22\cdot10^{-5}$ для камеры Dhyana 400D. Из приведенных данных видно, что наибольший отклик в цифровых единицах на воздействующий интегральный свет, дает видеокамера SIM-ICCD, меньший – камера Andor iXon 860 и еще меньше – камера Dhyana 400D.

При регистрации звезд на фоне темного ночного неба важным является порог чувствительности фотоприемника. Согласно [7] пороговая чувствительность – это минимальный поток излучения, который вызывает в видеокамере сигнал, равный уровню собственных шумов. Тогда порог чувствительности фотоприемника к падающему на него интегральному световому потоку будет определяться как:

$$N_{пор} = \frac{A_ш}{S}, \qquad (3)$$

где $N_{пор}$ – порог чувствительности в фотонах, $A_ш$ – полный шум темнового кадра в уровнях серого, S – интегральная чувствительность видеокамеры.

Таблица 2

Чувствительность и порог чувствительности испытанных видеокамер

Марка видеокамеры	Разрядность, бит	Шум темн. кадра, ур.сер	s (532нм), ур.сер/фотон	Интегральная S, ур.сер/фотон	$N_{пор}$, фотон	Динамический диапазон
SIM-ICCD	8	7,4	1,3	4,2	1,8	34
Andor iXon	14	10,1	10,8	8	1,3	1620
Dhyana	16	3,1	1,2	0,8	3,9	21000

В табл. 2 приведен, измеренный при закрытой от света фотоприемной матрице, полный темновой шум (с учетом темнового временного шума и пространственного шума) для испытанных видеокамер. Значения шума даны для времени экспозиции 40 мс для каждой видеокамеры со своей глубиной оцифровки и равны: 7,4 ур.сер (8 бит/пкс) для камеры SIM-ICCD, 10,1 ур.сер (14 бит/пкс) для камеры Andor iXon 860 и 3,1 ур.сер (16 бит/пкс) для камеры Dhyana 400D. Найденный по формуле (3) интегральный порог чувствительности исследуемых видеокамер (см. табл. 2) составил 1,3 и 1,8 фотона у видеокамер Andor iXon 860 и SIM-ICCD, соответственно. У видеокамеры Dhyana 400D порог чувствительности оказался больше по величине и равен 3,9 фотона. Для проведения успешной регистрации испытанными видеокамерами звезд на темном ночном небе необходимо заведомо превышать этот порог.

Регистрация звезд на фоне ночного неба исследуемыми видеокамерами

На рис. 4 приведена оптическая схема регистрации звезд на фоне ночного неба. Исследуемые камеры устанавливались на два одинаковых телескопа и могли регистрировать звезду одновременно. Применялись телескопы ТАЛ-200К, которые имели одинаковое фокусное расстояние 1,7 м и одинаковый диаметр 200 мм входной апертуры. Телескопы закреплялись неподвижно, их оптические оси устанавливались параллельно. Свет от звезды после отражения от зеркала диаметром 760 мм с алюминиевым отражающим покрытием и прохождения телескопов ТАЛ-200К попадал далее на матрицы испытываемых видеокамер. В качестве видеокамеры сравнения использовалась видеокамера Andor iXon 860. Основные технические параметры видеокамер приведены в табл. 1. Зеркало было закреплено на опорно-поворотном устройстве, управление которым осуществлялось через блок управления с помощью компьютера по линии связи Ethernet. Использовалось опорно-поворотное устройство (ОПУ) с приводами от шаговых двигателей. Точность удержания звезды составляла ~10 угловых секунд. Все детали оптической схемы были установлены на грунтовой поверхности в переносных легких укрытиях. Высота над уровнем моря, измеренная навигатором Garmin, составляла 150 м.

Кадры изображений с видеокамер записывались на компьютеры управления. При каждом сеансе наблюдений записывалось 50 кадров видеоизображений. Их обработка проводилась с помощью программы AstroImageJ, количественно определялись интеграл сигнала, размер пятна изображения, амплитуды сигнала, фона, шума и отношение сигнал-шум. При определении отношения сигнал-шум за сигнал принималась средняя амплитуда в изображении звезды (отношение интеграла звезды к площади пятна изображения), а за шум – среднеквадратичное отклонение амплитуды фона рядом с ее изображением в области 10×10 пикселей матрицы.

Поле зрения исследуемых видеокамер составляли 27×27, 26×19 и 6,3×6,3 угл.мин. соответственно у Dhyana 400D, SIM-ICCD и Andor iXon 860.

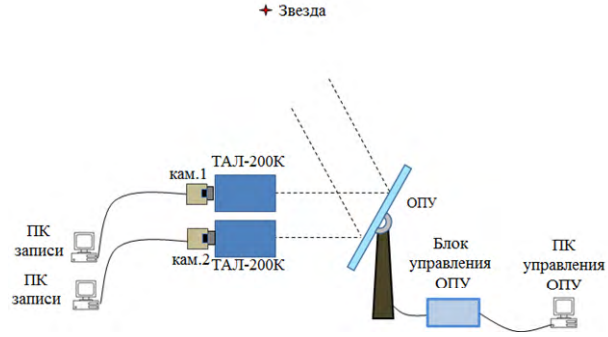


Рис. 4. Схема эксперимента

Регистрация звезд видеокамерами SIM-ICCD и Andor iXon 860

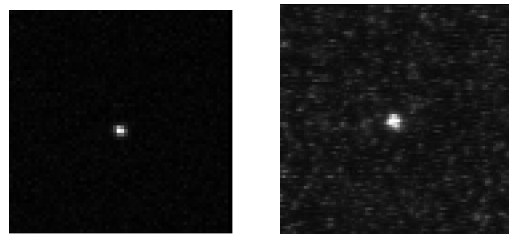
В табл. 3 приведены условия регистрации звезд с блеском $9{,}1^m$–$10{,}2^m$ на фоне ночного неба. Регистрация звезд проводилась 20 июня 2019 г. в периоды с 00:14 до 00:31 и с 22:48 до 22:55 часов местного поясного времени. Во время съемки с 00:14 до 00:31 небо было безоблачное, с 22:48 до 22:55 на небе присутствовали кучевые облака, регистрация проводилась в моменты времени, когда имел место разрыв между кучевыми облаками. Звезды регистрировались при высоте Солнца, изменявшейся в диапазоне от -5^0 до -11^0. Угол элонгации, т. е. угловое расстояние от регистрируемой звезды до Солнца, изменялся от 38^0 до 93^0. Яркость ночного неба измерялась предварительно прокалиброванной испытуемой видеокамерой Andor iXon 860 по методике, описанной в [10]. В условиях наблюдений яркость неба (на длине волны 550 нм) изменялась в диапазоне от $8{,}2\times10^{-5}$ до $5{,}6\times10^{-4}$ Вт/м^2·ср·мкм (от 18 до 15,9 зв.вел/угл.сек^2),

т. е. примерно в 6,8 раза. Необходимо отметить, что эта яркость неба не была самой минимальной для ночного неба, которая может достигать 22–23 зв.вел/угл.сек^2 [9].

Время экспозиции на испытываемых видеокамерах SIM-ICCD и Andor iXon 860 в оба сеанса регистрации было постоянным, и составляло 40 мс. Следует отметить, что на видеокамере SIM-ICCD изображение звезд с блеском меньше, чем 9,1^m (т. е. более яркие звезды) находилось в насыщении, поэтому такие звезды не использовались для численного анализа и в табл. 3 не приведены.

На рис. 5 приведены фрагменты снимка звезды SAO 001276 с блеском 9,1^m с видеокамеры Andor iXon 860, рис. 5а и видеокамеры SIM-ICCD, рис. 5б. Фрагмент представлен в угловом поле зрения равном 3×3 угловых минут.

Рассмотрение снимков, рис. 5, показало, что в поперечнике пятна изображения звезды укладывается 3 пикселя на видеокамере Andor iXon 860 и 6 пикселей на видеокамере SIM-ICCD. В ходе регистрации угловой размер изображения звезд по уровню 0,5 от максимальной амплитуды сигнала в пятне изображения изменялся от 7,4 до 9,8 угловых секунд на видеокамере Andor iXon 860 и от 9,8 до 17,4 угловых секунд на видеокамере SIM-ICCD. В среднем, угловой размер зарегистрированных звезд на видеокамере SIM-ICCD в 1,8 раза получился выше, чем на видеокамере Andor iXon 860. Причиной этому могут являться абберации, возникающие в оптическом тракте ЭОП видеокамеры SIM-ICCD.



а б

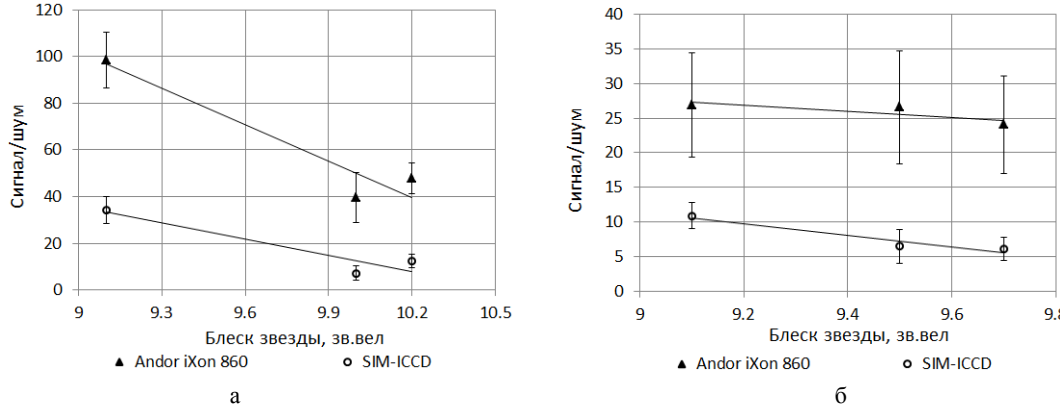
Рис. 5. Фрагменты снимков звезды SAO 001276:
а – Andor iXon 860; б – SIM-ICCD

На графиках, представленных на рис. 6, отложены значения отношений сигнал-шум в проведенных регистрациях 20 июня 2019 г. в период с 00:14 до 00:31 часов и с 22:49 до 22:57 часов местного поясного времени в зависимости от блеска зарегистрированных звезд.

Таблица 3

Условия регистрации звезд с блеском 9,1^m–10,2^m

Дата и время регистрации	Название звезды	Блеск и спектр	Координаты Солнца, град	Угол элонгации, град	Яркость неба, Вт/м^2·ср·мкм (зв.вел/угл сек^2)
20.06.19 г, 00:14	SAO 01276	9,1^m, G5	$\theta_s = -10{,}8^0$, $\varphi_s = 347{,}4^0$	$57{,}3^0$	1×10^{-4} (17,8)
20.06.19 г, 00:25	PPM 0088081	10^m, F0	$\theta_s = -11{,}1^0$, $\varphi_s = 349{,}9^0$	$93{,}3^0$	$8{,}2\times10^{-5}$ (18)
20.06.19 г, 00:31	TYC 3837-884-1	10,2^m, F0	$\theta_s = -11{,}2^0$, $\varphi_s = 351{,}3^0$	68^0	$1{,}1\times10^{-4}$ (17,7)
20.06.19 г, 22:48	SAO 001276	9,1^m, G5	$\theta_s = -6{,}1^0$, $\varphi_s = 328{,}1^0$	$57{,}4^0$	$2{,}8\times10^{-4}$ (16,7)
20.06.19 г, 22:50	SAO 014385	9,7^m, F2	$\theta_s = -6{,}6^0$, $\varphi_s = 329{,}6^0$	$68{,}7^0$	5.6×10^{-4} (15,9)
20.06.19 г, 22:55	SAO 00023	9,5^m, A0	$\theta_s = -6{,}3^0$, $\varphi_s = 328{,}5^0$	$38{,}3^0$	2.1×10^{-4} (17)



а б

Рис. 6. Зависимость отношения сигнал-шум от блеска звезд в регистрациях 20 июня: а – в период с 00:14 до 00:31 часов; б – с 22:49 до 22:57 часов

Из рис. 6а видно, что для звезд (с блеском от 9.1^m до 10.2^m) зарегистрированных в первый сеанс, отношение сигнал-шум изменялось от 98 до 40 (т. е. в 2,5 раза) для видеокамеры Andor iXon 860 и от 34 до 7 (т. е. в 4,9 раза) для видеокамеры SIM-ICCD. В этом случае отношение сигнал-шум с видеокамеры Andor iXon 860 в 2,9–5,7 раза выше, чем с видеокамеры SIM-ICCD. Немного отличается поведение отношения сигнал-шум во второй сеанс наблюдения. Из рис. 6б видно, что при изменении блеска регистрируемой звезды от 9.1^m до 9.7^m отношение сигнал-шум для видеокамеры Andor iXon 860 слабо менялось от 27 до 24, а для видеокамеры SIM-ICCD изменялось в 2 раза (от 10 до 5).

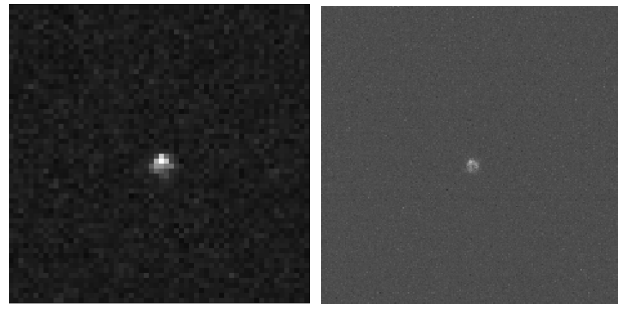
Проведенная регистрация 20 июня 2019 г. в разные периоды времени показала, несколько разное поведение регистрирующих видеокамер. Тем не менее, в среднем отношение сигнал-шум с видеокамеры Andor iXon 860 в 3,5 раза больше чем с видеокамеры SIM-ICCD. Ее применение позволяет повысить проницающую способность визуализации звезд приблизительно на 1,4 звездных величины по сравнению с видеокамерой SIM-ICCD.

Регистрация звезд видеокамерами Andor iXon 860 и Hamamatsu Orca-flash 4.0

Показавшая лучшие результаты видеокамера Andor iXon 860 была испытана в сравнении с видеокамерой Dhyana 400D. В табл. 4 приведены условия регистрации звезд с блеском $9,1^m$–$9,7^m$ на фоне ночного неба. Регистрация проводилась 24 июня 2019 г. в периоды с 22:24 до 22:49 часов местного поясного времени. Во время съемки небо было в легкой дымке, присутствовали высотные перистые облака. Визуально небесная обстановка была более благоприятной, чем при регистрации 20 июня в период с 22:48 до 22:55 часов. Звезды регистрировались при высоте Солнца, изменявшейся в диапазоне от -5^0 до -6^0. Угол элонгации, т. е. угловое расстояние от регистрируемой звезды до Солнца, изменялся от 57^0 до 111^0. В условиях наблюдений яркость неба изменялась в диапазоне от $2,5\times10^{-4}$ до $5,4\times10^{-4}$ Вт/м^2·ср·мкм (от 16,8 до 16 зв.вел/угл.сек^2), т. е. примерно в 2,2 раза.

Сравнение видеокамер Andor iXon 860 и Dhyana 400D происходило по регистрации звезд слабой яркости при времени экспозиции 1 и 40 мс.

На рис. 7 приведены фрагменты снимков звезды SAO 001276 с блеском $9,1^m$ с видеокамеры Andor iXon 860, рис. 7а, и видеокамеры Dhyana 400D, рис. 7б. Фрагмент представлен в угловом поле зрения равном 3×3 угловых минут.



а б

Рис. 7. Фрагменты снимков звезды SAO 001276 при времени экспозиции 40 мс: а – Andor iXon 860; б – Dhyana 400D

Измерение по снимкам показало, что в поперечнике пятна изображения звезды укладывается 5 пикселей на видеокамере Andor iXon 860 и 13 пикселей на видеокамере Dhyana 400D, рис. 7б. Угловой размер изображения звезд по уровню 0,5 от максимальной амплитуды сигнала в пятне изображения для регистрируемых звезд изменялся от 11,7 до 13 угловых секунд на видеокамере Andor iXon 860 и от 8,1 до 9,2 угловых секунд на видеокамере Dhyana 400D. Таким образом, угловой размер зарегистрированных звезд на видеокамере Andor iXon 860 в 1,6 раза (или на 5 угловых секунд) получился выше, чем на видеокамере Dhyana 400D.

На рис. 8 приведены значения отношений сигнал-шум в зависимости от блеска зарегистрированных звезд, снятых при времени экспозиции 1 и 40 мс.

Таблица 4

Условия регистрации звезд с блеском 5^m–$9,9^m$

Дата и время регистрации	Название звезды	Блеск и спектр	Координаты Солнца, град	Угол элонгации, град	Яркость неба, Вт/м^2·ср·мкм (зв.вел/угл сек^2)
20.06.19 г, 22:24	HR 6791	5^m, G5	$\theta_s = -4,1^0$, $\varphi_s = 322,7^0$	$111,4^0$	$3,2\times10^{-4}$ (16,5)
20.06.19 г, 22:28	SAO 030380	$6,5^m$, G0	$\theta_s = -4,5^0$, $\varphi_s = 323,6^0$	$100,3^0$	$5,4\times10^{-4}$ (16)
24.06.19 г, 22:37	SAO 046152	$7,4^m$, G5	$\theta_s = -5,2^0$, $\varphi_s = 325,4^0$	$106,2^0$	$2,5\times10^{-4}$ (16,8)
20.06.19 г, 22:42	SAO 062889	$8,5^m$, G5	$\theta_s = -5,6^0$, $\varphi_s = 326,5^0$	$64,1^0$	$4,1\times10^{-4}$ (16,2)
20.06.19 г, 22:45	SAO 001276	$9,1^m$, G5	$\theta_s = -5,9^0$, $\varphi_s = 327,1^0$	57^0	4×10^{-4} (16,3)
20.06.19 г, 22:49	SAO 082111	$9,9^m$, G2	$\theta_s = -6,1^0$, $\varphi_s = 328^0$	$66,7^0$	$4,2\times10^{-4}$ (16,2)

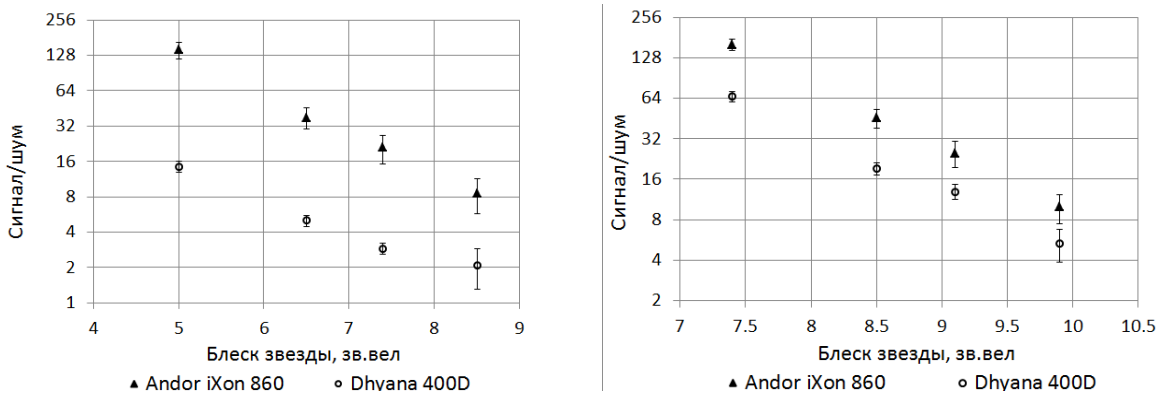


Рис. 8. Зависимость отношения сигнал-шум от блеска звезд снятыхпри разном времени экспозиции: а – 1 мс; б – 40 мс

При регистрации, проведенной с экспозицией 1 мс на обеих видеокамерах, доступными для наблюдения были звезды с блеском от 5 до 8,5 звездной величины. При этом, как видно из рис. 8а отношение сигнал-шум изменялось от 128 до 8 на видеокамере Andor iXon 860 и от 16 до 2 на видеокамере Dhyana 400D. Таким образом, при времени экспозиции 1 мс, отношение сигнал-шум с видеокамеры Andor iXon 860 от 4 до 8 раз больше, чем с видеокамеры Dhyana 400D. При увеличении времени экспозиции до 40 мс доступными для наблюдения были уже более слабые звезды, с блеском до 10 звездной величины. Из рис. 8б видно, что для зарегистрированных звезд с блеском от $7{,}4^m$ до $9{,}9^m$ отношение сигнал-шум изменялось от 160 до 12 (т. е. в 13,3 раза) для видеокамеры Andor iXon 860 и от 64 до 5 (т. е. в 13 раз) для видеокамеры Dhyana 400D. В этом случае, отношение сигнал-шум с видеокамеры Andor iXon 860 до 2,5 раз выше, чем с видеокамеры Dhyana 400D.

Таким образом, сопоставление результатов с этих видеокамер при съемке звезд на фоне ночного неба с временем экспозиции 1 и 40 мс показало, что отношение сигнал – шум с видеокамеры Andor iXon 860 выше, чем с видеокамеры Dhyana 400D в 8 и 2,5 раза, соответственно.

Объединяя результаты испытаний всех трех видеокамер можно уверенно заметить, что наиболее высокое отношение сигнал-шум при наблюдении звезд на ночном небе дает EMCCD видеокамера Andor iXon 860. Второе место в зависимости от сеанса конкретной регистрации может занимать либо видеокамера SIM-ICCD, либо видеокамера Dhyana 400D. Неопределенность в приоритетности двух последних видеокамер пока не понятна и, возможно, связана с непостоянством воздушной атмосферы и облачности.

Заключение

Измеренные светосигнальные характеристики и шумы исследованных видеокамер показали, что наименьшим порогом интегральной чувствительности равным 1,3-1,8 фотонов обладают видеокамеры Andor iXon 860 и SIM-ICCD. При регистрации камерами сигналов выше порога чувствительности наибольший отклик на световое излучение даст камера SIM-ICCD. Однако эта камера будет давать картинки звездного ночного неба с наибольшими шумами. Камера Dhyana 400D обладает наименьшими (до 600 раз) собственными шумами, но и меньшим порогом чувствительности. На основании анализа светосигнальных характеристик и собственных шумов видеокамер, наиболее лучшей в целях ее применения для визуализации звезд на фоне ночного неба является камера Andor iXon 860. Эта камера показала также наиболее высокое отношение сигнал-шум при наблюдении звезд слабой яркости (5^m–10^m) на ночном небе. Другие камеры уступают ей либо по порогу чувствительности, либо из-за более высоких шумов.

Литература

1. Рыхлова Л. В., Бахтигараев Н. С. Новые проблемы околоземной астрономии / Конференция. Околоземная астрономия – 2009 // Сборник трудов. Москва, 2010. С. 15.

2. Масевич А. Г. Проблема загрязнения космоса (космический мусор). М.: Космосинформ, 1993. С. 150.

3. Свиридов К. Н., Белкин Н. Д. Наземная космическая система для контроля космического мусора // Конверсия в машиностроении, 1997. № 3. С. 36.

4. Артемьева Н. А., Баканас Е. С., Барабанов С. И, Витязев А. В., Волков В. А., Глазачев Д. О., Дегтярь В. Г., Емельяненко В. В., Иванов Б. А., Кочетова О. М., Куликова Н. В., Медведев Ю. Д., Нароенков С. А., Немчинов И. В., Печерникова Г. В., Поль В. Г., Попова О. П., Рыхлова Л. В., Светцов В. В., Симонов А. В., Соколов Л. Л., Тимербаев Р. М., Чернетенко Ю. А., Шор В. А., Шувалов В. В., Шустов Б. М. Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра / Под. ред. Шустова Б.М., Рыхловой Л. В. М.: Физматлит, 2013. С. 384.

5. Xingxing W., Jinguo L., Huaide Z., Boyan Z. Research on spaceborne low light detection based on EMCCD and sCMOS // Proc. of SPIE. 2015. Vol. 9674.

6. Коатес К., Фоулер Б., Холст Г. Устранение ограничений при использовании научной КМОП-камеры (sCMOS) // Фотоника. 2016. № 4. С. 102–110.

7. Павлов А. В. Оптико-электронные приборы. М: Энергия, 1974.

8. Digital Camera Fundamentals // www.andor.com.

9. Мартынов Д. Я. Курс практической астрономии. М.: Наука, 1967.

10. Гаранин С. Г., Зыков Л. И., Климов А. Н., Куликов С. М., Смышляев С. П., Степанов В. В. Сюндюков А. Ю. Дневное наблюдение звезд слабой яркости (7^m – 8^m) с равнинной местности. // Оптический журнал. 2017. Т. 84, № 12. С. 30–37.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПРОТОННОГО ПУЧКА В УСКОРЯЮЩИХ СТРУКТУРАХ С ПРОСТРАНСТВЕННО-ОДНОРОДНОЙ КВАДРУПОЛЬНОЙ ФОКУСИРОВКОЙ

А. С. Борисков, Л. Е. Поляков, А. А. Брехова

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В РФЯЦ-ВНИИЭФ ведутся работы по созданию синхротронного комплекса, который состоит из основного синхротрон, бустера и линейных ускорителей, которые используются в качестве инжекторов для бустера. В начальной части линейного ускорителя основной задачей является захват как можно большего числа частиц в режим ускорения. Как известно, для обеспечения высокого коэффициента захвата в режим ускорения необходимо применение систем, эффективных при малой начальной скорости частиц. Именно этим требованиям отвечают ускоряющие структуры с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (ПОКФ, международное название Radio Frequency Quadrupole, RFQ), где частицы группируются и ускоряются от нескольких десятков кэВ до нескольких МэВ и затем инжектируются в основную часть ускорителя.

В работе приведены результаты расчетов динамических параметров протонного пучка резонансного ускорителя протонов в структуре с ПОКФ [1].

Предложенная физико-математическая модель описывает поведение пучка на этапах формирования, транспортировки и ускорения. Ускорительный тракт разделен на 3 части: согласователь, группирователь и ускоряющий участок. Предложенная физико-математическая модель позволяет описывать процесс ускорения протонов в канале ускоряющей структуры с ПОКФ начиная с момента эмиссии и до вывода заряженных частиц в следующую стадию ускорения. В рассмотренной модели рассчитана динамика протонов в электромагнитных полях ускоряющего резонатора. Так же были определены следующие параметры протонного пучка: фазовый портрет, разброс по энергиям, максимальный ток в сгустке и т. д.

Введение

Одна из основных областей применения линейных резонансных укорителей ионов – это использование их в качестве инжекторов ионных синхротронов, которые играют значимую роль в проведении фундаментальных исследований, ядерной медицине, испытании на радиационную стойкость электронно-компонентной базы и т. д.

В начальной части ускорения линейных ускорителей ионов на сегодняшний день чаще всего применяется ускоряющая структура с ПОКФ. Этот тип ускоряющей структуры стал известен и начал широко использоваться с 1970 г., когда Капчинский И. М. и Тепляков В. А. опубликовали статью «Линейный ускоритель ионов с пространственно-однородной жесткой фокусировкой» [2]. В дальнейшем ускоряющие структуры этого типа начали широко внедряться в лабораториях, где имелись в наличии или создавались новые линейные ускорители протонов и тяжелых ионов. Такой успех был вызван неординарными особенностями структуры ПОКФ [3]:

1. Радиальная устойчивость пучка в процессе ускорения поддерживается высокочастотными полями, создающими пространственно-однородный фокусирующий квадрупольный эффект вдоль канала структуры. Поэтому фокусирующая сила не зависит от скорости ионов. Это дает возможность значительно снизить энергию инжекции и соответственно упростить высоковольтное оборудование инжектора.

2. Модуляция полюсов электродов позволяет создать продольное электрическое поле, обеспечивающее одновременное ускорение, группировку и фокусировку пучка, чего нет ни в одном другом типе ускорителей.

3. Закон изменения синхронной фазы и глубины модуляции электродов вдоль ускоряющей структуры позволяет захватить в процесс ускорения сгустки с первоначальной фазовой протяженностью 360° при начальной синхронной фазе –90°.

4. По мере ускорения происходит фазовая группировка при сохранении постоянных геометрических размеров. При этом сохраняется средний ток пучка. Пиковый ток сгустка при начальной энергии близок к среднему, так что максимальное значение среднего тока, несмотря на низкую энергию инжекции, оказывается высоким.

5. Применяемые модификации ускоряющих структур для ПОКФ позволяют значительно увеличить рабочую длину волны, что, в свою очередь, способствует увеличению предельного тока пучка, величина которого пропорциональна квадрату длины волны. Фактор увеличения рабочей длины волны особенно важен при создании линейных ускорителей тяжелых ионов, учитывая, что скорость ионов с большим отношением массового числа к зарядовому сравнительно невелика.

В данной работе рассматривается динамика пучка заряженных частиц. С использованием кода C++ была реализована физико-математическая мо-

дель движения пучка протонов в ускоряющей структуре с ПОКФ. На первом этапе была рассчитана динамика для одночастицной модели. Далее был выполнен расчет с учетом эффекта пространственного заряда.

Принцип работы ускорителя с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой

На рис.1 изображена квадрупольная система фокусирующих электродов однородная вдоль оси ускорителя. Величина $2U_a$ есть амплитудное значение напряжения между смежными электродами. В процессе ускорения частиц к электродам прикладывается высокочастотное напряжение, поэтому частицы последовательно испытывают действие переменных по направлению полей. Это приводит к появлению эффекта квадрупольной фокусировки частиц.

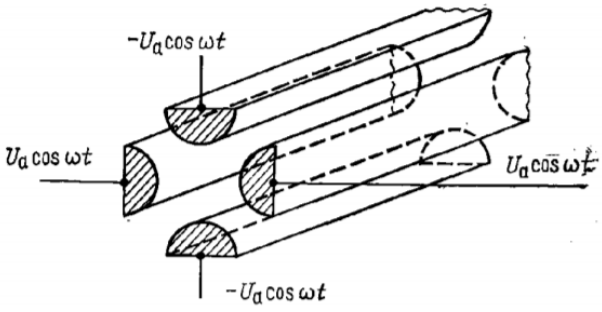


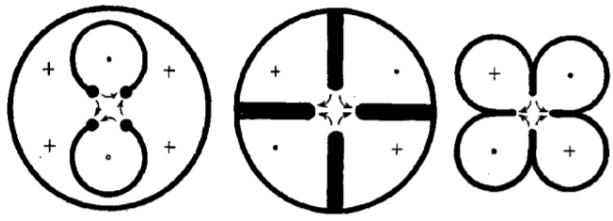
Рис. 1. Четырехпроводная линия с квадрупольной симметрией

Фокусировка пучка ВЧ-линзами тем эффективнее, чем большую часть периода фокусировки занимают электроды с квадрупольной симметрией. В рассматриваемой системе взаимодействие частицы с ВЧ фокусирующим полем происходит непрерывно. Продольная ускоряющая компонента электрического поля создается в том случае, если расстояние между противоположными электродами периодически изменяется. Период изменения расстояния между электродами должен быть равен пути, который частица пролетает за период изменения ВЧ поля $L=\frac{1}{2}\beta\lambda$ (период ускорения).

На рис.2 приведены возможные варианты резонаторов: двойной Н-резонатор (рис. 2а) и два типа четырехкамерного резонатора (4К-резонатор) (рис. 2б и рис. 2в), а также показаны направления продольного магнитного поля и силовые линии электрического поля в области взаимодействия с пучком; сечения соответствуют точной квадрупольной симметрии [1].

Рассмотрим четырехпроводную квадрупольную линию. В квазистационарном приближении потенциал электрического поля в области взаимодействия с пучком имеет вид [4]:

$$U(r,\psi,z,t)=U_0(r,\psi,z)\cos\omega t. \qquad (1)$$



а б в

Рис. 2. Поперечные сечения объемных резонаторов для ускоряющих структур с ПОКФ: а – 2Н-резонатор, б – 4К-резонатор, в – 4К-резонатор (клеверный)

В общем виде распределение потенциала внутри квадрупольного канала ускорителя (в цилиндрической системе координат) может быть записано в виде:

$$U(r,\theta,\varphi,t)=\frac{U}{2}\left\{\sum_l A_{0l}r^{2l}\cos(2l\theta)+\right.$$
$$\left.+\sum_l\sum_n A_{\ln}I_{2n}(lkr)\sin(lkz)\right\}\cos\omega t, \qquad (2)$$

где $l+n=p$, $p=0,1,2...$, U – амплитуда разности потенциалов ВЧ поля между соседними электродами, k – волновое число.

С учетом только низших гармоник ($p=0$, $l=1$) выражение упрощается:

$$U(r,\theta,\varphi,t)=\frac{U}{2}\left\{A_{01}r^2\cos(2\theta)+\right.$$
$$\left.+A_{10}I_0(kr)\sin(kz)\right\}\cos\omega t. \qquad (3)$$

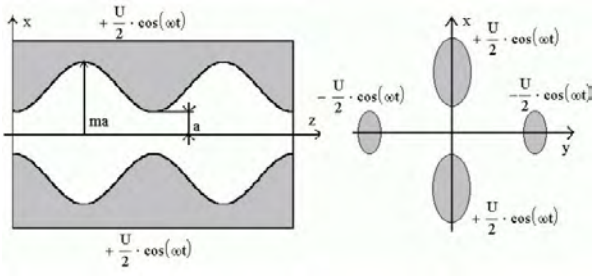
Здесь величины

$$A_{01}=\frac{1}{\alpha^2}\frac{I_0(k\alpha)+I_0(Mk\alpha)}{M^2I_0(k\alpha)+I_0(Mk\alpha)},$$
$$A_{10}=\frac{M^2-1}{M^2I_0(k\alpha)+I_0(Mk\alpha)}. \qquad (4)$$

называются параметрами фокусировки и ускорения соответственно, α – апертура канала, M – параметр модуляции канала ускорителя (отношение максимальной амплитуды канала к минимальной, (рис. 3). В декартовой системе координат выражение для потенциала имеет вид:

$$U(x,y,z,t)=\frac{U}{2}\left\{A_{01}\left(x^2-y^2\right)+\right.$$
$$\left.+A_{10}I_0\left(k\sqrt{x^2+y^2}\right)\sin(kz)\right\}\cos\omega t. \qquad (5)$$

Ускорительный тракт разделен на 3 части: согласователь, группирователь и ускоряющий участок. Эффективная фокусировка, группировка и дальнейшее ускорение заряженного пучка выполняется при условии, что соблюдается оптимальная процедура изменения глубины модуляции электродов (m), а также величины синхронной фазы сгустков (ϕ_s) и апертурного канала (a).



а б

Рис. 3. Сечения канала ускорителя с ПОКФ: а – продольное сечения электродов, б – поперечное сечение электродов

Численное моделирование динамики ионных пучков

С ростом скорости частиц эффективность системы с ПОКФ уменьшается. Поэтому при ускорении протонов или легких ионов системы с ПОКФ используют при энергии не выше 1–3 МэВ, т. е. пучок можно считать нерелятивистским. В этом случае в уравнении движения достаточно учитывать только электрическую компоненту ВЧ поля:

$$\frac{dp}{dt} = e \cdot E(r,t), \tag{6}$$

где e и m – заряд и масса электрона, функция $E(r,t)$ описывает зависимость напряженности ВЧ поля от координат r и времени t, p – импульс частицы. Уравнение, описывающее изменение фазы произвольной частицы в процессе ускорения:

$$\frac{d\varphi}{dt} = \omega\left(\frac{v_z}{v_s} - 1\right), \tag{7}$$

где v_s – скорость синхронной частицы. Исследование динамики пучка заряженных частиц в ускорителях состоит в нахождении значений скоростей и координат всех частиц пучка на любом участке траектории. В линейных ускорителях при моделировании динамики ионного пучка в качестве независимой переменной удобно использовать продольную координату z. Таким образом, для продольного и поперечного движений имеем систему уравнений:

$$\begin{aligned}
\frac{dv_x}{dz} &= \frac{e_x}{m}\frac{E_x}{2v_z}\sin\varphi,\\
\frac{dv_y}{dz} &= \frac{e_y}{m}\frac{E_y}{2v_z}\sin\varphi,\\
\frac{dv_z}{dz} &= \frac{e_z}{m}\frac{E_z}{2v_z}\cos\varphi,\\
\frac{dv_s}{dz} &= \frac{e_s}{m}\frac{E_z}{2v_s}\cos\varphi_s,
\end{aligned} \tag{8}$$

$$\frac{dx}{dz} = \frac{v_x}{v_z}, \quad \frac{dy}{dz} = \frac{v_y}{v_z}, \quad \frac{dt}{dz} = \frac{1}{v_z}, \quad \frac{d\varphi}{dt} = \omega\left(\frac{v_z}{v_s} - 1\right).$$

В дальнейшем при численном моделировании динамики пучков заряженных частиц удобно ввести безразмерные величины продольных и поперечных координат и скоростей и безразмерное время:

$$\rho = \frac{2\pi}{\lambda}x,\ \eta = \frac{2\pi}{\lambda}y,\ \xi = \frac{2\pi}{\lambda}z,\ \beta_{x,y,z} = \frac{v_{x,y,z}}{c},\ \tau = \omega t, \tag{9}$$

где $e_{x,y,z,s} = \dfrac{e\lambda E_{x,y,z,s}}{4\pi mc^2}$ – безразмерные амплитуды поля

Система уравнений (5.14) может быть решена, если известны начальные условия:

$$\begin{gathered}
\beta_{x,i}(z=0),\ \beta_{y,i}(z=0),\ \beta_{z,i}(z=0),\ \beta_s(z=0),\\
x(z=0),\ y(z=0),\ \varphi_i(z=0).
\end{gathered} \tag{10}$$

Расчет динамики пучка частиц

Одночастотная модель

Для пучка, ускоряемого в ПОКФ, система уравнений в безразмерном виде будет выглядеть так [4]:

$$\begin{aligned}
\frac{d\beta_x}{\xi} &= -\frac{\overline{U}}{2\beta_z}\left\{2\overline{A_{01}}\rho + \frac{A_{10}}{\beta_s}I_1\left(\frac{\sqrt{\rho^2+\eta^2}}{\beta_s}\right)\frac{\rho}{\sqrt{\rho^2+\eta^2}}\sin(\varphi+\tau)\right\}\cos(\tau),\\
\frac{d\beta_y}{\xi} &= -\frac{\overline{U}}{2\beta_z}\left\{-2\overline{A_{01}}\eta + \frac{A_{10}}{\beta_s}I_1\left(\frac{\sqrt{\rho^2+\eta^2}}{\beta_s}\right)\frac{\eta}{\sqrt{\rho^2+\eta^2}}\sin(\varphi+\tau)\right\}\cos(\tau),\\
\frac{d\beta_z}{\xi} &= -\frac{\overline{U}A_{10}}{2\beta_z\beta_s}I_0\left(\frac{\sqrt{\rho^2+\eta^2}}{\beta_s}\right)\cos(\varphi+\tau)\cos(\tau),\\
d\rho/d\xi &= \beta_x/\beta_z, \quad d\eta/d\xi = \beta_y/\beta_z, \quad d\tau/d\xi = 1/\beta_z,\\
\frac{d\beta_s}{\xi} &= -\frac{\overline{U}A_{10}}{2\beta_s{}^2}I_0\left(\frac{\sqrt{\rho^2+\eta^2}}{\beta_s}\right)\cos\varphi_s, \quad \frac{d\varphi}{d\xi} = \frac{1}{\beta_s} - \frac{1}{\beta_z},
\end{aligned} \tag{11}$$

где $\overline{U} = \dfrac{eU}{W_0}$, $\overline{A_{01}} = A_{01}\dfrac{4\pi^2}{\lambda^2}$.

Для расчета динамики пучка протонов была написана программа на языке C++ для численного решения системы уравнений (11) методом Рунге–Кутта 4-го порядка. На первом этапе, для упрощения расчетов, был рассмотрен одночастичный случай. Для верификации расчетов было проведено сравнение с данными статьи [6]. В качестве исходных параметров были взяты законы изменения параметра модуляции, синхронной фазы и радиуса апертуры (рис. 4, 5, 6). Длина ускорителя 2,4 метра, начальная энергия протона 47 кэВ, частота ВЧ поля 162 МГц.

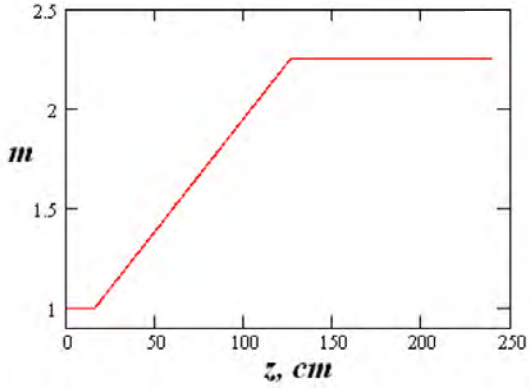


Рис. 4. Изменение параметра модуляции (m) вдоль канала ускорителя

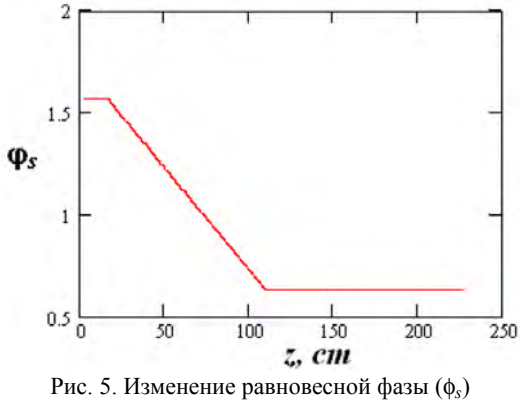


Рис. 5. Изменение равновесной фазы (ϕ_s) вдоль канала ускорителя

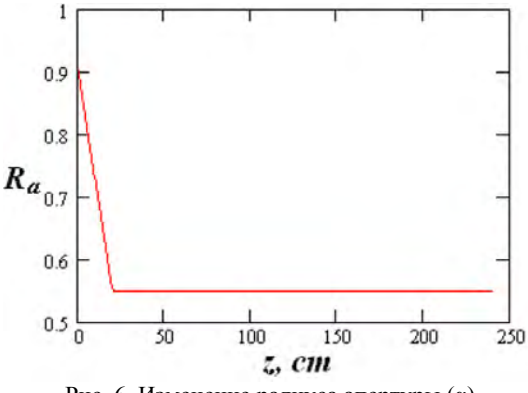


Рис. 6. Изменение радиуса апертуры (α) вдоль канала ускорителя

В результате проведения расчетов была рассчитана относительная скорость протона в процессе ускорения, а также проведено сравнение с исходными данными, приведенными в [6], путем наложения двух графиков. Результат сравнения представлен на рис. 7.

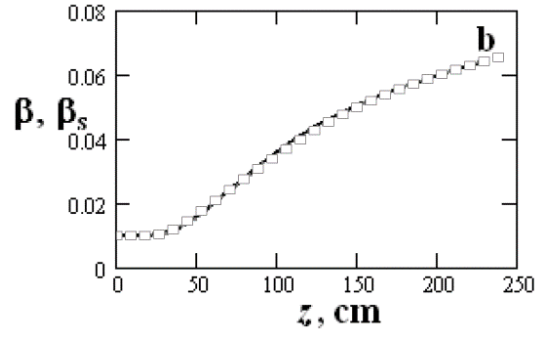


Рис. 7. Сравнение зависимости β_z и β_s от z: данные из [6] – черная линия, рассчитанные значения – белые квадраты

Расчет фазового портрета пучка

Для нахождения коэффициента захвата частиц и проверки условия группировки пучка в процессе ускорения был проведен расчет фазового портрета пучка. Для этого последовательно рассчитывалась динамика частиц со сдвигом начальной фазы инжекции на каждом шагу. Всего была рассчитана динамика 200 частиц с фазами инжекции начиная от $\frac{3}{2}\pi$ до $-\frac{7}{2}\pi$. Далее на каждой из четвертей длины ускорителя строится зависимость относительной скорости частицы от ее фазы на данном этапе ускорения. Результаты расчетов представлены на рис. 8.

По результатам расчетов в процесс ускорения захватываются 97 % частиц, что согласуется с данными, приведенными в источнике [6]. Также из рисунка видно, что фазовая протяженность пучка сжимается по мере ускорения, из чего можно сделать вывод о наличии эффекта группировка.

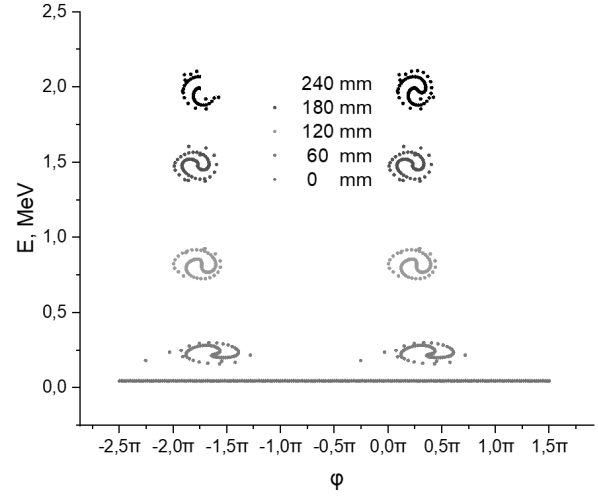


Рис. 8. Фазовый портрет пучка в процессе ускорения

Метод крупных частиц и моделирование объемного заряда

Следующим этапом было моделирование динамики пучка протонов с учетом сил объемного заряда в нем. Пучок представляется в виде набора сгустков, расположенных на оси структуры. Каждый сгусток представляется N равномерно заряженными шарами радиуса R (крупные частицы). Сила, действующая на i-ую частицу со стороны j-ой, рассчитывается по формуле [5]:

$$F_{ij} = \begin{cases} \dfrac{q^2}{4\pi\xi_0 (2R)^2}\left(\dfrac{2R}{r_{ij}}\right)^3 \dfrac{r_{ij}}{2R} & r_{ij} \geq 2R \\ \dfrac{q^2}{4\pi\xi_0 (2R)^2}\left[2\left(\dfrac{2R}{r_{ij}}\right)^3 - 9\left(\dfrac{2R}{r_{ij}}\right) + 8\right]\dfrac{r_{ij}}{2R} & 0 \leq r_{ij} < 2R \end{cases} \quad (12)$$

Таким образом, суммируя силы для каждой частицы, получаем влияние на нее остальных частиц сгустка

$$F_i = \sum_{ij}^{N} F_{ij}. \quad (13)$$

На начальном этапе был смоделирован цилиндр в начале ускорительного тракта, который равномерно был разбит на фиксированное количество ячеек. Внутри каждой ячейки были случайно выбраны координаты x, y, z, которые являлись узлами трехмерной сетки, в которой располагались рассматриваемые крупные частицы. Для модели было задано 2000 крупных частиц. Трехмерная модель исходного пучка представлена на рис. 9.

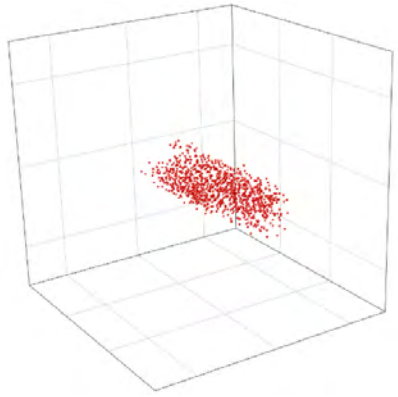


Рис. 9. Трехмерная модель пучка

После заполнения цилиндра для каждой частицы были созданы массивы начальных условий. Для всех частиц была установлена начальная энергия 47 кэВ.

Моделирование динамики пучка подразумевает на каждом шаге интегрирования расчет воздействия на каждую частицу сил со стороны ВЧ поля, а также остальных частиц. Суммируя данные силы по каждой из осей получаем действие результирующей силы.

Таким образом, была рассчитана динамика вдоль всего ускорительного тракта. На рис. 10 приведено сравнение поперечных сечений пучка в начале и конце ускорения. Визуально можно заметить результат действия фокусирующих сил – очевидно, что плотность черных точек в центре превышает плотность белых квадратов.

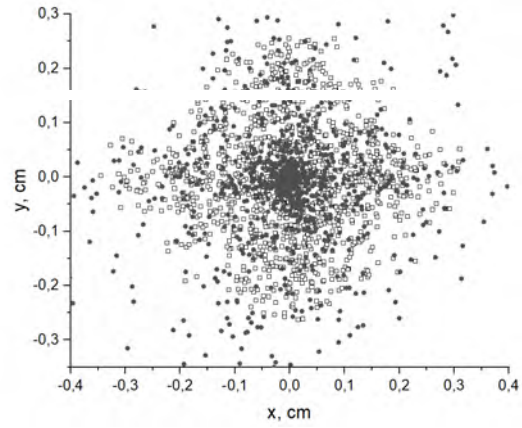


Рис. 10. Поперечное сечение пучка протонов: в начале ускорения – белые квадраты, в конце ускорения – черные точки

На рис. 11 изображено продольное сечение пучка в канале ускорителя. Форма канала была построена по формуле (13) [1]:

$$x = R_0\left[1 + \frac{m-1}{m+1}\sin kz\right], \quad y = R_0\left[1 - \frac{m-1}{m+1}\sin kz\right]. \quad (14)$$

Из рис. 11 видно, пучок разбился на два сгустка, следующих друг за другом на расстоянии, равном периоду структуры, из чего можно сделать предположение о корректном расчете динамики пучка на этапе его группировки.

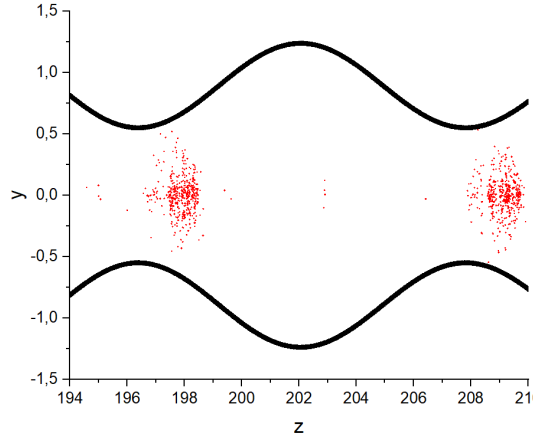


Рис. 11. Продольное сечение пучка в канале ускорителя

Заключение

В работе представлены результаты численных расчетов динамика пучка протонов в канале ускорителя с ПОКФ. На первом этапе был проведен расчет для одночастичной модели. Полученные значения β_z и β_s были сравнены со значениями, представленными

в материале статьи [6]. В результате сравнения между ними установлено удовлетворительное соответствие, что говорит о корректности выбранной расчетной модели.

Также был рассчитан фазовый портрет пучка на разных этапах ускорения. По результатам расчетов видно, что происходит уменьшение фазовой протяженности протонного пучка с ростом энергии, что свидетельствует о его группировке в процессе ускорения.

Далее был смоделирован пучок протонов, состоящий из 2000 крупных частиц, рассчитана динамика для такого пучка с учетом действия сил объемного заряда. Из проведенных расчетов по предложенной модели можно сделать вывод о том, что при данном количестве крупных частиц учетом вклада сил объемного заряда можно пренебречь.

Литература

1. Капчинский И. М. Теория линейных резонансных ускорителей: Динамика частиц. М.: Энергоиздат, 1982. С. 130–144.

2. Тепляков В. А., Мальцев А. П. Степанов В. Б. Высокочастотная квадрупольная фокусировка (к истории ее возникновения и развития): Препринт ИФВЭ 2006-5. Протвино, 2006.С. 34.

3. Bomko V. A., Zaitsev B. V, Ivachno E. V. at al. Accelerating Structure with Radio-Frequency Quadrupole, RFQ, for the heavy-ions accelerating // Problems of atomic science and technology. Series: Nuclear Physics Investigations. 2010. № 3. P. 26–30.

4. Масунов Э. С., Полозов С. М. Практикум по курсу «Электрофизические установки и технологии» Ч. 1. Линейные ускорители. Учебное пособие. М.: МИФИ, 2004. С. 42–53.

5. Овсянников Д. А., Свистунов Ю. А. Моделирование и оптимизация пучков заряженных частиц в ускорителях. СПб.: Науч.-исслед. ин-т прикл. химии, 2003. С. 104.

6. Aksentyev A. Y., Polozov S. M. et al. Beam dynamics and accelerating cavity electrodynamics' simulation of CW 2 MeV proton RFQ // Proceeding of 5th International Particle Accelerator Conference «IPAC-2014». 2014. P. 3286–3288.

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЗОНАТОРА ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ПРОТОНОВ С ПРОСТРАНСТВЕННО-ОДНОРОДНОЙ КВАДРУПОЛЬНОЙ ФОКУСИРОВКЙ НА ЭНЕРГИЮ ДО 2 МЭВ

А. А. Брехова, Л. Е. Поляков

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Линейный резонансный ускоритель с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (ПОКФ, международное название Radio Frequency Quadrupole, RFQ) был предложен Тепляковым В. А. в 1960-х годах [1, 2].

Такие ускоряющие структуры находят свое применение в качестве начальных частей ускорения в системах инжекции ионных пучков для циклических ускорителей (например, синхротронов) на высокие энергии [3]. Поскольку скорость ионов значительно меньше скорости электронов для эффективного захвата в ускорение необходимо применение систем, эффективных при малой фазовой скорости волны, таких, как ускоряющие структуры с ПОКФ, где частицы группируются и ускоряются от нескольких десятков кэВ до 2–3 МэВ и затем инжектируются в основную часть ускорителя.

Качество пучка, получаемое на выходе циклического ускорителя, во многом определяется параметрами линейного ускорителя с ПОКФ. Поэтому определение и расчет электродинамических характеристик (ЭДХ) резонатора линейного ускорителя с ПОКФ является одной из важных задач при создании синхротронных ускорительных комплексов.

В данной работе рассмотрено два основных типа ускоряющих резонаторов с ПОКФ: четырехкамерный резонатор (4К-резонатор) и двойной Н-резонатор (2Н-резонатор). Обычно 2Н-резонатор имеет бóльшие размеры, и, как следствие, бóльшую мощность электромагнитных потерь, по сравнению с 4К-резонатором. Однако при этом он имеет значительно лучшее разделение частот рабочей (квадрупольной) и паразитной (дипольной) моды электромагнитных колебаний, чем 4К-резонатор. Также не последнюю роль в выборе ускоряющей структуры играют технологические особенности каждого резонатора. В связи с этим следует учесть относительно меньшие габариты 4К-резонатора.

Учитывая выше сказанное, выбор типа ускоряющей структуры, оптимизация ее геометрии и ЭДХ являются очень важной и сложной задачей, и, чаще всего, носят компромиссный характер.

Определение геометрических параметров, собственной частоты и добротности резонаторов

Начальным этапом при разработке любого резонансного ускорителя всегда является выбор рабочей частоты, которая в свою очередь определяется выбором источника питания, массогабаритными размерами ускорителя и оценочными расчетами динамики пучка заряженных частиц.

Рабочие частоты мощных ламповых источников питания, имеющихся на российском рынке, лежит в диапазоне от 100 до 200 МГц. Учитывая это, были проведены оценочные расчеты динамики пучка ускорителя протонов. Рабочая частота резонатора составила 162 МГц. Исходя из предварительно сделанных аналитических оценок, для достижения требуемых темпа ускорения и выходной энергии протонов, в создаваемой модели необходимо обеспечить разность потенциалов между электродами в 120 кВ на всем протяжении ускоряющей структуры. В табл. 1 представлены основные проектные параметры ускоряющей структуры с ПОКФ.

Таблица 1

Основные параметры ускоряющей структуры

Тип ускоряемых частиц	p+
Входная энергия	47 кэВ
Выходная энергия	2,15 МэВ
Рабочая частота	162 МГц
Амплитуда напряжения между электродами	120 кВ
Длина ускоряющей структуры	2400 мм
Диаметр апертуры канала	5,5 ÷ 9мм
Число периодов	76

Исходя из начальных данных, в программе трехмерного электродинамического моделирования были созданы объемные модели 2Н- и 4К-резонаторов (рис. 1 и 2).

Структура 2Н-резонатора состоит из контейнера с торцевыми стенками, двух резонирующих камер, срезанных в центре модели, где установлены электроды, а в структуре 4К-резонатора вместо камер установлены четыре лопасти, на концах которых установлены электроды.

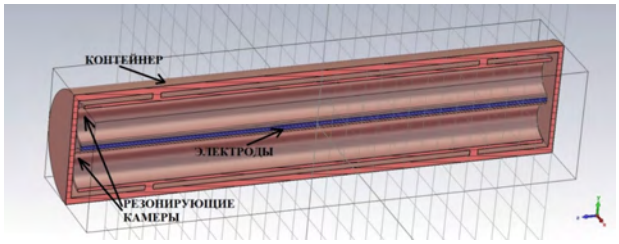


Рис. 1. Трехмерная модель 2Н-резонатора ускорителя с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой в разрезе

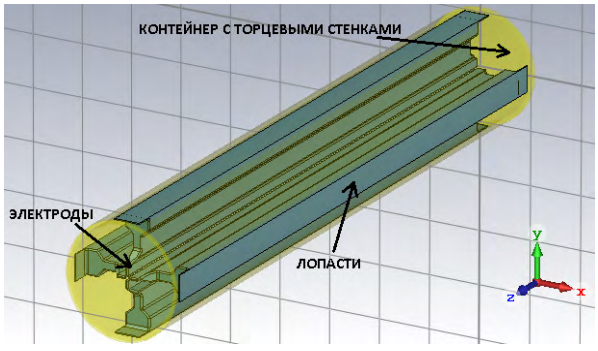


Рис. 2. Трехмерная модель 4К-резонатора ускорителя с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой

Электрические и магнитные компоненты поля в этих структурах сильно разделены. Электрическое поле сосредоточено в приосевой области, а магнитное поле находится в камерах.

В табл. 2 представлены основные геометрические параметры 2Н-резонатора, а в табл. 3 4К-резонатора. Для обоих резонаторов одинаковыми параметрами были длина электродов и диаметр апертуры. Отметим, что длина резонатора практически не оказывает влияние на величину его собственной частоты. Поэтому она подбиралась исходя из планируемой выходной энергии протонов, которая при данной длине ориентировочно должна составлять 2 МэВ.

Таблица 2

Основные геометрические параметры 2Н-резонатора

Параметр	Величина, мм
Длина контейнера	2460
Длина резонирующих камер	2400
Внутренний диаметр контейнера	264
Внешний диаметр резонирующих камер	160
Толщина стенок контейнера	23
Толщина стенок резонирующих камер	12
Расстояние между торцевой стенкой контейнера и резонирующими камерами	10
Радиус апертуры канала пучка	5,5
Толщина электродов	10

Таблица 3

Основные геометрические параметры 4К-резонатора

Параметр	Величина, мм
Длина контейнера	2460
Длина электродов	2400
Внутренний диаметр контейнера	200
Толщина стенок контейнера	15
Толщина торцевых стенок контейнера	15
Расстояние между торцевой стенкой контейнера и электродами	10
Радиус апертуры канала пучка	5,5
Толщина электродов	10

Расчеты проведены с использованием программы трехмерного электродинамического моделирования. В процессе расчетов проводится решение краевых задач с заданными граничными условиями по отысканию резонансных частот, соответствующих устанавливающимся в резонаторе собственным электромагнитным колебаниям.

Разбиение рассматриваемых расчетных моделей производилось тетраэдральной сеткой. Количество ячеек сетки составило 419776 для 2Н-резанатора и 494955 для 4К-резонатора. В качестве материала резонатора использовался материал PEC с проводимостью $\sigma = 5{,}8 \cdot 10^7$ 1/Ом·м.

В табл. 4 и 5 представлены результаты расчетов собственной частоты и добротности двух резонаторов для различных типов колебаний.

Таблица 4

Результаты расчетов собственных частот и добротностей 2Н-резонатора

Тип колебаний	Частота, МГц	Добротность
H_{111}	137,6	2536
H_{011}	162,0	14640
H_{112}	176,7	2354

Таблица 5

Результаты расчетов собственных частот и добротностей 4К-резонатора

Тип колебаний	Частота, МГц	Добротность
H_{210}	162,0	13816,6
H_{110}	159,9	13473,7

Для 2Н-резонатора интересующий нас тип колебаний H_{011} находится на частоте 162,0 МГц. При этом собственная добротность резонатора составляет 14640. Из табл. 4 видно, что ближайшие по частоте типы колебания H_{111} и H_{112} находятся на частотах 137,6 и 176,7 МГц, соответственно.

Для 4К-резонатора нужный тип колебаний H_{210} для данного резонатора находится на частоте 162,0 МГц. При этом собственная добротность резонатора составляет 13816,6. Два ближайших по частоте типа колебаний находятся на частоте 159,9 МГц. Данные моды являются дипольными (H_{110}) и отличаются углом поляризации электрического поля в 90º.

Расчет квадрупольного распределения напряженности электрического поля в структуре 2Н-резонатора и 4К-резонаторов

Конфигурация резонаторов подбирается таким образом, что на рабочих типах колебаний для обоих резонаторов (H_{011} и H_{210}) силовые линии электрического поля имеют квадрупольное распределение, которое дает фокусирующий эффект.

На рис. 3 представлена характерная картина квадрупольного распределения силовых линий электрического поля в поперечной плоскости резонаторов при фазе ВЧ поля φ = 0.

Из рис. 3 видно, что при фазе ВЧ поля φ = 0º наблюдается фокусирующий (для протонов) эффект.

На рис. 4 и 5 показаны расчетные зависимости нормированных величин поперечной компоненты напряженности электрического поля от соответствующей поперечной координаты в 2Н и 4К резонаторах, соответственно.

Из рис. 4 и рис. 5 видно, что распределение напряженности электрического поля в двух разных резонаторах имеет одинаковый вид.

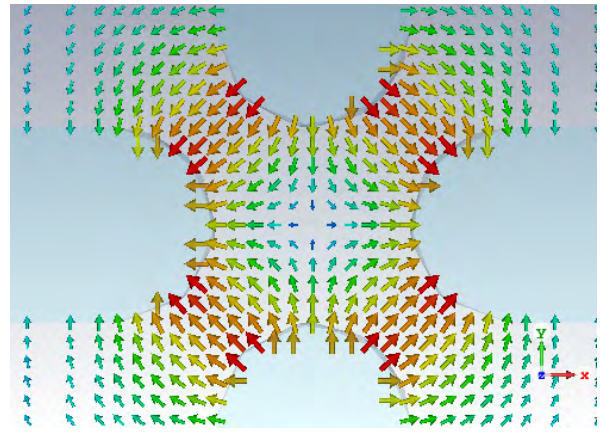
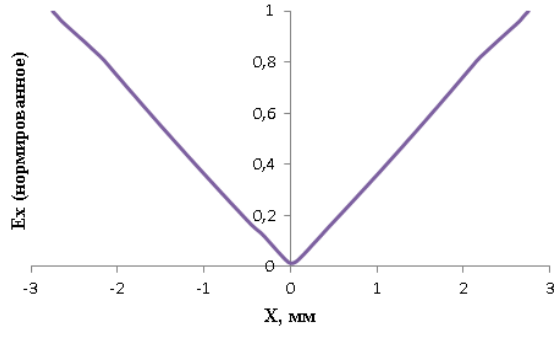
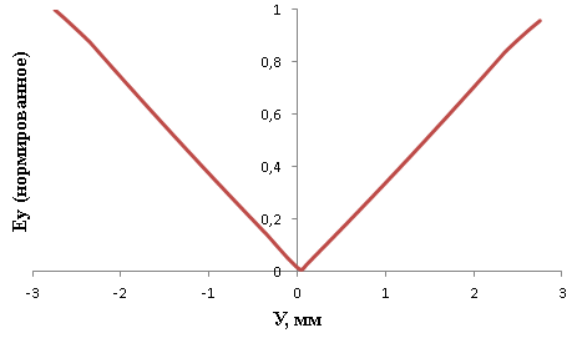


Рис. 3. Квадрупольное распределение силовых линий электрического поля в поперечной плоскости φ = 0º

Полученные зависимости подтверждают квадрупольный характер электрических сил, действующих в межэлектродном зазоре. Видно, что фокусирующая величина напряженности электрического поля линейно растет с увеличением расстояния от центральной оси модели.

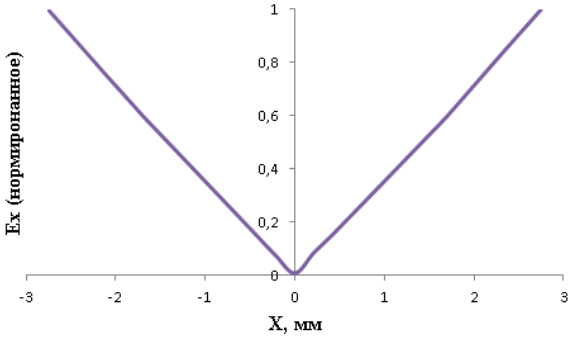


а

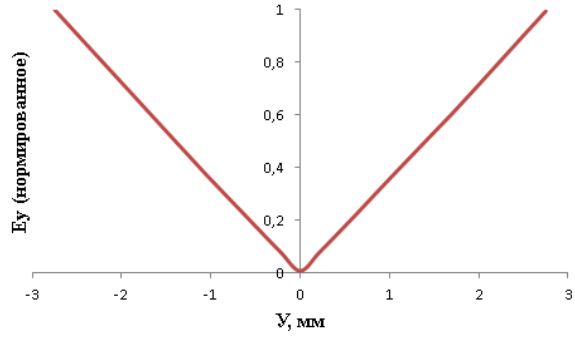


б

Рис. 4. Зависимость нормированной величины напряженности поперечной компоненты электрического поля от координат для 2Н-резонатора: а – распределение электрического поля по оси *x*, б – распределение электрического поля по оси *y*



а



б

Рис. 5. Зависимость нормированной величины напряженности поперечной компоненты электрического поля от координат для 4К-резонатора: а – распределение электрического поля по оси *x*, б – распределение электрического поля по оси *y*

Оптимизация геометрии 4К-резонатора

При близких значениях добротностей двух рассматриваемых типов резонаторов 4К-резонатор обладает меньшими габаритами и, как следствие, меньшей требуемой мощностью ВЧ питания при прочих одинаковых параметрах. Учитывая выше сказанное, а также большую распространенность такого типа резонатора с ПОКФ, наличие опыта разработки и изготовления на отечественных предприятиях за последние годы 4К-резонаторов [4], для дальнейшей оптимизации и проработки геометрии выбран четырехкамерный резонатор.

Для того чтобы получить отвечающий заданным параметрам режим работы ускорителя был проведен анализ влияния длины приторцевых областей на постоянство напряженности электрического поля вдоль оси резонатора. Эта характеристика, по сути, определяет стабильность процесса ускорения и фокусировки пучка. Напряженность электрического поля должна иметь максимальное и постоянное значение вдоль оси резонатора в пределах электродов и минимальное значение магнитного поля [5].

Магнитное поле в режиме H_{210} чередуется в смежных квадрантах. На концах магнитное поле огибает лопасти. Емкость образуется в пространстве между торцом и концом лопасти (рис. 6), а индуктивность – на поверхности срезанных лопастей. Для согласования собственной частоты LC-контура в приторцевой области (рис. 7) с частотой высокочастотного поля в резонаторе необходимо подобрать оптимальную геометрию лопастей в этой области для равномерного распределения электрического поля вдоль оси структуры.

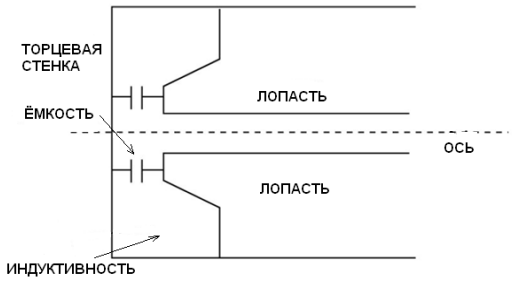
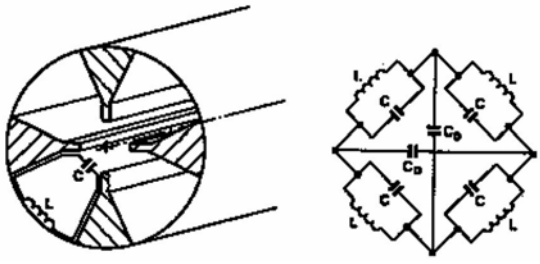


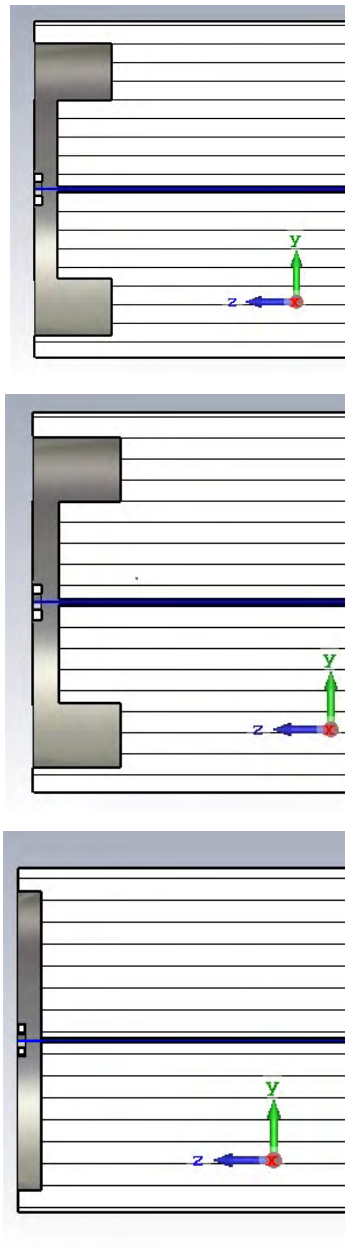
Рис. 6. Профиль приторцевой области 4К-резонатора



а б

Рис. 7. Эквивалентные схемы приторцевой области 4К-резонатора: а – сечение четырехкамерного резонатора, б – эквивалентная схема LC-контуров в четырехкамерном резонаторе

На рис. 8 представлены расчетные модели. Для анализа взяты три модели с длинами приторцевых областей: 0 мм (рис. 8а), 70 мм (рис. 8б) и 100 мм (рис. 8в).



а

б

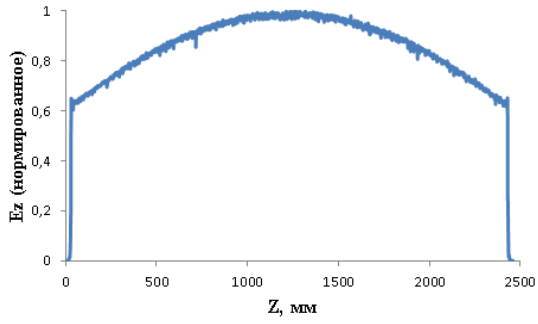
в

Рис. 8. Длина приторцевой области:
а – 0 мм, б – 70 мм, в – 100 мм

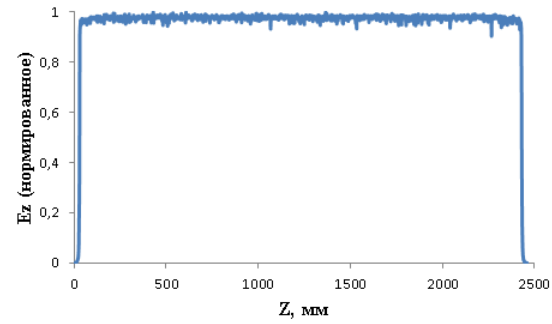
На рис. 9 представлены нормированные распределения напряженностей электрического поля вдоль оси z у различных моделей.

В модели с длиной приторцевой области 70 мм (рис. 9б) наблюдается наиболее равномерное распределение напряженности электрического поля вдоль оси резонатора. Отклонение составило 2,4 %.

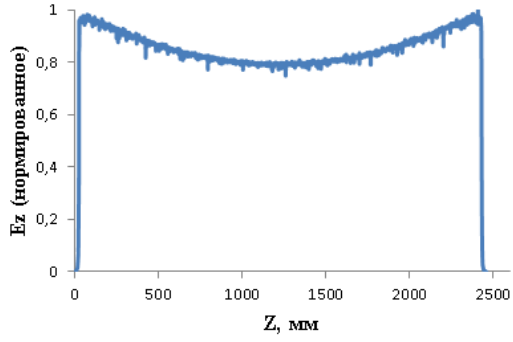
Также проведен анализ влияния длины приторцевых областей на распределение магнитного поля вдоль оси резонатора (рис. 10).



а

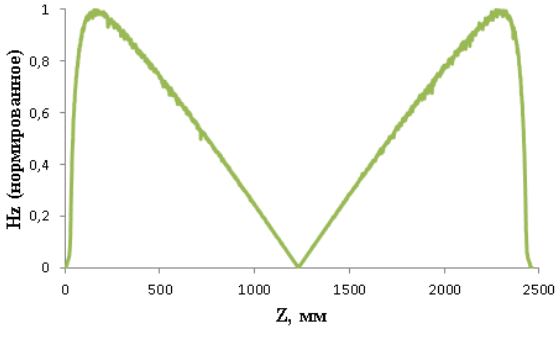


б

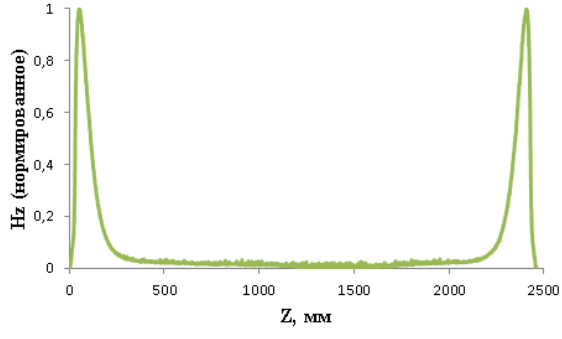


в

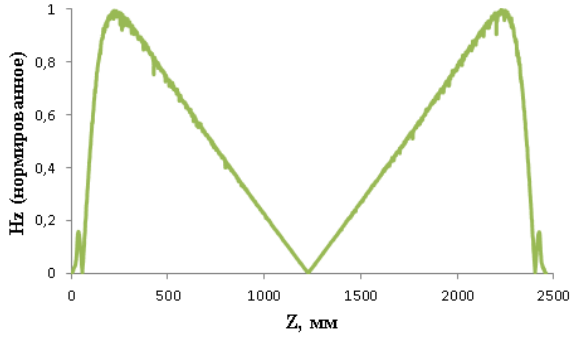
Рис. 9. Нормированные распределения напряженностей электрического поля вдоль оси z в различных моделях: а – длина приторцевой области 0 мм, б – длина приторцевой области 70 мм, в – длина приторцевой области 100 мм



а



б



в

Рис. 10. Нормированные распределения напряженностей магнитного поля вдоль оси z в различных моделях: а – длина приторцевой области 0 мм, б – длина приторцевой области 70 мм, в – длина приторцевой области 100 мм

Из рис. 10б видно, что в модели с приторцевой областью 70 мм магнитное поле минимально вдоль оси z в пределах электродов.

Проведенный анализ различных геометрий приторцевых областей 4К-резонатора показывает, что длина приторцевого зазора в 70 мм обеспечивает оптимальное распределение электрического поля и минимум магнитного поля в межэлектродном зазоре, что отвечает расчетным требованиям динамики протонов на всей длине структуры.

Для оптимизированной модели была рассчитана мощность тепловых потерь в стенках резонатора и поперечное шунтовое сопротивление при условии, что разность потенциалов между электродами составляет 120 кВ. Таким образом, финальные расчетные электродинамические характеристики 4К-резонатора представлены в табл. 6.

Таблица 6

Расчетные электродинамические характеристики 4К-резонатора

Параметр	Значение
Рабочая частота	162 МГц
Частота дипольной моды	157,7 МГц
Амплитуда напряжения между электродами	120 кВ
Собственная добротность	15172
Мощность тепловых потерь	142,5 кВт
Поперечное шунтовое сопротивление	100,8 кОм
Амплитудное значение напряженности электрического поля	22,3 МВ/м

Заключение

В работе рассмотрены два основных типа резонаторов для линейного протонного ускорителя с ПОКФ (2Н-резонатор и 4К-резонатор). Построены их объемные модели, рассчитанные на рабочую частоту 162 МГц. Рассчитаны их собственные добротности. Получен вид поперечных компонент напряженности электрического поля, который подтвердил квадрупольный характер электрических сил в межэлектродном зазоре для обоих резонаторов.

Для дальнейшей оптимизации модели был выбран 4К-резонатор, так как он обладает меньшими габаритами при относительно тех же электродинамических характеристиках по сравнению с 2Н-резонатором. Проведен анализ влияния длин приторцевых областей на электрическое и магнитное распределения поля для 4К-резонатора, в результате которого наиболее оптимальный вид эти зависимости имели в модели с длиной приторцевой области 70 мм. В этой модели напряженность вдоль оси *z* максимальна и постоянна в пределах электродов, а магнитная составляющая минимальна.

Также для полученной модели 4К-резонатора рассчитаны мощность тепловых потерь в стенках резонатора, собственная добротность, поперечное шунтовое сопротивление резонатора и амплитудное значение напряженности электрического поля.

Полученные в результате электродинамических расчетов характеристики резонатора удовлетворяют расчетным требованиям по динамике частиц в ускорителе и определяют исходные данные для проектирования системы ВЧ питания.

Литература

1. Капчинский И. М. Теория линейных резонансных ускорителей: Динамика частиц. М.: Энергоиздат, 1982. С. 130–144.

2. Тепляков В. А., Мальцев А. П. Степанов В. Б. Высокочастотная квадрупольная фокусировка (к истории ее возникновения и развития): Препринт ИФВЭ 2006-5. Протвино, 2006. С. 34.

3. Лебедев А. Н., Шальнов А. В. Основы физики и техники ускорителей: Учеб. Пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1991. С. 528.

4. Koshelev V., Kropachev G., Kulevoy T. et al. Design of 4-vane RFQ with magnetic coupling windows for Nuclotron injector LU-20// Proceeding of LINAC-2016. 2017. P. 575–577.

5. Polozov S., Barth W. et al. Beam dynamics study and electrodynamics simulations for the CW RFQ // Proceeding of IPAC-2017. 2017. P. 1333–1336.

6. Mustapha B., Kutsaev S. V., Ostroumov P. N. RF design optimization of 176 MHz CW RFQ // Proceeding of PAC-2013. 2013. P. 990–992.

СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СВЕТОВЫХОДА СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ: РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА С ИСТОЧНИКОМ ГАММА-КВАНТОВ

И. С. Вершинин, В. В. Кулик, В. В. Гаганов, А. В. Долгополов, В. С. Теменков

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Детекторы на основе органических сцинтилляторов являются эффективным измерительным инструментом во многих современных экспериментах [1-3]. Они характеризуются коротким временем высвечивания, высокой радиационной стойкостью, отсутствием значимых ограничений на размеры сцинтиллятора, надежностью в эксплуатации. Световыход сцинтиллятора является одной из важнейших его характеристик. Однако в настоящее время нет исчерпывающих данных о зависимости световыхода органических сцинтилляторов от энергии регистрируемых частиц. Целью данной работы являлось создание стенда для исследования зависимости световыхода органического сцинтиллятора на основе полистирола от энергии электронов и протонов. На первом этапе работы был разработан и отлажен в ходе экспериментов с радиоизотопным источником гамма-излучения ^{60}Co измерительный стенд на основе схемы совпадений.

Постановка измерений

Основу измерительного стенда составляет схема комптоновских совпадений с двумя сцинтилляционными детекторами [4–9] (рис. 1). Один из детекторов (анализирующий) размещался на оси пучка первичного излучения; второй (управляющий) размещался так, чтобы прямая, соединяющая центры двух сцинтилляторов, составляла заданный угол по отношению к направлению пучка первичного излучения. Анализирующий детектор регистрирует электроны отдачи, образованные в результате взаимодействия проходящего через него пучка гамма-квантов. Управляющий детектор регистрирует гамма-кванты, рассеянные в сцинтилляторе (1) под заданным углом. Образование световой вспышки в управляющем и анализирующем детекторах происходит практически одновременно. С помощью схемы совпадений отбираются импульсы, соответствующие только тем электронам отдачи, которые образуются в сцинтилляторе анализирующего детектора в результате рассеяния первичных гамма-квантов под заданным углом. Энергия электронов отдачи при фиксированной энергии первичных гамма-квантов зависит от выбранного угла рассеяния. Рассматриваемая схема, в отличие от усовершенствованной схемы комптоновских совпадений [10–13], не накладывает ограничений на форму и размеры исследуемого сцинтиллятора и на конструкцию детектора.

В экспериментах были задействованы два детектора с фотоэлектронным умножителем (ФЭУ) СНФТ-3 [14] и полистирольным сцинтиллятором цилиндрической формы диаметром 9,0 см и высотой 10,0 см.

Для улучшения светосбора, обращенная к ФЭУ часть сцинтиллятора была выполнена в виде усеченного конуса высотой 1,5 см; все поверхности сцинтиллятора, кроме торцевого окна диаметром 6,0 см, были покрыты светоотражающей краской. Для обеспечения оптического контакта между торцевым окном сцинтиллятора и входным окном ФЭУ (диаметром 5,5 см) область контакта была заполнена кремний-органической смазкой. Высокое напряжение для питания ФЭУ СНФТ-3 составляло –4 кВ.

На первом этапе работ были выполнены эксперименты с радиоизотопным источником ^{60}Co (4) с активностью $9{,}61 \cdot 10^7$ Бк на момент измерений. Измерения были выполнены для семи значений угла рассеяния в диапазоне от 15^o до 150^o. Расстояние между детекторами составляло 61,0 см, кроме измерений под углами 15^o и 30^o, для которых расстояние составляло 126,5 см. Использование коллиматора предотвращает попадание прямых, не испытавших рассеяние частиц в управляющий детектор.

На рис. 2 показана схема соединений измерительного оборудования. Сигнал с анализирующего детектора "A" подавался через предусилитель с задержкой 100 нс (кабель 20 м) на вход усилителя, далее с выхода "CRM" направлялся на входы "STOP" время-амплитудных преобразователей 1 и 2. При измерениях под углами 30^o и 15^o значение "Coarse Gain" усилителя было увеличено с 20 до 50 и 100 соответственно. Сигнал с управляющего детектора "C" подавался на входы "START" тех же время-амплитудных преобразователей.

Преобразователь 1 на выходе "SCA" формировал управляющий сигнал, подаваемый на вход "GATE" анализатора рабочего временного окна "E", аналогично преобразователь 2 – с выхода "SCA" – на вход "GATE" анализатора фонового окна "F". На входы обоих анализаторов сигнал подавался с выхода "BIPOLAR" усилителя.

Для контроля распределения импульсов по времени пролета использовался анализатор "T", на который подавались сигналы с выхода "TAC" преобразователя 2. Ширина канала анализатора "T" соответствовала 1 нс. Управление временным анализатором (по входу "GATE") осуществлялось с выходов "SCA" обоих время-амплитудных преобразователей.

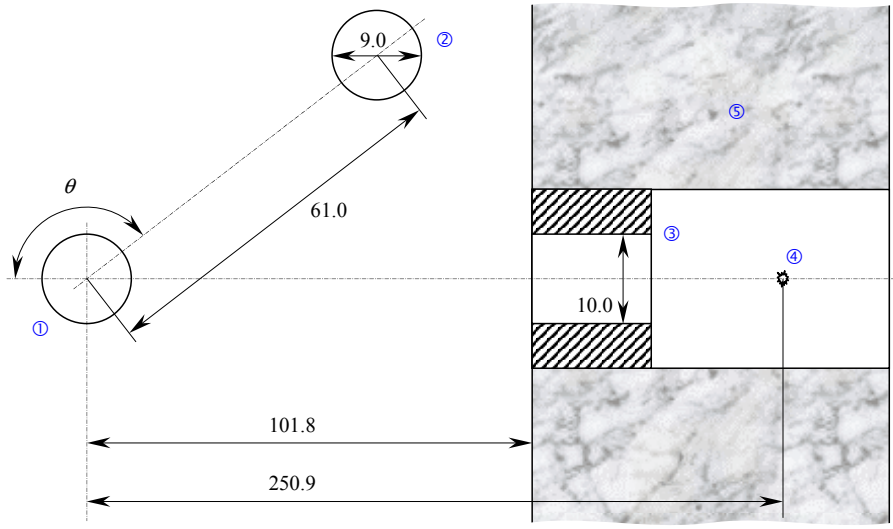


Рис. 1. Схема размещения детекторов: 1 – анализирующий детектор; 2 – управляющий детектор; 3 – стальной коллиматор с отверстием диаметром 10.0 см; 4 – радиоизотопный источник ^{60}Co; 5 – бетонная стена с каналом вывода излучения. Вид сверху без соблюдения масштаба. Размеры – в см

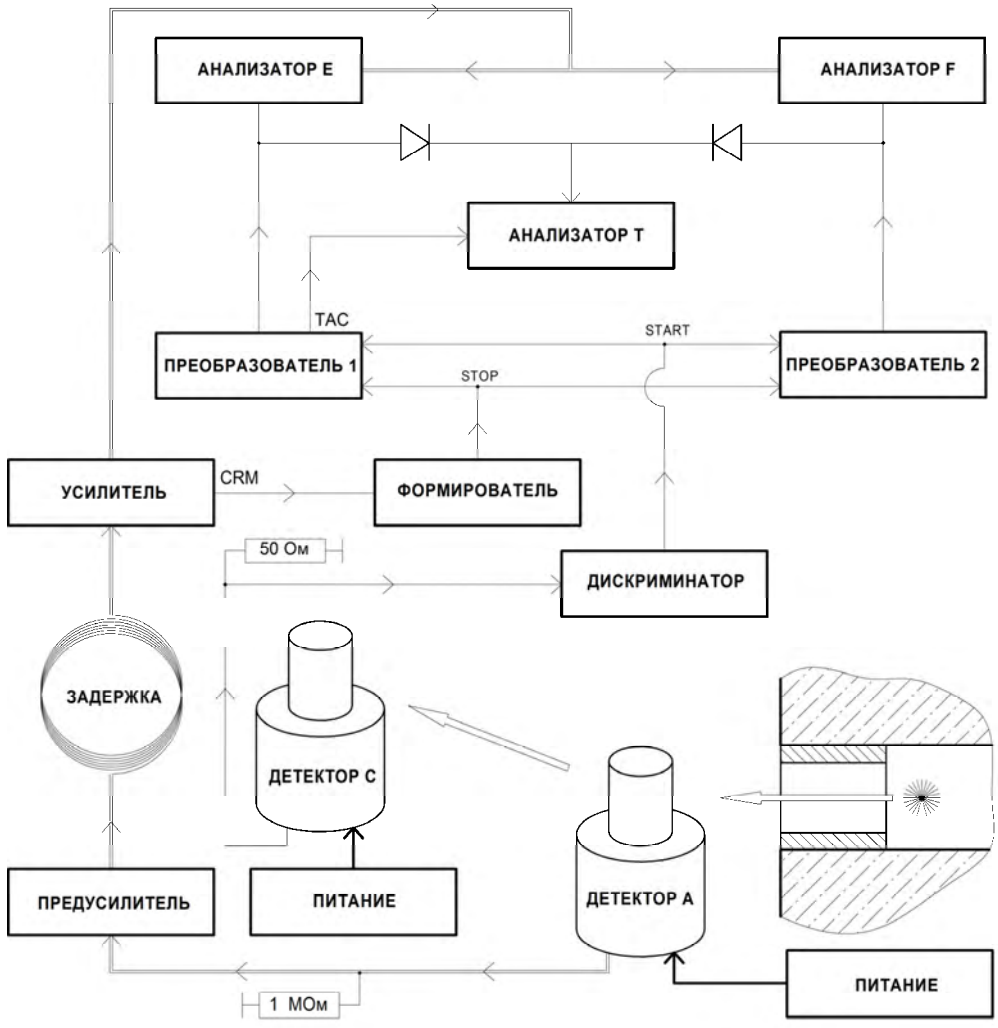


Рис. 2. Схема соединений измерительного оборудования

Время измерений для выбранного угла рассеяния составляло от 4000 до 10000 с. Каждый эксперимент завершался регистрацией контрольного распределения амплитуд импульсов с анализирующего детектора при выключенном управлении "GATE". Время контрольных измерений составляло 200 с. Контрольные измерения выполнялись для учета дрейфа коэффициента усиления ФЭУ (в пределах 2 %), происходившего во время экспериментов. Полученные контрольные распределения были использованы для приведения всех результатов к единому масштабу шкалы амплитуд (по номеру канала анализатора).

Результаты измерений

Для единичного акта комптоновского рассеяния, энергия, передаваемая электронам в сцинтилляторе, связана с выбранным углом рассеяния следующим соотношением [5, 6, 9]:

$$E_e = E_\gamma \Big/ \left[1 + \frac{M/E_\gamma}{1-\cos\theta} \right], \qquad (1)$$

где E_e – энергия электрона отдачи; E_γ – энергия налетающего гамма-кванта; θ – угол рассеяния гамма-кванта относительно первоначального направления движения; $M = 0{,}511$ МэВ – энергия, соответствующая массе покоя электрона.

При обработке результатов измерений, расчет по формуле (1) выполнялся для каждого из двух значений энергии гамма-квантов радиоизотопного источника (1,173 и 1,333 МэВ); среднее двух значений принималось в качестве оценки энергии, переданной электронам сцинтиллятора.

Зарегистрированные распределения представлены на рис. 3–18. На графиках временных распределений импульсов показано число отсчетов в фоновом окне и число отсчетов в рабочем окне. На каждом графике распределений амплитуд импульсов: белыми символами показано распределение, соответствующее фоновому окну (случайные совпадения); черными символами – распределение, соответствующее рабочему окну; сплошной линией показан результат сглаживания. Уровень фона случайных совпадений, полученный в фоновом окне, в среднем составил менее 10 % от числа событий в пике рабочего окна.

При анализе распределений амплитуд импульсов предполагалось, что световыходу сцинтиллятора соответствует положение максимума пика на шкале каналов (с поправкой на коэффициент усиления). Для нахождения положения максимума на распределении амплитуд импульсов были использованы результаты сглаживания (усреднения по 25 точкам). Результаты обработки измерений приведены в таблице.

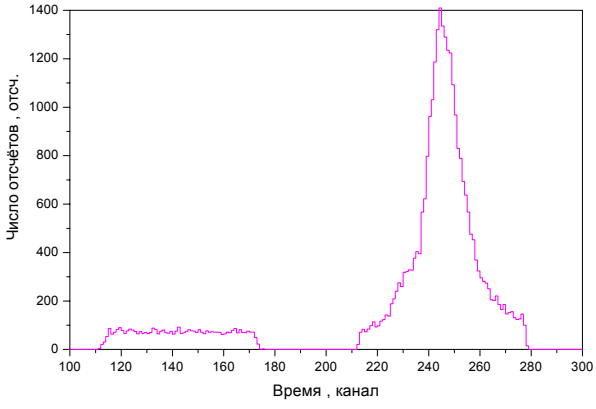


Рис. 3. Временное распределение импульсов для угла 15°

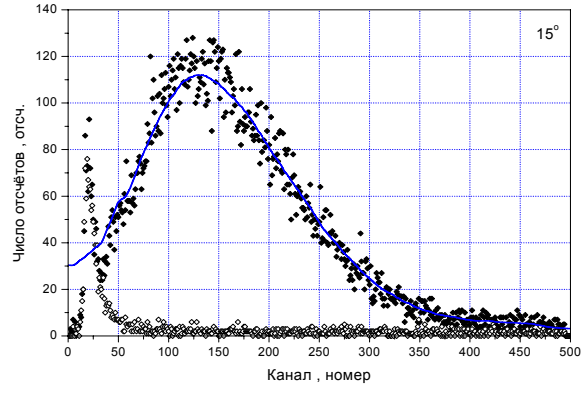


Рис. 4. Распределения амплитуд импульсов двух окон для угла 15°

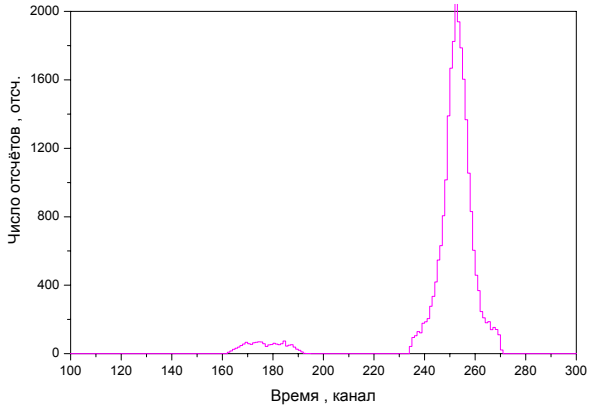


Рис. 5. Временное распределение импульсов для угла 30°

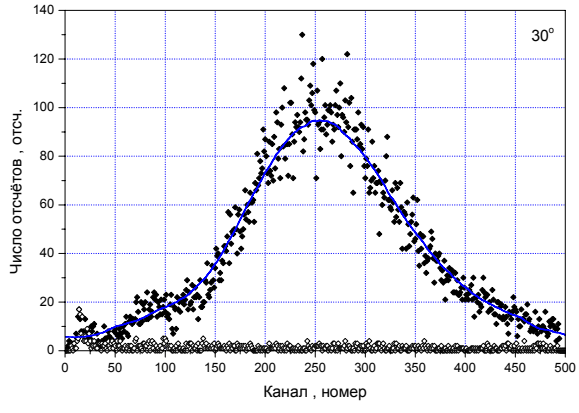


Рис. 6. Распределения амплитуд импульсов двух окон для угла 30°

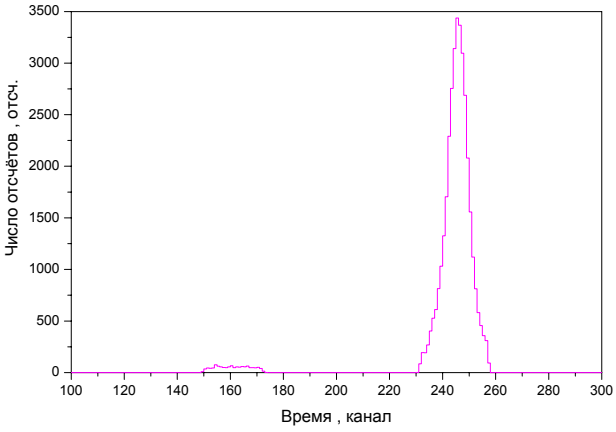


Рис. 7. Временное распределение импульсов для угла 45°

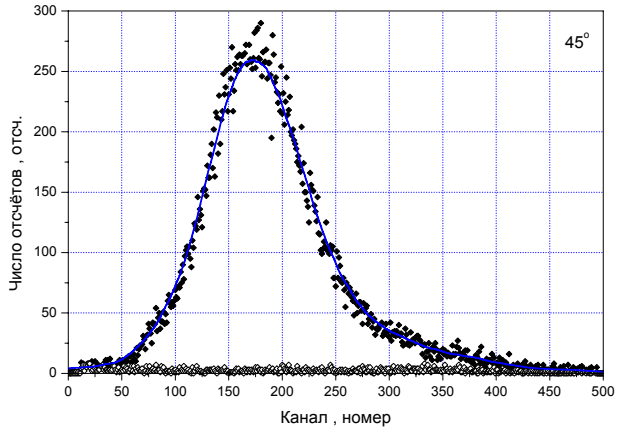


Рис. 8. Распределения амплитуд импульсов двух окон для угла 45°

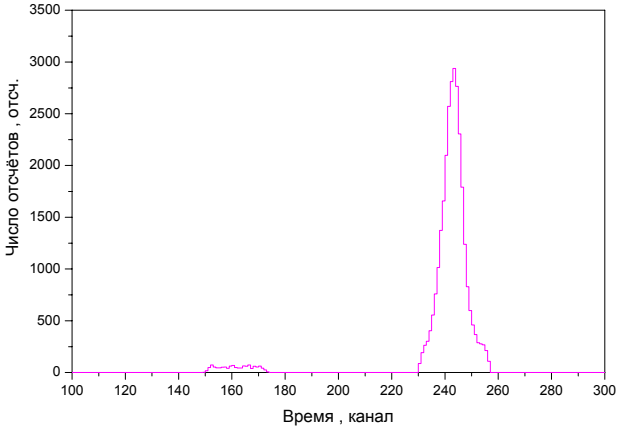


Рис. 9. Временное распределение импульсов для угла 60°

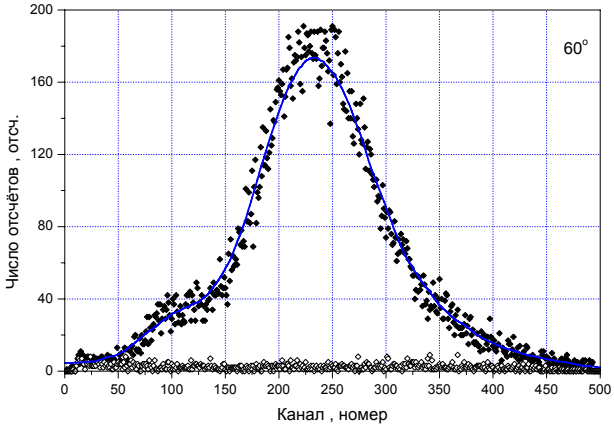


Рис. 10. Распределения амплитуд импульсов двух окон для угла 60°

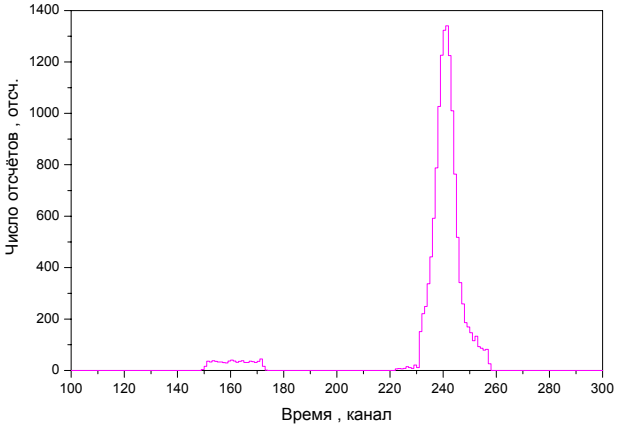


Рис. 11. Временное распределение импульсов для угла 75°

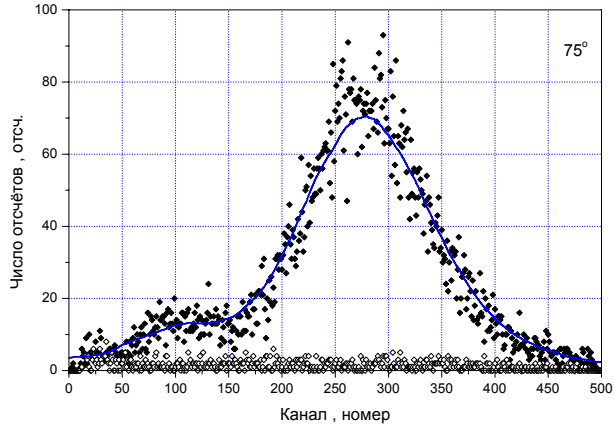


Рис. 12. Распределения амплитуд импульсов двух окон для угла 75°

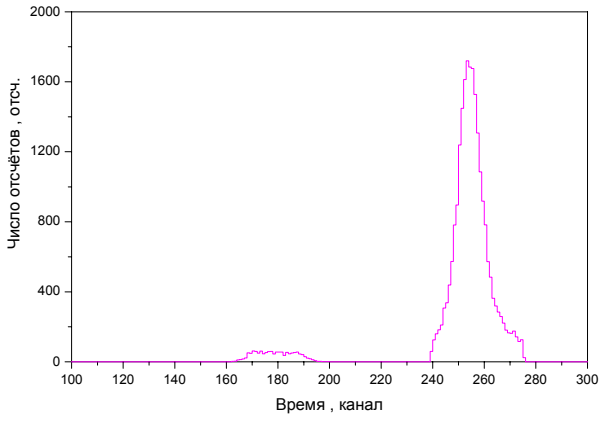


Рис. 13. Временное распределение импульсов для угла 90°

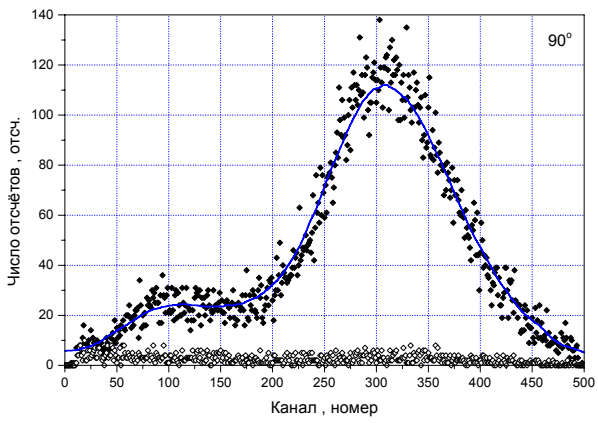


Рис. 14. Распределения амплитуд импульсов двух окон для угла 90°

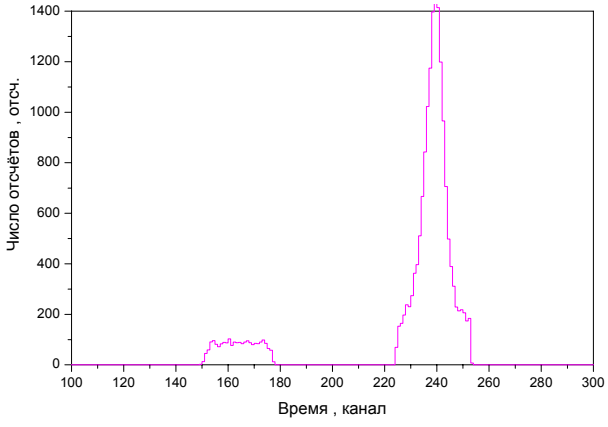


Рис. 15. Временное распределение импульсов для угла 120°

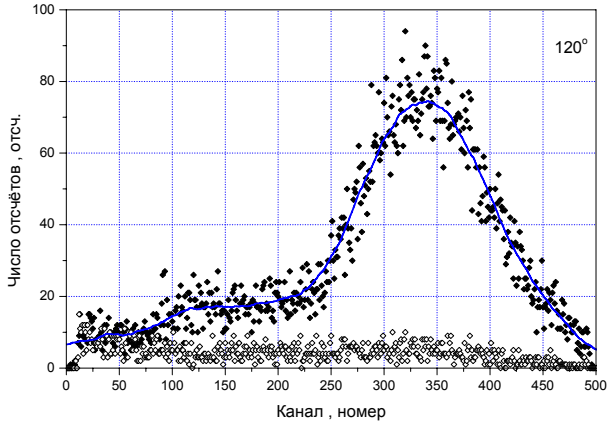


Рис. 16. Распределения амплитуд импульсов двух окон для угла 120°

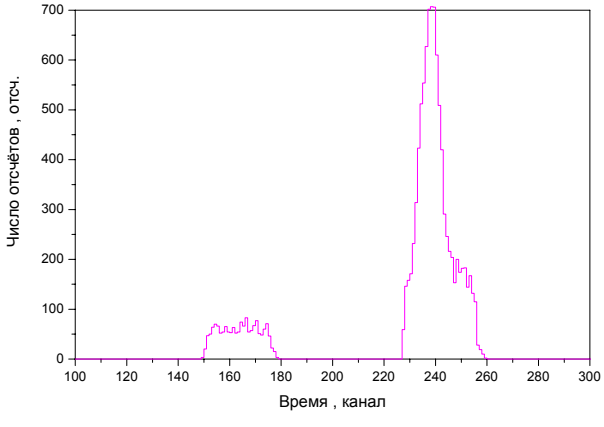


Рис. 17. Временное распределение импульсов для угла 150°

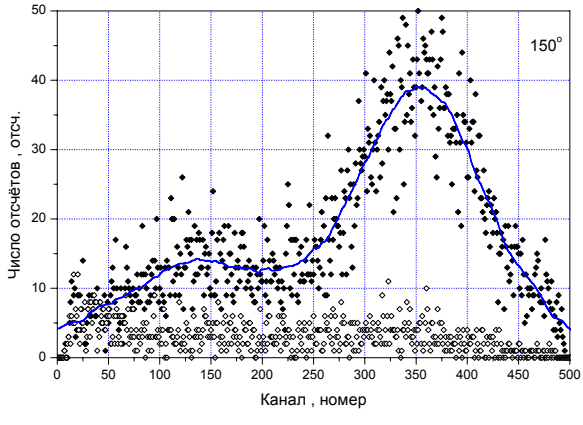


Рис. 18. Распределения амплитуд импульсов двух окон для угла 150°

Результаты обработки измерений

Угол θ . градус	15	30	45	60	75	90	120	150
Средняя энергия E_e, МэВ	0,0970	0,3106	0,5245	0,6907	0,8087	0,8903	0,9853	1,0284
Усиление, отн. ед.	100	50	20	20	20	20	20	20
Максимум, канал	131	255	174	233	278	309	339	354
Световыход С, канал	26,2	102,0	174,9	233,0	278,0	304,4	339,0	354,0
Аппроксимация, канал	25,8	101,0	176,3	234,8	276,3	305,1	338,5	353,7

Необходимо отметить, что попытка использования функции Гаусса для описания анализируемых распределений не обеспечила приемлемую точность аппроксимации из-за ассиметрии пиков и наличия наклонного "пьедестала". Число событий, формирующих "пьедестал" пика, не менее чем в 2 раза превышает число случайных совпадений в фоновом временном окне. Происхождение "пьедестала" может быть связано с краевыми эффектами и с многократным рассеянием гамма-квантов в сравнительно большом объеме анализирующего детектора: при рассеянии гамма-кванта вблизи поверхности сцинтиллятора, электрон отдачи может вылететь через эту поверхность, оставив в сцинтилляторе не всю свою энергию; часть рассеянных гамма-квантов, прежде чем попасть в управляющий детектор могут испытать в анализирующем детекторе еще один акт рассеяния, при этом суммарная энергия, переданная электронам отдачи, может превысить результат однократного рассеяния.

Полученная зависимость относительного световыхода (в единицах номеров канала анализатора) от энергии, переданной электронам сцинтиллятора, была аппроксимирована линейной функцией (по методу наименьших квадратов). Зависимость относительного световыхода от энергии электронов приведена на рис. 19.

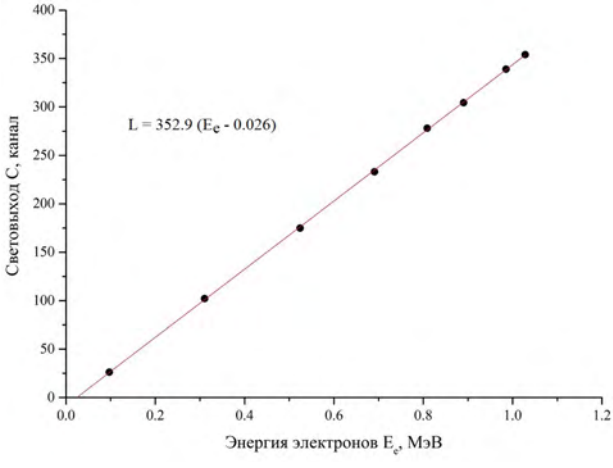


Рис. 19. Зависимость относительного световыхода от энергии электронов

Различие между экспериментальными значениями и аппроксимирующей линией не превышает 1,5 %, что служит косвенным подтверждением корректности выполненных измерений.

Зависимость световыхода сцинтиллятора от природы ионизирующей частицы определяется тем, что сильноионизирующие частицы вдоль своего трека создают локальные электрические поля, которые приводят к росту нерадиационных переходов в возбужденных молекулах (к тушению сцинтилляций) и, соответственно, к уменьшению световыхода.

Анализ полученных результатов показал линейную зависимость световыхода от энергии электронов в диапазоне от 0,09 до 1,02 МэВ:

$$L \approx \alpha_e \left(E_e - \Delta_e \right), \qquad (2)$$

где α_e = 352,9 канал/МэВ – масштабный множитель; Δ_e = 0,026 МэВ – параметр смещения.

Полученные данные согласуются с результатами аналогичных экспериментов [5, 8, 15, 16] и подтверждают данные о линейности световыхода при энергиях электронов отдачи выше 0,1 МэВ. В частности, в одной из цитируемых статей [8] результаты представлены в виде прямой линии с параметром смещения порядка 0,070 МэВ; в другой аналогичной работе [15] световыход описан линейной зависимостью с параметром смещения 0,009 МэВ.

Заключение

Разработан и отлажен стенд для исследования световыхода сцинтилляционных детекторов. Для сцинтиллятора на основе полистирола в диапазоне энергий электронов от 0,1 до 1,0 МэВ подтверждена линейность зависимости световыхода.

Измерительный стенд планируется применить для исследования световыхода органического сцинтиллятора из полистирола от энергии протонов в эксперименте с генератором DT-нейтронов. В экспериментах с нейтронами [4, 5, 8] используется однозначная связь между углом рассеяния нейтрона и энергией, переданной протону отдачи [5]:

$$E_p \approx E_n \left(1 - \cos^2 \theta \right), \qquad (3)$$

где E_p – энергия протона отдачи; E_n – энергия налетающего нейтрона; θ – угол рассеяния нейтрона относительно первоначального направления движения.

Литература

1. Акимов Ю. К. Детекторы ядерных излучений на основе пластических сцинтилляторов // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 1994. Т. 25. С. 496.

2. Харжеев Ю. Н. Сцинтилляционные счетчики в современных экспериментах по физике высоких энергий // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2015. Т. 46. С. 1124.

3. Britvich G. I., Brekhovskikh V. V., Semenov V. K., Kholodenko S. A. The main characteristics of polystyrene scintillators produced at the Institute of High-Energy Physics and detectors on their basis // Instruments and Experimental Techniques. 2015. Vol. 58. P. 211.

4. Smith D. L., Polk R. G., Miller T. G. Measurement of the response of several organic scintillators to electrons, protons and deuterons // Nuclear Instruments and Methods. 1968. Vol. 64. P. 157.

5. Кулинич Ю. А. Рукавишников В. Г. Измерение зависимости световыхода сцинтилляционных кристаллов от энергии излучения // Приборы и техника эксперимента. 1971. № 5. С. 79.

6. Вартанов Н. А. Самойлов П. С. Прикладная сцинтилляционная гамма-спектрометрия // М.: Атомиздат. 1975.

7. Valentine J. D., Rooney B. D. Design of a Compton spectrometer experiment for studying scin-tillator non-linearity and intrinsic energy resolution // Nuclear Instruments and Methods in Phys-ics Research. 1994. Vol. A353. P. 37.

8. Chen J. R., Yuan L. J., Hsu W. S., Liu Y. C. Electron light output and proton light output in a NE-213 liquid scintillator // Chinese Journal of Physics. 1982. Vol. 20. P. 75.

9. Beretta M., Capelli S., Gironi L., Previtali E., Sisti M. Non proportionality dependence on shaping time // Journal of Instrumentation. 2017. Vol. 12. P. P04007.

10. Choong W. S., Vetter K. M., Moses W. W., Hull G., Payne S. A., Cherepy N. J., Valentine J. D. Design of a facility for measuring scintillator non-proportionality // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2008. Vol. 55. P. 1753.

11. Ugorowski P. B., Harrison M. J., McGregor D. S. Design and performance of a Compton-coincidence system for measuring non-proportionality of new scintillators // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 2010. Vol. A615. P. 182.

12. Swiderski L., Marcinkowski R., Szawlowski M., Czarnacki W., Syntfeld-Kazuch A., Szczesniak T., Pausch G., Plettner C., Roemer K. Non-proportionality of electron response and resolution of Compton electrons in scintillators // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2012. Vol. 59/ P. 222.

13. Swiderskii L., Marcincowski R., Moszynski M., Czarnacki W., Szawlowski M., Szczesniak T., Pausch G., Plettner C., Roemer K. Electron response of some low-Z scintillators in wide energy range // Journal of Instrumentation. 2012. Vol. 7. P. P06011.

14. Берковский А. Г., Веретенников А. И., Козлов О. В. Вакуумные фотоэлектронные приборы // М.: Энергоатомиздат. 1982.

15. Hirschberg M., Beckmann R., Brandenburg U., Bruckmann H., Wick K. Precise measurement of Birks kB parameter in plastic scintillators // IEEE Transactions on Nuclear Science. 1992. Vol. 39. P 511.

16. Dietze G. Energy calibration of the NE-213 scintillation counters by gamma-rays // IEEE Transactions on Nuclear Science. 1979. Vol. 26. P. 398.

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗАГРУЗОЧНОЕ УСТРОЙСТВО ЦЕНТРАЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО КАНАЛА ИЯР ВИР-2М

А. В. Демьянов, А. А. Пикулев, В. С. Майорников, М. В. Некрасов, П. Н. Филатов, А. Д. Авдеев, Т. Н. Царёва

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

В РФЯЦ-ВНИИЭФ на исследовательском реакторе ВИР-2М [1] проводятся многочисленные исследования воздействия радиации на электронную компонентную базу, материалы и приборы.

Наиболее часто исследования проводятся в центральном экспериментальном канале цилиндрической формы с внутренним диаметром 141 мм и длиной 3 м.

При проведении эксперимента важна точность установки облучаемого объекта в центральном канале (ЦК), а также возможность дистанционного извлечения объекта после окончания облучения с целью исключения избыточного воздействия радиации и температуры со стороны реактора.

Для решения этих задач разработано дистанционное загрузочное устройство, которое позволяет в автоматизированном режиме выполнять операции загрузки и извлечения облучаемого объекта из ЦК.

Описание дистанционного загрузочного устройства

Загрузочное устройство представляет собой консольный кран, вращающийся вокруг оси, закрепленной на стене с помощью кронштейнов (рис. 1). В состав загрузочного устройства входят следующие основные составные части:

– контейнер загрузочный (КЗ);

– электропривод горизонтального перемещения (ЭГП);

– электропривод вертикального перемещения (ЭВП);

– грузозахватное приспособление (ГП);

– блок управления основной (БУО);

– блок управления местный (БУМ).

КЗ предназначен для размещения объектов облучения массой до 40 кг. КЗ представляет из себя полый цилиндр с размерами: диаметр – 135 мм, высота 594 мм, дно и крышка КЗ имеют форму усечённого конуса. Внутри КЗ расположены горизонтальные перегородки.

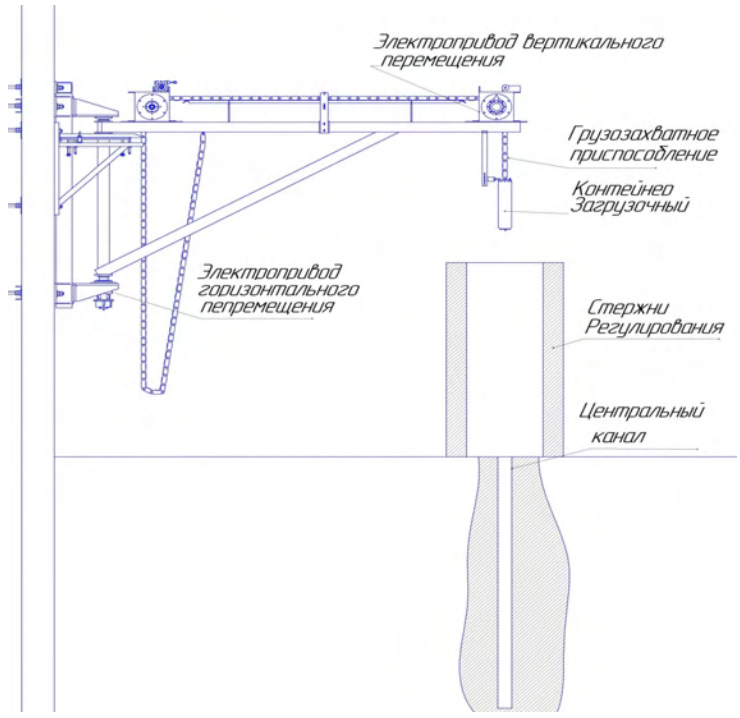


Рис. 1. Общий вид дистанционного загрузочного устройства

ЭГП предназначен для поворота консоли загрузочного устройства на угол от 0° до 180° и остановки в любом положении с точностью ±0,1°. Поворот осуществляется с помощь электродвигателя М2. В качестве датчика обратной связи служит абсолютный однооборотный энкодер Е2, имеющий прямую механическую связь с валом электродвигателя. Датчики ДКП1-ДКП4 осуществляют остановку двигателя в конечных положениях.

ЭВП предназначен для подъема и опускания контейнера загрузочного на расстояние 3 м вдоль оси ЦК и 2 м над ЦК и остановки в промежуточном положении с точностью ±1 мм. Перемещение осуществляется с помощь электродвигателя М1. В качестве датчика обратной связи служит абсолютный энкодер с тросовым барабаном Е1. Датчики ДКП5-ДКП6 осуществляют остановку двигателя в конечных положениях.

Технические характеристики загрузочного устройства:

– максимально допустимый вес объектов, помещаемых в КЗ 40 кг;

– скорость перемещения контейнера загрузочного 2 и 30 мм/с;

– скорость перемещения стрелы загрузочного устройства 0,3 обор/мин;

– средняя наработка загрузочного устройства на отказ не менее 250 циклов;

– масса загрузочного устройства 900^{+50}кг.

Система управления дистанционного загрузочного устройства

Система управления (рис. 2) предназначена для дистанционного управления загрузочным устройством по команде оператора. Система управления позволяет выполнять следующие операции:

– горизонтальное перемещение: движение осуществляется путём поворота всей рамы вместе с механизмом вертикального перемещения, грузозахватным приспособлением и контейнером загрузочным;

– вертикальное перемещение: движение осуществляется путем перемещения грузозахватного приспособления и присоединённого к нему контейнера;

– автоматическая остановка движения при достижении крайнего или заданного промежуточного положения, а также, при обнаружении неисправности или по сигналу от внешней аппаратуры;

– автоматическое переключение на низкую скорость при работе ниже 1 м от дна ЦК.

Система управления состоит из основного блока управления, который располагается в пультовой, и местного блока управления, который располагается в реакторном зале.

Основной блок построен на базе промышленного логического контроллера IP-8841 с встроенной операционной системой mini OS7. Контроллер состоит из следующих модулей ввода вывода: I-8046W-модуль дискретного ввода, I-8037W модуль дискретного вывода, I-8042W модуль дискретного вывода, I-8064W модуль релейного вывода.

Местный пульт управления включает в себя коммутирующие элементы для управления двигателями. Для управления двигателем вертикального перемещения используется драйвер серводвигателя Pronet10D. Для управления двигателем поворотного механизма используется реверсивный контактор.

Датчиком обратной связи поворотного механизма служит однооборотный абсолютный энкодер, который измеряет угловое положение загрузочного устройства и передает данные по сети Ethernet в контроллер.

Датчиком обратной связи механизма вертикального перемещения служит энкодер с тросовым барабаном, который измеряет положение контейнера относительно дна ЦК и передаёт данные по сети Ethernet в контроллер.

Информация о текущих положениях исполнительных механизмов отображается на цифровом табло, которое располагается на передней панели блока управления.

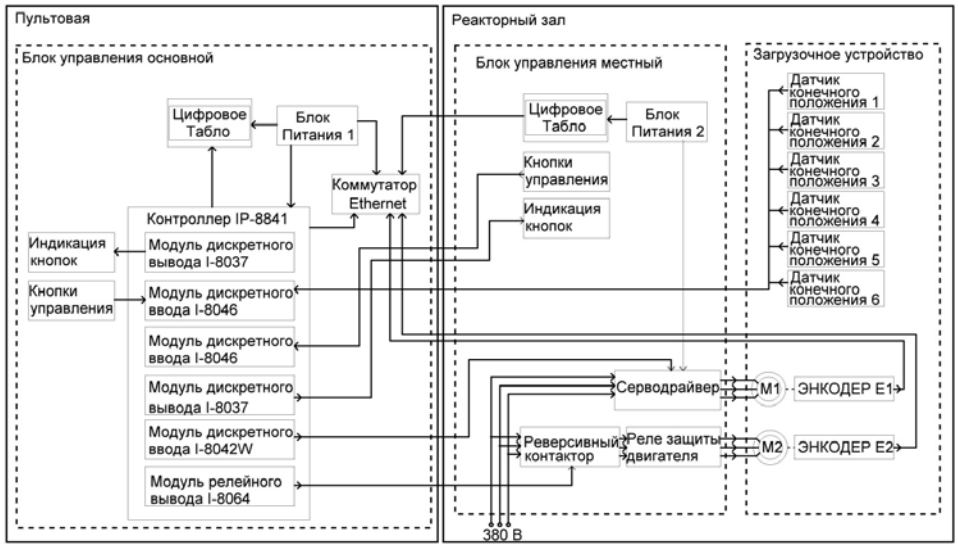


Рис. 2. Структурная схема системы управления

Заключение

С использование загрузочного устройства снижается трудоемкость операций загрузки и извлечения облученных образцов после окончания пуска реактора, а также повышается точность позиционирования облучаемых образцов в центральном экспериментальном канале ВИР-2М. Благодаря загрузочному устройству, снижается радиационное воздействие на персонал, повышается безопасность проведения испытаний.

Литература

1. Воинов А. М., Колесов В. Ф., Матвеенко А. С. и др. Водный импульсный реактор ВИР-2М и его предшественники // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 1990. Вып. 3. С. 8.

ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСОВ ДАВЛЕНИЯ НА ДИНАМИКУ НЕРАВНОВЕСНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ТРЕКАХ, ОБРАЗУЕМЫХ ТЯЖЕЛЫМИ ЗАРЯЖЕННЫМИ ЧАСТИЦАМИ В КРЕМНИЕВЫХ СТРУКТУРАХ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

С. А. Захарова, А. В. Грунин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Интерес к взаимодействию тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) высоких энергий с конденсированным веществом обусловлен практическими применениями в ядерной физике, космической технике и медицине. Воздействие ТЗЧ на конденсированную среду приводит к ряду эффектов в полупроводниковых структурах, которые не полностью изучены. Одним из таких эффектов являются одиночные радиационные эффекты в электронной компонентной базе (ЭКБ) с малыми проектными нормами [1]. Данные эффекты являются особенно важной проблемой для космических аппаратов, поскольку иногда достаточно попадания одной частицы в чувствительный объем прибора, чтобы произошел сбой в его функционировании.

По мере уменьшения проектных норм при разработке ЭКБ, сечение насыщения сбоев при воздействии отдельных ядерных частиц снижается за счет уменьшения площади, занимаемой чувствительными областями в ячейке памяти. Однако уменьшение проектных норм менее 90 нм не дает заметного эффекта снижения сечения насыщения. Это связано с резким ростом кратности возникающих сбоев [2]. Например, для 65 нм КМОП-технологии сбои, кратностью более двух, составляют до 90 % от всех сбоев при воздействии ТЗЧ с линейными потерями энергии (ЛПЭ) более 34 МэВ·см^2/мг. Рост кратности сбоев обусловлен как уменьшением величины критического заряда, требуемого для переключения ячейки памяти, так и уменьшением расстояний между чувствительными областями соседних ячеек памяти. Рис. 1 иллюстрирует зависимость вероятности многократных сбоев от ЛПЭ, построенную по данным [3].

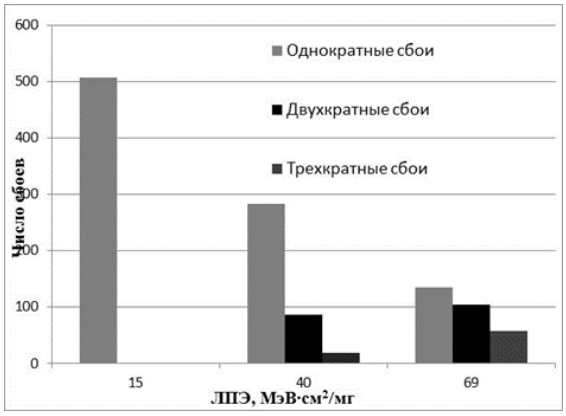


Рис. 1. Зависимость числа сбоев от ЛПЭ

Наиболее распространенной в настоящее время моделью многократных сбоев является диффузионно-дрейфовая модель, связанная с собиранием зарядов с трека частицы. Оценка ионизационного тока через отдельный переход радиуса R при нормальном падении иона может быть получена из решения уравнения диффузии при учете различных граничных условий на поверхности кристалла [1, 4]. Однако, данная модель не учитывает механизмы, связанные с локальным выделением большой плотности энергии и мгновенным нагреванием области энерговыделения.

Важным физическим результатом прохождения ТЗЧ в полупроводниковых и диэлектрических структурах является формирование специфических пространственных образований, получивших наименование треков, т.к. в ряде веществ структурные изменения в поврежденной области существуют длительное время. Образование и эволюция трека связаны с интенсивным выделением энергии ТЗЧ в электронную подсистему твердого тела вблизи траектории иона, с передачей энергии решетке и, в последующем, с передачей энергии возбуждения в невозмущенную часть кристалла. Временную эволюцию процессов в треке ТЗЧ можно представить следующим образом:

- 10^{-13} с – передача энергии электронной подсистеме;
- $<10^{-12}$ с – передача энергии от электронной компоненты в решетку;
- 10^{-12} с – остывание сердцевины за счет передачи энергии кристаллической решетке в оболочке трека;
- 10^{-8} с – остывание оболочки трека.

Трекообразованию посвящен ряд обзоров, опубликованных в последние годы, см., например, [5, 6]. Формирование областей с высокой плотностью выделенной энергии влияет также на характер радиационного повреждения в твердых телах и распыления атомов с поверхности, и кинетика трека зависит от типа и свойств твердого тела.

Разработка перспективных моделей трекообразования естественным образом сочетает различные механизмы на разных стадиях возбуждения и релаксации электронной и ионной подсистем кристалла, см., например, гибридную модель [7]. Методика построения функции энергетических потерь ТЗЧ в мо-

дели, основанной на теории комплексной диэлектрической функции, учитывает реакцию электронной системы кристалла на вносимое возбуждение [8]. Обратная мнимая часть комплексной диэлектрической функции материала (функция энергетических потерь) содержит информацию о диссипации и перераспределении энергии квазичастиц – электронов, дырок, плазмонов, фононов. Исходя из этих представлений, в [9] построена модель, описывающая возбуждение и релаксацию электронной и ионной подсистем Al_2O_3 в треке ТЗЧ, и методами молекулярной динамики рассчитаны структурные изменения. Механизм трекообразования до сих пор, по мнению Ф. Ф. Комарова [5], является дискуссионным.

Наш интерес к этой проблеме связан с тем, что широкое применение изделий ЭКБ в различных объектах ядерной и космической техники сделало актуальным обеспечение устойчивости аппаратуры к действию ионизирующих излучений, в частности к действию ТЗЧ. Диапазон энергий ТЗЧ простирается от единиц МэВ до единиц ГэВ

Взаимодействие ТЗЧ со средой характеризуется величиной энергии, теряемой частицей на единице пути – ЛПЭ, которая в нерелятивистском случае прямо пропорциональна квадрату атомного номера частицы и обратно-пропорциональна ее энергии (формула Бете–Блоха). ЛПЭ за вычетом энергии на генерацию тормозного излучения, упругое взаимодействие и ядерные реакции равна линейной передаче энергии электронной подсистеме кристалла. Основная область трека ТЗЧ формируется за счет малоуглового рассеяния с передачей электронам энергии до 10^2 эВ, расстояние от частицы до ионизованного атома ~8 нм.

Концентрация генерированных в треке электронно-дырочных пар зависит от таких свойств полупроводника как степень идеальности кристаллической решетки, ширина запрещенной зоны, время электрон-фононной релаксации. Однако на первом этапе важную роль играет пространственное распределение выделенной ТЗЧ энергии и концентрации неравновесных носителей заряда.

В программном коде Geant 4 используется следующее выражение для спектра δ- электронов [5]:

$$\frac{d\sigma}{dE} = \frac{2\pi r_0^2 m_0 c^2 Z_2 Z_{1,eff}^2}{\beta^2 E}\left[1 - \frac{\beta^2 E}{E_{\max}} + \frac{E^2}{E_{\max}^2}\right], \quad (1)$$

где $r_0 = 2{,}818 \cdot 10^{-13}$ см – классический радиус электрона, m_0 – масса покоя электрона, $Z_{1,eff} = Z_1\left[1 - \exp\left(-125\beta Z_1^{-\frac{2}{3}}\right)\right]$, $\beta = \frac{\left[E_{ion}(E_{ion} + 1876{,}6)\right]^{1/2}}{E_{ion} + 938{,}3}$, E_{ion} – энергия иона в МэВ а.е.м.$^{-1}$, Z_1 – атомный номер иона, Z_2 – атомный номер мишени, $E_{\max}$ – максимальная энергия δ-электронов, которая выводится из кинематики лобовых электрон-ионных столкновений в твердом теле и рассчитывается по формуле:

$$E_{\max} = \frac{4Mm}{(M+m)^2} E_{ion} \approx 2mv^2, \text{ v – скорость иона.}$$

На рис. 2 приведен рассчитанный по (1) спектр δ-электронов в кремнии при прохождении иона Ar^{40} ($Z_{1,eff} = 14{,}56$) с энергией 156 МэВ с ЛПЭ 15 МэВ см^2/мг. Средняя энергия δ-электронов равна 47 эВ, а максимальная энергия составляет 7,8 кэВ. В кремнии пробег электронов с таким значением максимальной энергии не превышает 1 мкм.

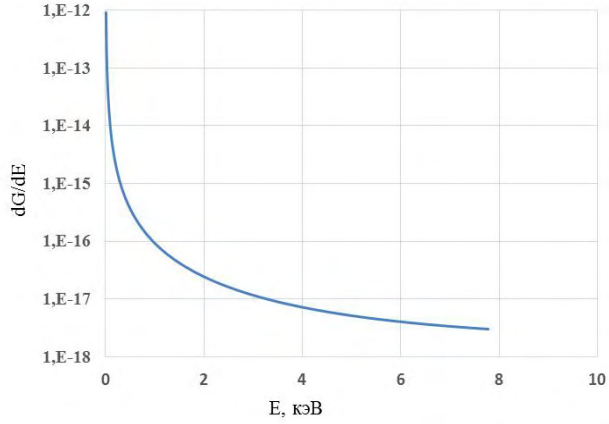


Рис. 2. Спектр δ-электронов в кремнии при прохождении иона Ar^{40}

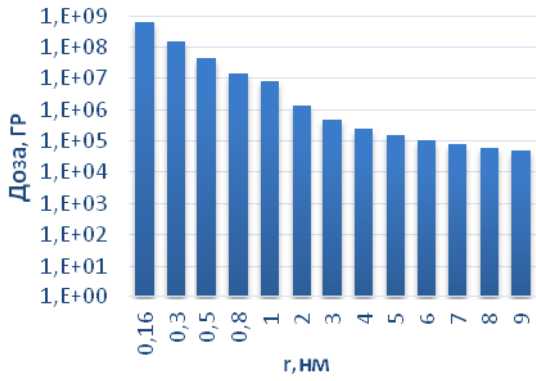
Для расчета трековой структуры в [8] на основе теории диэлектрической функции предложена аналитическая зависимость распределения выделенных доз, описывающая результаты расчетов по методу Монте–Карло:

$$\varepsilon(r) = C_1(E) f(r) r^{-2{,}308} Z_{1,eff}^2 \text{ для } 0{,}16 \le r < 10 \text{ нм};$$

$$\varepsilon(r) = C_2(E) r^{-2{,}005} Z_{1,eff}^2 \text{ для } 10 \le r < 100 \text{ нм},$$

где r – радиальное расстояние, зависит от траектории ТЗЧ – $Z_{1,eff}$, E – кинетическая энергия ТЗЧ, $C_1(E) = 1{,}421 \cdot 10^5 E^{-0{,}913}$, $C_2 = 9{,}137 \cdot 10^4 E^{-0{,}9404}$, $f(r) = 1{,}124 - 0{,}223r + 0{,}03656r^2 - 0{,}00156r^3$. $Z_{1,eff}$ и β определены выше.

На рис. 3 приведено рассчитанное по этой зависимости энерговыделение в кремнии при прохождении иона Ar^{40} с начальной энергией 156 МэВ для двух диапазонов радиусов r – до 9 и 100 нм. При этом не менее 90 % кинетической энергии ТЗЧ выделяется в сердцевине трека радиусом ≈(4–5) нм, что всего на порядок превышает межатомные расстояния в полупроводниковых материалах, используемых в микроэлектронике.



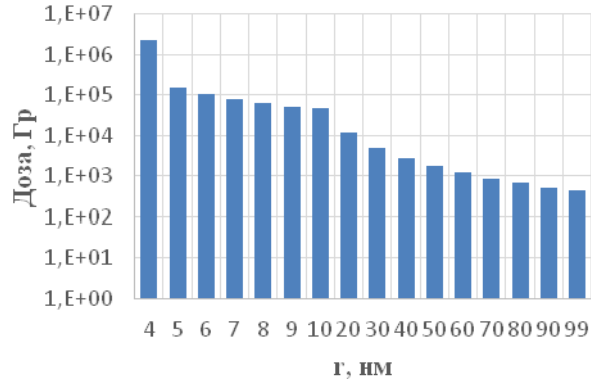


Рис. 3.Зависимость энерговыделения иона Ar^{40} в кремнии

Необходимо отметить, что в момент передачи энергии (рассеяния) неопределенность в энергии ΔW связана с неопределенностью Δx в положении частицы. Для нерелятивистских частиц, имеющих скорость v, по принципу неопределенностей Гейзенберга $\Delta x \geq h\nu/2\pi\Delta W$. Для иона Ar^{40} с кинетической энергией 156 МэВ неопределенность в месте поглощения энергии $\Delta W \approx 10$ эВ для кремния составляет ~2 нм, что сравнимо с радиусом трека и охватывает несколько атомов. Это свидетельствует об ограниченности существующих оценок поперечных размеров трека ТЗЧ во время образования вторичных электронов (~10^{-13} с). Для определенности в дальнейшем оценки энерговыделения приводятся для радиуса сердцевины трека ТЗЧ, равного 4 нм.

Носители заряда в твердом теле (квазичастицы электрон и дырка) рождаются или рекомбинируют парами в одной точке пространства. За время жизни до рекомбинации генерированные электрон и дырка успевают разделиться в пространстве. В диффузионно-дрейфовой модели кинетики носителей заряда в полупроводниках и диэлектриках радиус Онзагера $r_c = \dfrac{e^2}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0\kappa T}$ считается расстоянием, в пределах которого электрон-дырочная пара с большой вероятностью исчезает в результате геминальной рекомбинации (e – заряд электрона, ε – диэлектрическая проницаемость, ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, k – постоянная Больцмана, T – температура). Влияние рекомбинации носителей подтверждается нелинейными зависимостями сечения сбоя от ЛПЭ и во многих случаях сечение сбоя $\sim\sqrt{\text{ЛПЭ}}$. При значениях энергии ионов, характерных для циклотрона У-400М ОИЯИ (г. Дубна), начальная концентрация электронно-дырочных пар в треке достигает 10^{19} $см^{-3}$ и 10^{20} $см^{-3}$ для SiO_2 и Si соответственно, поэтому значительная часть носителей в сердцевине трека рекомбинирует уже на этапе термализации.

В табл. 1 приведены формально рассчитанные значения радиуса Онзагера для некоторых полупроводниковых и диэлектрических материалов в диапазоне температур от 300 К до $2{,}5\cdot10^4$ К. При T = 300 К (вне трека ТЗЧ) r_c = (4,8 – 12) нм. Уже для температуры $\approx10^3$ К использование значений, равных всего нескольким межатомным расстояниям, является проблематичным.

Кремний и германий относятся к структурам, в которых нижний минимум валентной зоны и верхний максимум зоны проводимости не находятся в одной и той же точке зоны Бриллюэна, поэтому являются непрямозонными. С этим связаны сложности описания кинетики релаксации неравновесных носителей заряда с участием фононов [10]. Скорость рекомбинации зона-зона мала, и существенны механизмы, связанные с неидеальностью решетки и возникновением дополнительных к примесям локализованных состояний (ловушек для электронов и дырок).

Таблица 1

Радиус Онзагера для некоторых полупроводниковых и диэлектрических материалов, нм

Материал	ε	Температура, К		
		300	1000	25000
Si	11,6	4,8	1,4	0,06
Ge	16,2	3,4	1,0	0,04
GaAs	12,9	4,3	1,3	0,05
SiO_2	4,5	12,0	3,7	0,1
Al_2O_3	9,4	5,9	1,8	0,07

Так как локализованные состояния в соответствии с принципом неопределенности не могут характеризоваться определенным квазиимпульсом, законы сохранения энергии и импульса не должны выполняться в точности. После прохождения частицы электронно-дырочная плазма термализуется в течение пикосекунд внутри трека цилиндрической формы с радиусом оболочки около 0,1 мкм. При ЛПЭ 40 МэВ $см^2$/мг мощность поглощенной дозы в сердцевине трека достигает $3\cdot10^{15}$ Гр/с, а концентрация электронно-дырочных пар после завершения образования каскада δ-электронов достигает $2\cdot10^{19}$ $см^{-3}$ и $6\cdot10^{20}$ $см^{-3}$ в SiO_2 и Si соответственно. Рекомбинация электрона и дырки в кремнии представляется в виде каскада генерации фононов при спуске на рекомбинационный уровень. Возможно, рекомбинация

электрон-дырочных пар происходит в горячем состоянии, так как электроны с энергией ~1 эВ не термализуются и их распределение не будет Больцмановским.

После образования трек постепенно начинает остывать. Оценки показали, что цилиндрическая область вблизи трека (оболочка радиусом 1 мкм) остынет до температуры окружающей трек среды за время порядка 60 нс. Область сердцевины трека (4 нм) остывает значительно быстрее за счет передачи энергии кристаллической решетке в шубе трека за время ~5 пс. Необходимо отметить, что использование макроскопических подходов (уравнение Фурье) в описании переноса энергии для наноразмерного трека ТЗЧ является грубым приближением. Точность этой оценки является важной, так как вынос энергии может осуществляться не только диффузией фононного газа в решетке.

Известно, что формирование областей с локально высокой плотностью энергии может быть источником ударной волны. По мнению авторов одной из первых работ по гидродинамическому эффекту [11], рассмотревших прохождение осколка деления урана в воде, давление, развивающееся в окрестности трека осколка, увеличивается как куб плотности. В. И. Гольданский и др. показали, что диссипация энергии от трека осколка деления урана более эффективна через гидродинамический механизм, чем через термодинамический. Применимость механизма волновой разгрузки трека связана с тем, что характерные линейные размеры области возмущения в треке ТЗЧ превышают межмолекулярные расстояния.

Величину теплового давления можно оценить, используя приближение Ми–Грюнайзена. Данная модель предполагает линейную зависимость давления от энерговыделения. Коэффициент пропорциональности между этими двумя величинами получил название коэффициента Грюнайзена, Γ. В модели Грюнайзена коэффициент Γ не зависит от температуры и является константой. Таким образом, формула для вычисления давления в приближении Грюнайзена имеет следующий вид [12]:

$$P = \Gamma \rho W, \qquad (2)$$

где ρ – плотность вещества, W – удельное энерговыделение, которое вычислялось с учетом ЛПЭ ТЗЧ.

Коэффициент Грюнайзена Γ характеризует ангармонизм колебаний атомов кристаллической решетки и определяется изменением частоты колебаний решетки в зависимости от изменения объема системы. Для оценки температуры трека учитывалась ее линейная связь с удельным энерговыделением W через удельную теплоемкость: $W = C_V T$. Модель Грюнайзена предполагает, что величина удельной теплоемкости не зависит от температуры и имеет постоянное значение, т. е. температура превышает Дебаевскую температуру, при которой возбуждаются все уровни колебания атомов в узлах кристаллической решетки. В табл. 2 приведены результаты оценок температуры решетки и теплового давления в треках некоторых ионов, характерных для испытаний на циклотроне У-400 М для ряда материалов микроэлектроники. В результате передачи кинетической энергии электронов температура решетки за времена $\approx 10^{-12}$ с достигает $\approx 2 \cdot 10^4$ К, что приводит к возникновению в треке теплового давления до $2 \cdot 10^{10}$ Па. Использовались следующие коэффициенты Грюнайзена: 0,4 для Si, 0,5 для Ge, 2 для Al_2O_3 и SiO_2. Избыточное давление, возникшее в треке, приводит к формированию акустической волны разгрузки, движущейся вначале со скоростью звука $V_{зв}$.

Волна разгрузки имеет осевую структуру и двигается от сердцевины трека к периферии. Направленное действие такой волны на электронную и ионную подрешетки кристалла могут привести к ряду эффектов.

Таблица 2

Результаты оценок температуры и теплового давления в треке ТЗЧ ряда материалов для сердцевины радиусом 4 нм

Тип иона	Энергия, МэВ/ЛПЭ в Si, МэВ·см^2/мг	Si C_v = 0,8Дж/(г·К) $V_{зв}$ = 2,2·10^{3}м/с Г = 0,4		Ge C_v = 0,3Дж/(г·К) $V_{зв}$ = 5,4·10^{3}м/с Г = 0,5		Al_2O_3 C_v = 0,9Дж/(г·К) $V_{зв}$ = 11·10^{3}м/с Г = 2		SiO_2 C_v = 0,75Дж/(г·К) $V_{зв}$ = 5,7·10^{3}м/с Г = 2	
		T, К	P,·10^{9}Па	T, К	P,·10^{9}Па	T, К	P,·10^{9}Па	T, К	P,·10^{9}Па
Ne^{22}	76/6	2,8·10^3	2	4,6·10^3	4	2,8·10^3	20	3,4·10^3	13
Ar^{40}	156/15	6,3·10^3	5	9,9·10^3	9	6·10^3	43	7,3·10^3	29
Kr^{84}	282/40	1,3·10^4	10	2·10^4	17	1,2·10^4	89	1,5·10^4	59
Xe^{132}	393/69	1,9·10^4	15	2,9·10^4	26	1,8·10^4	130	2,2·10^4	89
Bi^{209}	710/99	2,7·10^4	20	4,2·10^4	37	2,1·10^4	150	3,1·10^4	120

1. Увлечение электронов фононами. Распространяясь в полупроводнике, акустическая волна взаимодействует с электронами и дырками, создавая их направленное движение – акусто-электронный ток. При этом волна рассеивается и теряет свою энергию. Максимальная энергия акустических фононов в кремнии равна 0,05 эВ при частоте $8{,}1\cdot10^{13}$ Гц, в германии – 0,03 эВ, при частоте $4{,}8\cdot10^{13}$ Гц. При температуре трека $6\cdot10^3$ К возбуждены все колебательные степени решетки и каждый фонон несёт определенную энергию и импульс. Плотность акусто-электронного тока в кристалле достигает $7\cdot10^9$ А/м^2 при концентрации носителей заряда в зоне проводимости кремния *n*-типа 10^{16} см$^{-3}$. Движением дырок в кремнии *n*-типа можно пренебречь в связи с их меньшей концентрацией.

Необходимо отметить, что такие давления в волне разгрузки приводят к быстрому сжатию и повышению температуры в окружающем трек пространстве. Известно, что фронт волны способствует росту концентрации носителей заряда [13]. В [14] приводятся данные, что для плавленного кварца электропроводность увеличивается на несколько порядков и достигает 0,1 Ом$^{-1}\cdot$м$^{-1}$ при давлении $35\cdot10^9$ Па и расчетной температуре 2800 К.

2. В кристаллах, в которых отсутствует центр симметрии, под действием внешних механических сил возникает электрическая поляризация. К материалам, обладающим пьезоэффектом, относятся двуокись кремния и сапфир. Волна разгрузки, возникшая в треке ТЗЧ в структуре КМОП, может изменить распределение электрического поля в диэлектрических слоях.

3. При быстром остывании сердцевины трека возможна аморфизация кристаллической решетки, что может уменьшить дрейфовую подвижность и время жизни неравновесных носителей заряда.

4. Актуальным является анализ возможности динамического разрушения полупроводниковых материалов вследствие взаимодействия волны разгрузки трека ТЗЧ и волн, отраженных от акустических неоднородностей.

Авторы надеются, что данная работа заинтересует исследователей гидродинамическими механизмами релаксации энергии в треке ТЗЧ и будет полезна при анализе процесса возникновения однократных и многократных сбоев в соседних ячейках микросхемы памяти с субмикронными проектными нормами, расположенных на относительно большом расстоянии от трека ТЗЧ.

Литература

1. Чумаков А. И. Действие космической радиации на интегральные схемы. М.: Радио и связь, 2004. С. 320.

2. Giot D., Roche P., Gasiot G. et al. Heavy Ion Testing and 3_D Simulations of Multiple Cell Upset in 65 nm Standard SRAMs // IEEE Trans. Nucl. Sci. Aug. 2008. Vol. 55, N 4. P. 2048–2054.

3. Боруздина А. Б., Григорьев Н. Г., Уланова А. В. Влияние топологического размещения ячеек в микросхемах памяти на кратность сбоев от ТЗЧ // Микроэлектроника, 2014. Т. 43, № 2. С. 88–93.

4. Зебрев Г. И. Моделирование дозовых и одиночных радиационных эффектов в кремниевых микро- и наноэлектронных структурах для целей проектирования и прогнозирования: Диссертация на соискание ученой степени доктора техн. наук. Москва. 2009.

5. Комаров Ф.Ф. Нано- и микроструктурирование твердых тел быстрыми тяжелыми ионами // Успехи Физических Наук. 2017. Т.187, № 5. С.465–504.

6. Митерев А.М. Теоретические представления о формировании и эволюции треков заряженных частиц // Успехи Физических Наук. 2002. Т. 172, № 10. С. 1131–1164.

7. Osmani O., Medvedev N., Schleberger M., Rethfeld D. Energy dissipation in dielectrics after swift heavy-ion impact: A hybrid model // Phys. Rev. 2011. Vol. 84. P. 214105

8. Akkerman A., Barak J., Emfietzoglou D. Ion and electron track-structure and its effects in silicon: model and calculations // Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms. 2005. Vol. 227. P.319–336

9. Рымжанов Р. А. Моделирование процессов возбуждения и релаксации электронной подсистемы монокристаллов оксидов, облучаемых быстрыми тяжелыми ионами: Диссертация на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук. Дубна. 2018.

10. Галкин Г. Н. Рекомбинационные процессы в полупроводниках при высоких уровнях возбуждения // Труды ордена Ленина физического института им. П. Н. Лебедева.1981. Т. 128.

11. Гольданский В. И., Ланцбург Е. Я., Ямпольский П. А. О гидродинамическом эффекте при прохождении осколков деления через конденсированное вещество // Письма в ЖЭТФ. 1975. Т. 21.Вып. 6. С. 365–367.

12. Степовик А. П. Термомеханические эффекты в компонентах радиоэлектронной аппаратуры при воздействии импульсов рентгеновского и электронного излучений. Снежинск: ФГУП «РФЯЦ–ВНИИТФ», 2010.

13. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966. С. 688.

14. Горшков М. М., Заикин В. Т., Лобачев С. В. Об электропроводности горных пород при ударном сжатии // ПМТФ. 2001. Т. 42, № 2. С. 16.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОКРАТНЫХ И МНОЖЕСТВЕННЫХ СБОЕВ В МИКРОСХЕМЕ ПАМЯТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БИБЛИОТЕКИ GEANT4

А. Е. Здарьев, *С. А. Лазарев*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

При воздействии тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) на электронную компонентную базу, установленную на космических аппаратах, возможно неправильное функционирование интегральных схем (ИС) или полная потеря их работоспособности, поскольку ионы могут вызывать одиночные радиационные эффекты (ОРЭ) при прохождении через кристалл ИС.

С уменьшением проектных норм возможна ситуация, когда в микросхеме происходят множественные (кратные) сбои [1, стр. 205]. Они возникают при пролете одного иона через несколько чувствительных областей (ЧО), расположенных поблизости, либо если сбор заряда неравновесных носителей происходит сразу в нескольких таких областях. Учет кратных сбоев необходим для корректной оценки сбоеустойчивости микросхемы памяти.

Существует ряд моделей ЧО для проведения расчета частоты одиночных сбоев (ОС) [1]:

− модель тонкой области. В данной модели для расчета числа ОС используются только два параметра: пороговое значение линейных потерь энергии (ЛПЭ) и сечение насыщения. Это позволяет относительно просто выполнить прогноз частоты эффектов, однако пренебрежение геометрией чувствительной области приводит к большим погрешностям при падении ионов под углом, отличным от нормального;

− модель прямоугольного параллелепипеда (RPP). Здесь в отличие от предыдущей модели учитываются геометрические факторы (чувствительный объем представляет собой прямоугольный параллелепипед), что позволяет провести более корректную оценку частоты ОС. При этом считается, что при выделении в ЧО энергии больше пороговой возникает ОРЭ;

− интегральная модель прямоугольного параллелепипеда (IRPP). В настоящее время она применяется наиболее широко, и оценка частоты ОС в ней сводится к вычислению интеграла [2, стр. 101]:

$$\nu = \frac{mS_0}{4} \int_0^{S_{\max}} \int_{L_{\min}}^{L_{\max}} f(s)\, w(E)\, \varphi(L)\, dL\, ds, \qquad (1)$$

где S_0 − полная площадь поверхности ЧО (прямоугольного параллелепипеда); $S_{\max}$ − максимальное значение длины хорды в ЧО; L − ЛПЭ иона в кристалле кремния; $L_{\max}$ − максимальное значение ЛПЭ в спектре ТЗЧ; $L_{\min}$ − минимальное значение ЛПЭ в спектре ТЗЧ; $\varphi(L)$ − дифференциальный ЛПЭ-спектр ТЗЧ; s – длина пробега иона в ЧО; $f(s)$ − дифференциальное распределение длин пробегов ТЗЧ (распределение хорд) в чувствительной области; m − количество чувствительных областей в ИС; ν − количество ОС в ИС в единицу времени; E – энергия, поглощенная в чувствительной области; $w(E)$ – функция чувствительности. Очень часто в качестве $w(E)$ применяется относительное распределение Вейбулла:

$$w = \frac{\sigma}{\sigma_0} = 1 - \exp\left(-\left(\frac{E - E_0}{W}\right)^{\alpha}\right). \qquad (2)$$

Здесь σ – сечение ОС; σ_0 – сечение насыщения ОС; W и α – параметры; E_0 – пороговое значение энергии ЧО, равное $E_0 = \rho k L_0$; где L_0 – пороговое значение ЛПЭ ТЗЧ в ИС; k – глубина ЧО; ρ – плотность кремния.

IRPP-модель имеет некоторые недостатки. Во-первых, необходимый для расчета частоты ОС параметр (глубина ЧО) не оценивают, а задают на основе данных о технологии изготовления ИС, что приводит к неопределенности результата. Во-вторых, в данной модели постулируется изотропность потока ТЗЧ в ЧО. В-третьих, значение ЛПЭ остается постоянной величиной в пределах чувствительного объема и не зависит от пройденного расстояния. Энергия, потерянная частицей внутри ЧО, полностью в ней (в ЧО) поглощается.

− модель ЧО, форма которой основана на экспериментальной зависимости сечения сбоя от ЛПЭ ТЗЧ [3]. В дальнейшем она будет называться моделью ЧО произвольной формы (ЧОПФ).

Для оценки вклада числа кратных сбоев в общее количество ОС проводился их расчет методом Монте–Карло с помощью программы, разработанной на основе библиотеки GEANT4. При проведении расчетов использовались следующие модели ЧО: IRPP, MC-IRPP (memory cell IRPP), а также модель ЧОПФ. Для задания геометрии ЧОПФ применялись выражения (3), (4) [3] и зависимость сечения от ЛПЭ при нормальном падении ТЗЧ, имеющая в данной работе вид (5):

$$\sigma = \pi r^2, \qquad (3)$$

$$\frac{L}{L_0} = \frac{k}{h}, \qquad (4)$$

$$\sigma = \sigma_0 \left[1 - \exp\left(-\left(\frac{L - L_0}{\beta}\right)^{\alpha}\right)\right], \qquad (5)$$

где r и h − координаты точки на поверхности ЧОПФ (радиус и высота соответственно); α и β – параметры.

Из (3–5) следует зависимость:

$$r = \sqrt{\frac{\sigma_0}{\pi}\left[1-\exp\left(-\left(\frac{L_0}{\beta}\left(\frac{k}{h}-1\right)\right)^{\alpha}\right)\right]}. \qquad (6)$$

В модели ЧОПФ сбои рассматривались как детерминированные. То есть вероятность сбоя всегда равна единице, если энерговыделение в ЧО превысило пороговое значение.

В IRPP-модели чувствительным объемом является прямоугольный параллелепипед, размещенный внутри каждой ячейки памяти ИС. Сбои в ней рассматривались как случайные. Это означает, что при выделении в ЧО энергии больше пороговой необязательно наступит ОС. Вероятность его возникновения оценивалась по формуле (2).

В MC-IRPP ЧО представляет собой ячейку памяти, имеющую форму прямоугольного параллелепипеда с площадью основания S, равной площади ячейки. Вероятность p возникновения ОС, принимая во внимание (5), рассчитывалась по формуле:

$$p = \frac{\sigma}{S}. \qquad (7)$$

Моделирование одиночных радиационных эффектов в ИС объемом 4 Мбит проводилось при наличии алюминиевого корпуса, параметры которого приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики алюминиевого корпуса

Поперечные размеры, см^2	1,6×1,6
Высота, см	0,3
Толщина стенок, см	0,1

Положение ИС относительно стенок защитного корпуса представлено на рис.1.

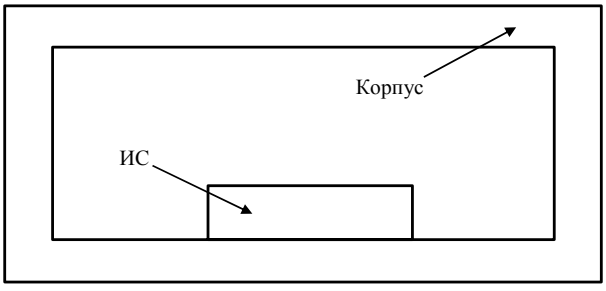


Рис. 1. Размещение ИС

На рис. 2 показано схематичное расположение чувствительных областей в микросхеме, которая представляет собой кристалл кремния с параметрами, приведенными в табл. 2.

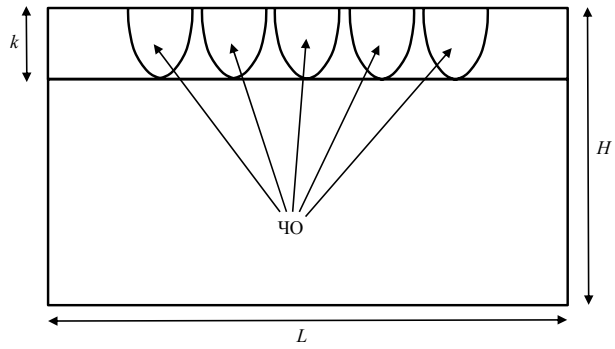


Рис. 2. Расположение чувствительных областей в ИС

Таблица 2

Параметры ИС

Поперечные размеры $L\times W$, см^2	1×1
Высота H, см	0,03
Количество ячеек памяти в ИС	2048×2048
Площадь основания ячейки памяти S, мкм^2	4,04×4

Высота ячейки памяти численно равна глубине k чувствительной области независимо от типа выбранной модели.

Использовавшиеся в расчетах значения параметров распределения (5) указаны в табл. 3.

Таблица 3

Параметры распределения Вейбулла

Сечение насыщения σ_0, мкм^2	9
α	0,5
β, МэВ·см^2/мг	43
Пороговое значение ЛПЭ L_0, МэВ·см^2/мг	4

Поперечные размеры ЧО в виде прямоугольного параллелепипеда (IRPP-модель) одинаковы и равны: $a = b = \sqrt{\sigma_0}$ = 3 мкм.

Расчет числа многократных сбоев проводился для значений глубин ЧО, равных 1 мкм (при этом пороговое значение энерговыделения в ЧО составляло E_0 = 0,932 МэВ) и 2 мкм (E_0 = 1,864 МэВ), с использованием упомянутых выше моделей: ЧОПФ, IRPP, MC-IRPP – при изотропном и направленном потоках тяжелых заряженных ионов.

Расчеты проводились с использованием энергетических спектров ионов галактического космического излучения (от гелия до урана включительно) для изотропного потока ТЗЧ, полученного с использованием программы OMERE [4] для геостационарной орбиты.

Кроме изотропного случая рассматривался также направленный поток ионов. В этом случае для подсчета множественности сбоев использовались ионы с энергиями, указанными в табл. 4. В ней значения энергии тяжелых заряженных частиц обеспечивают при нормальном падении (0°) значения ЛПЭ

в диапазоне от 5 до 120 МэВ·см^2/мг вблизи поверхности микросхемы памяти и пробег ТЗЧ в кремнии более 30 мкм [3]. При падении ТЗЧ под углом 90° на ИС значения энергии выбирались таким образом, чтобы длина трека иона в ИС превышала поперечные размеры микросхемы. Отметим, что при направленном потоке ионов алюминиевый защитный корпус исключался из расчетов.

Для сравнения выше рассмотренных моделей ЧО, а также определения корректности функционирования разработанной на основе библиотеки GEANT4 программы моделирования ОРЭ в ИС, проводился расчет сечения ОС при нормальном падении ионов с характеристиками, приведенными в табл. 4. Результаты данного расчета для глубины ЧО, равной 1 мкм, продемонстрированы на рис. 3. На нем приведено распределение Вейбулла (5) и значения сечений, оцененных с применением метода Монте-Карло. Очевидно, что полученные оценки сечений немного занижены (расхождение между расчетными и оцененными значениями сечения ОС не превосходит 5 %). Возможное объяснение такому эффекту заключается в том, что выделившейся в ИС энергии от одной ТЗЧ, движущейся в непосредственной близости от границы чувствительного объема, не достаточно для возникновения ОС, поскольку только часть этой энергии поглощается в ЧО, а другая – за ее пределами.

Таблица 4

Характеристики тяжелых ионов

Тип иона	Энергия иона, МэВ	
	Угол падения на ИС: 0°	Угол падения на ИС: 90°
Ne	75	2750
Ar	155	6500
Kr	280	20000
Xe	390	39000
U	1300	80000

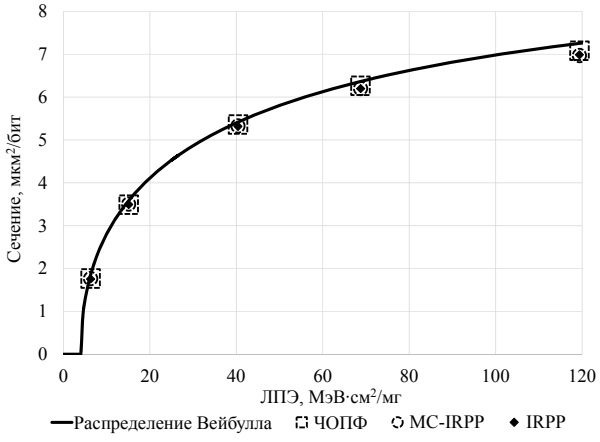


Рис. 3. Зависимость сечения сбоев от ЛПЭ. Глубина ЧО: 1 мкм. Для глубины ЧО, равной 2 мкм, зависимость сечения сбоев от ЛПЭ является аналогичной

Из данных, представленных на рис. 3, следует еще один важный вывод: все модели чувствительной области предсказывают одинаковые значения сечения (следовательно, и идентичное число сбоев). Это значит, что экспериментально определить корректность рассмотренных моделей при нормальном падении ионов на интегральную схему не представляется возможным.

При падении ионов под углом 90° (параллельное падение) к верхней поверхности ИС возникает значительное количество кратных сбоев (десятки и даже сотни сбоев от одного иона), хотя количество однократных сбоев все же превалирует. Такой вывод следует из результатов, представленных на рис. 4.

Если оценка сечения сбоя при нормальном падении ТЗЧ приблизительно одинакова по всем моделям ЧО, то при распространении ионов параллельно поверхности ИС могут наблюдаться отличия (особенно для ионов Kr, Xe, U). На рис. 5 приведены оцененные сечения для случая 90°.

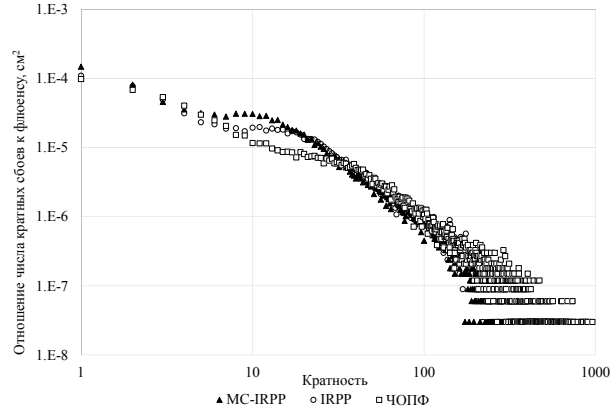


Рис. 4. Отношение числа кратных сбоев от иона Kr к флюенсу. Глубина ЧО = 1 мкм. Угол падения: 90°. Энергия Kr: 20000 МэВ

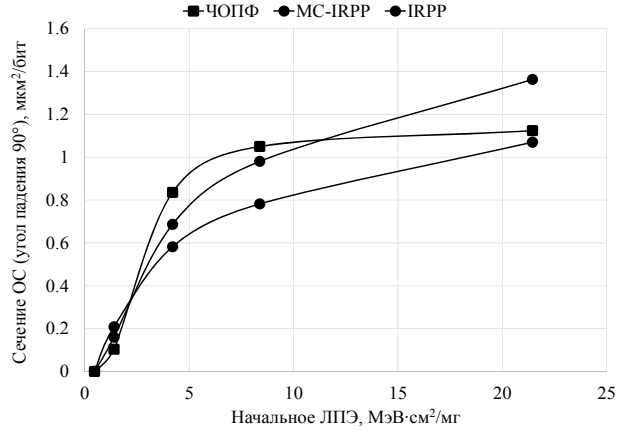


Рис. 5. Оценка сечения ОС по разным моделям ЧО. Угол падения: 90°. Глубина ЧО: 1 мкм

При изотропном потоке ТЗЧ описанные в данной работе модели ЧО прогнозируют заметный вклад кратных сбоев по сравнению с числом однократных ОС, который составляет приблизительно

10–15 % при $k = 1$ и 2 мкм в зависимости от типа модели. Такой вывод сделан на основе данных, приведенных на рис. 6, на котором представлены оценки частоты кратных сбоев в ИС.

Общая частота ОС, оцененных по этим моделям с использованием GEANT4 и OMERE, отображена в табл. 5. Очевидно, что оценка частоты событий по модели MC-IRPP в 1,5–1,7 раз превышает прогнозы остальных моделей.

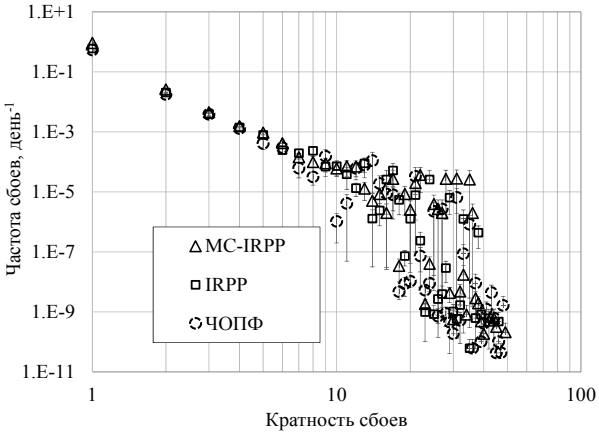


Рис. 6. Частота сбоев в ИС в зависимости от кратности. Глубина ЧО: 1 мкм

Таблица 5

Общая частота сбоев в микросхеме памяти, день$^{-1}$

Глубина ЧО, мкм	1		2	
Модель / Программное средство	OMERE	GEANT4	OMERE	GEANT4
MC-IRPP		1,01		0,67
IRPP	0,62	0,67	0,36	0,39
ЧОПФ		0,60		0,40

Заключение

Из результатов проведенных расчетов частоты ОС сделаны следующие выводы:

– оценка частоты ОС является модельно зависимой. При одной и той же экспериментальной зависимости сечения от ЛПЭ данная оценка зависит от типа модели ЧО и от значений ее параметров (глубины ЧО);

– при падении ионов под углом 90° к поверхности ИС все без исключения модели предсказывают значительное число кратных сбоев (несколько десятков и сотен от отдельной ТЗЧ);

– для случая изотропного потока ионов наблюдался заметный вклад кратных сбоев (10–15 % от числа однократных событий) в микросхеме памяти.

Литература

1. Чумаков А. И. Действие космической радиации на интегральные схемы. – М.: Радио и связь, 2004. С. 320.

2. Зебрев Г. И. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах высокой степени интеграции. М.: НИЯУ МИФИ, 2010. С. 148.

3. Гаганов В. В., Грунин А. В., Дроздов И. Ю., Игнатов К. А., Киселев Ф.К., Крылевский Е. Н., Кудрявцев Ю. Г., Лазарев С. А., Музюкин К. М., Силаев А. В., Цыганков Б. В., Петрикович Я. Я., Гусев В. В., Мироненко Л. П. Методические особенности обработки результатов испытаний микросхемы памяти на воздействие отдельных тяжелых заряженных частиц / II российско-белорусская научно-техническая конференция им. О. В. Лосева «Элементная база отечественной радиоэлектроники: импортозамещение и применение» // Труды, 2015. С. 119 – 125.

4. www/trad.fr/ru/космос/по-omere/

НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ ВЗРЫВНЫХ РЕЖУЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ДЕМОНТАЖА ОСНОВАНИЙ МОРСКИХ НЕФТЕГАЗОВЫХ СООРУЖЕНИЙ

А. Н. Катыков, Е. В. Артемчук, А. М. Васильев, И. В. Занегин, Д. Е. Зотов, М. П. Калинин, И. В. Шиберин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

В последние десятилетия в связи с прекращением функционирования расположенных на морском шельфе нефтегазопромысловых сооружений – морских стационарных платформ (МСП), остро встает вопрос об их демонтаже и последующей утилизации. Подавляющая часть МСП являются сооружениями свайного типа, поэтому основная сложность при их демонтаже связана с разборкой и извлечением из моря (с глубин до 200 м) их оснований – опорных блоков, состоящих из металлических свай и связей, формирующих в подводной части жесткие каркасные конструкции, способные противостоять подводным течениям и волнениям на море.

Существующие на сегодняшний день технологии резки силовых элементов опорных блоков МСП (резка алмазными канатами, орбитальными дисковыми резаками, абразивной резкой SABRE) [1], с учетом специфики работ в морской среде на значительных глубинах, в большинстве своем являются трудоемкими и дорогостоящими. Перспективным в этом плане является применение взрывных технологий, обладающих перед традиционными способами резки рядом преимуществ, основным из которых является снижение времени проведения демонтажных работ.

При помощи взрывных технологий решается задача одновременной, либо последовательной резки металлических свай – толстостенных трубчатых конструкций диаметром от 540 до 1500 мм, с толщиной стенки от 20 до 50 мм. В зависимости от техпроцесса демонтажа, разрабатываемого индивидуально для каждой МСП, резка свай может производиться как снаружи, так и изнутри (условия подрезки свай у морского дна, когда рез сваи должен производиться на 1,5–3 м ниже уровня морского дна).

Взрывная резка металлических конструкций под водой может осуществляться несколькими методами. На сегодняшний день наиболее распространенным и известным является метод взрывной резки конструкций удлиненными (или линейными) кумулятивными зарядами (УКЗ) [2].

УКЗ представляет собой заряд бризантного ВВ, заключенный в тонкостенную медную оболочку с профилированной кумулятивной выемкой. Они используются для разрезания объектов в заданном сечении, с исключением откольных явлений на тыльной стороне преграды. Технические характеристики серийно выпускаемых УКЗ позволяют проводить резку металлоконструкций с толщиной преграды до 25 мм стали. При разрезании и разрушении металлоконструкций, без предъявления требований к качеству поверхности кромки реза, применяются шнуровые кумулятивные заряды [3], заряды эластичные кумулятивные удлиненные [2] и заряды кумулятивные линейные баллиститные [4], способные разрушать преграды из сталей толщиной до 60 мм. Существенным недостатком для всех типов кумулятивных зарядов при их применении в водной среде является обязательное обеспечение изолированности зоны формирования кумулятивной струи.

Помимо этого использование УКЗ различных типов для фрагментации толстостенных (более 25 мм) стальных конструкций малоэффективно, так как связано с изготовлением специальных дорогостоящих зарядов, содержащих большое количество ВВ, срабатывание которых оказывает интенсивное фугасное воздействие на окружающую обстановку и требует применения защитных мероприятий.

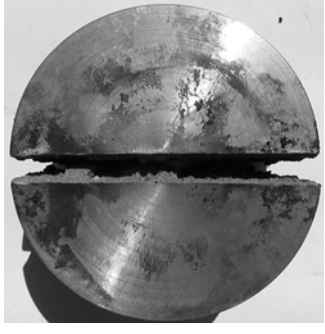
Взрывная резка ударными волнами разрежения

Основные задачи по повышению безопасности и экономической эффективности, путем уменьшения количества ВВ при разрезании стальных конструкций толщиной более 30 мм, как на воздухе так и в водной среде, успешно решаются при помощи взрывных устройств, в основе работы которых находится взаимодействие ударных волн разрежения (УВР) [5].

Впервые к разработке таких взрывных устройств РФЯЦ-ВНИИЭФ приступил с середины 90-х годов прошлого века. В рамках конверсионной деятельности были разработаны взрывные режущие устройства (ВРУ), принцип действия которых основан на генерации и взаимодействии в стальных преградах ударных волн разрежения. Причиной образования УВР в железе является наличие аномального участка адиабаты разгрузки в области фазового перехода (α-Fe$\Leftrightarrow\varepsilon$-Fe). Явление образования УВР зарегистрировано как открытие в 1986 г. [6]. При взаимодействии двух УВР растягивающие напряжения возникают в очень узкой зоне материала, определяемой шириной фронта УВР, что приводит к образованию «гладкой» поверхности откола. Подобный ха-

рактер носит откольное разрушение в стальной пластине при столкновении (взаимодействии) на ее поверхности двух встречных детонационных волн распространяющихся в слое взрывчатого вещества, размещенном в контакте с поверхностью стальной пластины (см. рис. 1). Образование гладкого откола инициирует возникновение и распространение вглубь пластины хрупкой трещины, проходящей через линию встречи детонационных волн, способной разделять очень толстые стальные преграды.

а



б

в

Рис. 1. Продольная резка стального цилиндра ∅ 120×100 мм: а – заряд 140×140×4 мм из ТГ5/5, б – разделенный цилиндр, в – сечение реза

Аналогичное явление происходит и в сплошном цилиндрическом образце или толстостенной трубе, если встречные детонационные волны инициировать в кольцевой полосе взрывчатого вещества, наклеенного на поверхности цилиндра.

При резке стальных конструкций, с толщиной стенки более 20 мм, используемое во ВРУ количество взрывчатого вещества в несколько раз меньше, чем при других известных способах взрывной резки металла, в частности, при использовании УКЗ. Это в большинстве случаев позволяет уложиться в экологические нормативы, устанавливаемые в ряде стран для выполнения взрывных работ на морском шельфе.

Первая продуктовая линейка автономных ВРУ для демонтажа свай МСП создана в серии международных контрактов с фирмой Halliburton (США) (см. рис. 2).

2001–2004 гг. – проект МНТЦ № В506099 – разработка внутреннего резака УВР-660 для стальных свай ∅ 762×51 мм (Бронзовая медаль на Женевском салоне 2008 г., патент RU 2204689).

2006–2009 гг. – проект МНТЦ № 3362р – разработка наружного резака НКС-2 для стальных свай ∅ 762×51 мм (1-е место Нижегородская ярмарка 2008 г. патент RU 2270681).

В последние годы в РФЯЦ-ВНИИЭФ с использованием современной расчетно-вычислительной базы, проводилась разработка нового поколения экологически безопасных ВРУ, предназначенных для подводного демонтажа толстостенных стальных опор МСП. Это поколение ВРУ адаптировано под использование промышленных взрывчатых составов и средств инициирования, обладает высокой степенью модернизируемости за счет применения аддитивных технологий.

ВРУ представляет собой кольцевое устройство монтируемое на сваю по наружной или внутренней поверхности (см. рис. 3).

ВРУ состоит из 4…12 сегментных зарядов (длина дуги основания одного сегментного заряда l = = 250 – 320 мм, ширина h = 150…200 мм), изготавливаемых под конкретный диаметр демонтируемой сваи по технологии 3D печати. Сегментный заряд снаряжается промышленным составом взрывчатого вещества (эластичный состав на основе гексогена). Зазоры между соседними сегментами (5÷30 мм) позволяют компенсировать наличие одного или двух сварных соединений и наличие возможных деформаций сваи.

Монтаж сегментных зарядов на поверхность сваи осуществляется водолазом. Место монтажа ВРУ, кольцевой фрагмент сваи (h+100 мм), предварительно очищается от морского обрастания. Фиксация сегментных зарядов на стальной поверхности осуществляется при помощи магнитных держателей. Инициирование зарядов осуществляется от разводки из последовательно соединенных безопасных электродетонаторов.

Для наглядного примера работы ВРУ на рис. 4 представлены фотографии с модельного эксперимента по поперечной резке фрагмента сваи – стальной трубы ∅ 762×45 мм длиной 900 мм, размещенной внутри деревянного короба 1500×1500×1500 мм заполненного водой. Масса взрывчатого вещества в эксперименте составила ~10 кг в тротиловом эквиваленте, что почти в 2 раза меньше массы заряда УКЗ-Л (~19,5 кг в тротиловом эквиваленте) [2], разработки НИИ проблем конверсии и высоких технологий при Самарском ГТУ, необходимого для резки данной трубы на воздухе.

В таблице представлены основные технические характеристики нового поколения ВРУ.

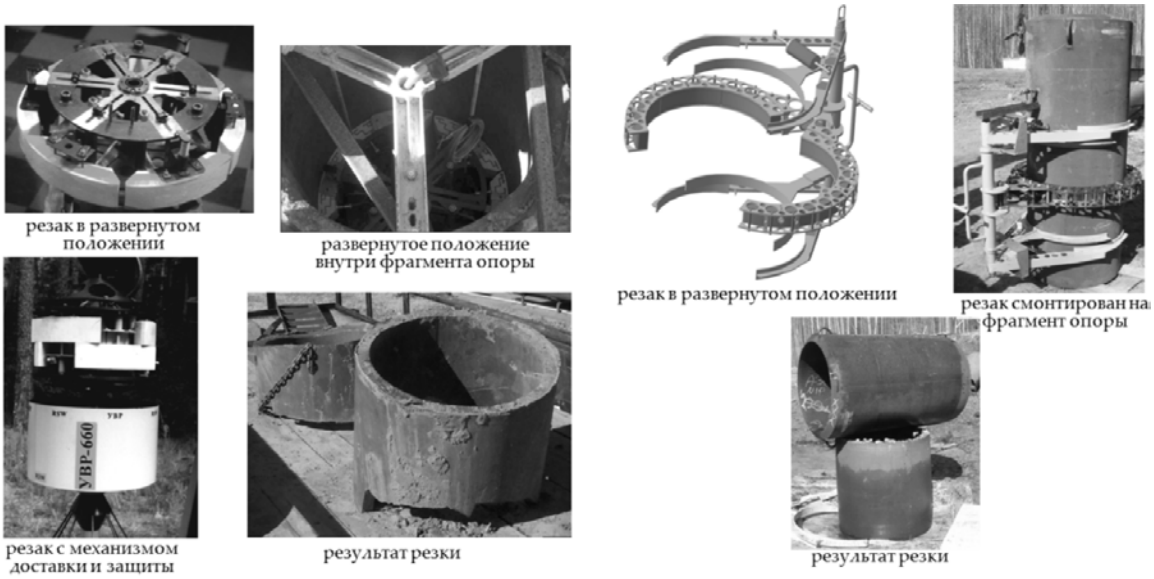


Рис. 2. Автономные ВРУ для резки стальных свай ∅ 762×51 мм: а – взрывной резак УВР-660 для внутренней резки, б – взрывной резак НКС-2 для наружной резки

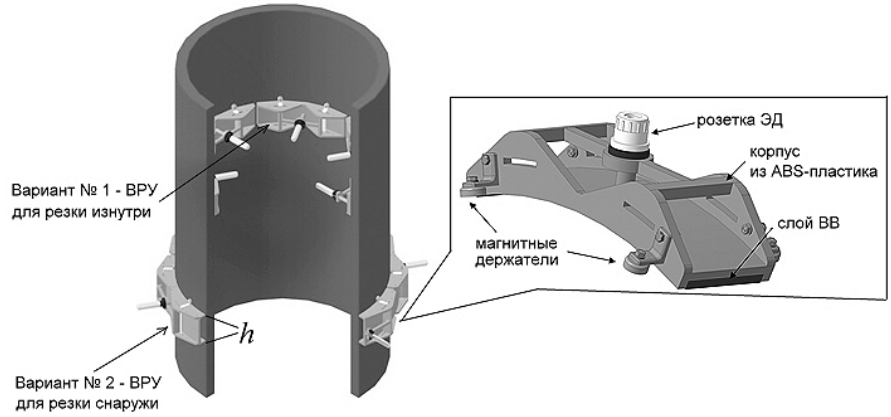


Рис. 3. Эскиз размещения ВРУ нового поколения на свае

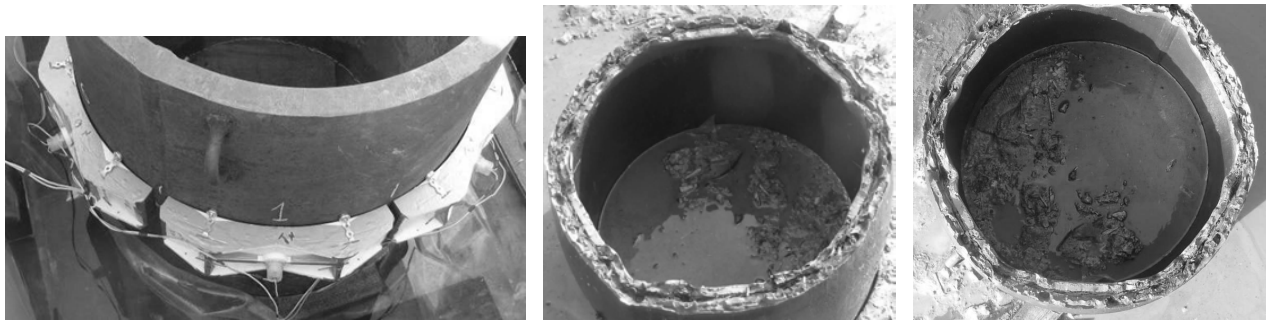


Рис. 4. Модельный эксперимент по взрывной резке стальной трубы ∅ 762×45 мм: а – сегментные заряды на трубе, б – общий вид кромки реза нижней части, в – общий вид кромки реза верхней части

Основные технические характеристики нового поколения ВРУ

Тип	Диаметр сваи, мм	Толщина стенки сваи, мм	Масса ВВ в ВРУ, кг/м	Количество сегментов, шт.
Наружное ВРУ	200–1500	20–50	1,5–3,2	4–12
Внутреннее ВРУ	600–1500	20–50	1–2,1	6–10

Отработка технология применения ВРУ, в условиях приближенных к реальным, осуществлялась на комплексе для подводных взрывных исследований ИФВ при проведении резки стальной трубы ∅ 720×20 мм под водой.

Использование ВРУ разработки РФЯЦ-ВНИИЭФ позволит сократить время проведения демонтажных работ и, как следствие, значительно снизить затраты на использование вспомогательного флота в процессе утилизации свайного основания МСП.

Заключение

В РФЯЦ-ВНИИЭФ на базе современных технологий разработаны ВРУ, предназначенные для демонтажа силовых элементов опорных оснований МСП стальных толстостенных трубчатых конструкций. Преимуществами ВРУ нового поколения являются простота установки и высокая эффективность реза металлоконструкций под водой, с использованием меньшего количества ВВ, чем у существующих аналогов.

Следует оговориться об ограниченности применения ВРУ нового поколения на основе УВР только для разделения стальных преград на основе α-железа.

Литература

1. Петушков В. Г. Применение взрыва в сварочной технике // Киев: Наукова Думка, 2005. С. 754.

2. Аттетков А. В., Гнуськин А. М., Пырьев В. А., Сагидуллин Г. Г. Резка металлов взрывом // Москва: СИП РИА, 2000. С. 260.

3. Заряд кумулятивный шнуровой. Технические условия ТУ 84-988-84.

4. Заряд кумулятивный линейный баллиститный. Технические условия ТУ 3-402-50-90.

5. Новиков С. А. Взрывные технологии и конверсия // ВАНТ. Сер. Импульсные реакторы и простые критические сборки. 1994. Вып. 2. С. 40–47.

6. Зельдович Я. Б., Иванов А. Г., Новиков С. А. и др. Диплом № 321. МКИ 42Д 3/00-3/06.

7. Кудинов В. М., Коротеев А. Я., Волгин Л. А. и др. Опыт применения подводной резки взрывом при демонтаже трубчатых оснований морских стационарных платформ // Автоматическая сварка. 1987. № 6. С. 27–29.

ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ПРОВОДЯЩЕЙ СРЕДЫ ИСКРОВОГО И ДУГОВОГО РАЗРЯДОВ В ВАКУУМНОМ РАЗРЯДНИКЕ

А. А. Козлов

ФГУП «ВНИИА им. Н. Л. Духова», Москва

В работе проводились измерения параметров искрового и дугового разрядов в макете вакуумного искрового разрядника. Наблюдалась анизотропия разлета плазмы и немонотонная зависимость задержки основного разряда в вакуумном разряднике от давления и расстояния между электродами. Обнаружено явление возникновения микроразрядов по поверхности диэлектрика, предшествующих пробою, в узле поджига.

Введение

Цель настоящей работы – изучение физических процессов, протекающих в малогабаритных вакуумных искровых разрядниках, которые оказывают решающее влияние на ключевые параметры указанных приборов. К таким процессам можно отнести: развитие пробоя и искрового разряда по поверхности диэлектрика в вакууме, формирование дугового разряда в вакуумном промежутке, воздействие разряда на поверхность электродов и диэлектрика в узле поджига. В рамках поставленной цели решались следующие задачи. Во-первых, измерение электронной температуры и концентрации плазмы, эмитируемой из искрового разряда по поверхности диэлектрика в узле поджига разрядника в различных направлениях; оценить возможность использования в дальнейших экспериментах метода интерферометрии когерентного излучения импульсного источника для исследования динамики пространственной структуры плазмы разряда. Во-вторых, исследовать зависимость времени задержки основного разряда в макете разрядника с разделенным катодом от давления остаточных газов и расстояния от узла поджига до основного разрядного промежутка. В-третьих, осуществить скоростную фотосъемку разряда в макете разрядника с двойным катодом с целью изучения пространственной структуры разряда при различной полярности и величине потенциала анода разрядника.

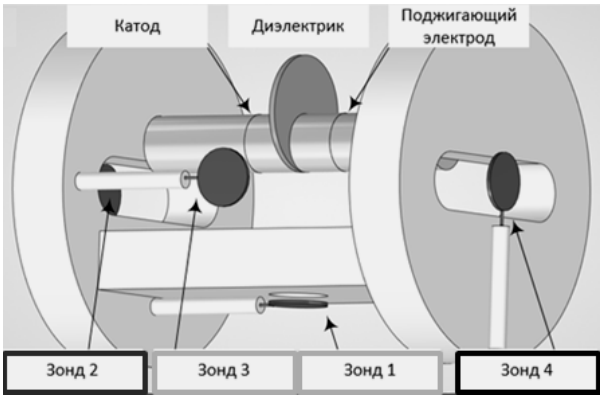
Зондовые измерения параметров плазмы искрового разряда

На начальном этапе исследований было решено экспериментально определить направленность в пространстве и провести оценку параметров потоков плазмы, генерируемой исключительно в узле поджига (рис. 1а). В пространстве вокруг узла поджига были размещены четыре плоских одиночных зонда Ленгмюра. Сигналы с зондов снимались при помощи осциллографа. Давление остаточного газа – 10^{-3} Па.

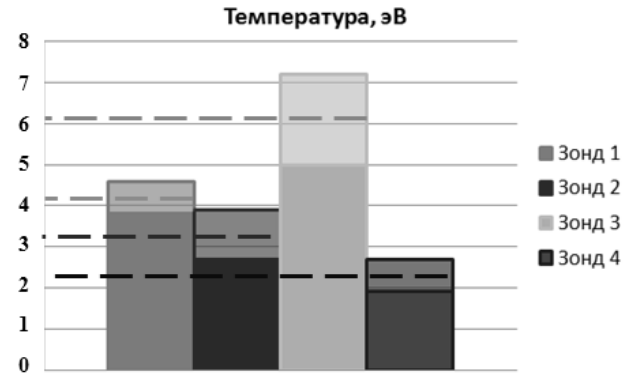
Анализ полученных результатов показал следующее. Наибольшая температура плазменного потока (рис. 1б) зафиксирована в направлении, касательном к поверхности диэлектрика и ортогональном оси симметрии разрядного устройства (зонд № 3). Как видно (рис. 1в,г), разлет плазмы искрового разряда по поверхности диэлектрика вдоль оси симметрии разрядного устройства происходит симметрично (зонды № 2 и 4) и не зависит от направления приложенного электрического поля, т. е поток ускоренных полем заряженных частиц незначителен по сравнению с потоком частиц образующейся плазмы.

Что касается плазменных потоков, эмитируемых в плоскости, перпендикулярной оси симметрии, то разлет явно носит неизотропный характер: преимущественно заряженные частицы летят по нормали к поверхности диэлектрика (зонд № 1). Корпускулярный поток в направлении, близком к касательной к поверхности диэлектрика, заметно меньше (зонд № 3), в этом же направлении наблюдается максимальная температура плазмы.

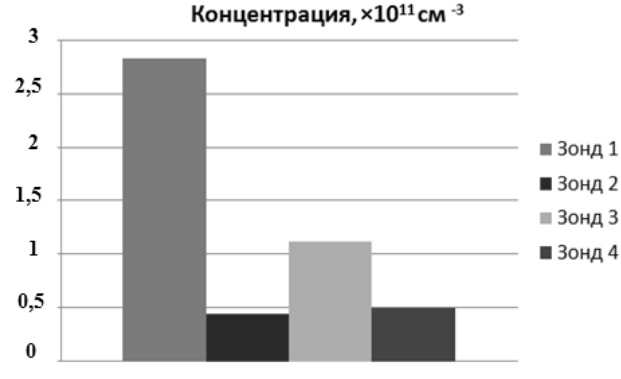
Исходя из того обстоятельства, что концентрация частиц в процессе разлета плазмы убывает обратно пропорционально квадрату расстояния [1], мы можем оценить, что при размере первоначального сгустка ~0,1 мм (характерный размер катодного пятна) концентрация электронов составит ~10^{17} $см^{-3}$, т. е. окажется достаточной для создания заметного набега фазы зондирующего излучения оптического



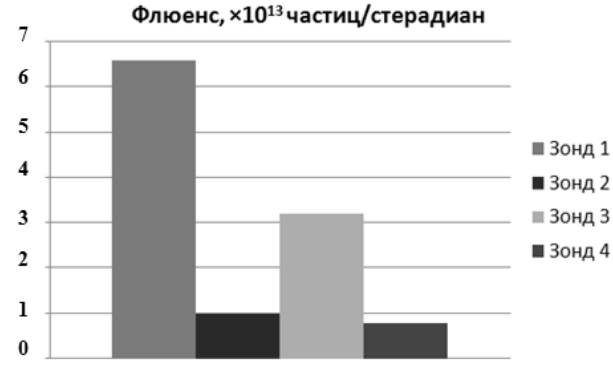
а



б



в



г

Рис. 1. Исследовательский макет и диаграммы распределения измеренных параметров: а – макет разрядного устройства с зондами Ленгмюра; б – диаграмма средней по времени температуры; в – диаграмма концентрации; г – диаграмма флюенсов электронов

диапазона. Таким образом, применение интерферометрии, планируемой в качестве метода визуализации для исследования таких объектов, как плазма катодного и анодного пятен [1], с использованием излучения импульсного лазера с наносекундной длительностью импульса может быть эффективным.

Изучение микроразрядов

В процессе зондовых исследований искрового разряда по поверхности диэлектрика при отрицательной полярности поджигающего импульса, было обнаружено явление, суть которого состоит в том, что зонд фиксировал поток электронов до возникновения искрового разряда (рис. 2). Синхронно с регистрацией предваряющего пробой потока электронов наблюдался резкий, но небольшой порядка 200 В, провал на фронте возрастающего потенциала поджигающего электрода, что свидетельствовало о развитии микроразряда по поверхности диэлектрика.

На рис. 2 представлена осциллограмма сигнала с зонда, фиксирующего микропробой, предшествующий основному разряду, верхний луч – сигнал с зонда, нижний луч – поджигающий импульс напряжения. Развертка: 100 нс/дел.

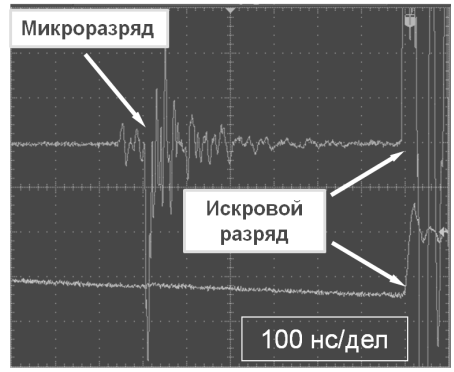


Рис. 2. Осциллограмма сигнала с зонда

Используя полученные осциллограммы микроразрядов (рис. 2) и предположив, что разлет частиц микроразряда – изотропный в полусферу, можно рассчитать некоторые параметры микроразряда. Например, оценить энергию микроразряда $W_{\text{микр}}$, зная электроемкость конденсатора, образованного диэлектрической шайбой (с площадью $S = 2 \cdot 10^{-5}$ м^2 и толщиной $d = 10^{-4}$ м) и двумя электродами, а также напряжение U (2,5 кВ) в промежутке катод – поджигающий электрод на момент начала протекания микроразряда и падение напряжения ΔU (200 В), вызванное микроразрядом:

$$C_{\text{диэл}} \approx \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d} \approx 10^{-11}\,\Phi. \qquad (1)$$

$$W_{\text{микр}} = \frac{C_{\text{диэл}}U^2}{2} - \frac{C_{\text{диэл}}(U-\Delta U)^2}{2} =$$

$$= \frac{C_{\text{диэл}}U^2}{2} - \frac{C_{\text{диэл}}U^2}{2} + C_{\text{диэл}}U\cdot\Delta U - \frac{C_{\text{диэл}}\Delta U^2}{2} =$$

$$= C_{\text{диэл}}U\cdot\Delta U = 5\cdot10^{-6}\ \text{Дж}. \qquad (2)$$

Количество электронов, участвовавших в процессе переноса заряда с одной обкладки конденсатора емкостью $C_{\text{диэл}}$ на другую его обкладку, т. е. электрод:

$$N_{\text{ток}} \approx \frac{C_{\text{диэл}}\Delta U}{e} \approx 10^{10}, \qquad (3)$$

где e – заряд электрона. Энергия, переносимая данными электронами между обкладками конденсатора, близка к энергии микроразряда $W_{\text{микр}}$:

$$N_{\text{ток}}Ue \approx 4\cdot10^{-6}\ \text{Дж}. \qquad (4)$$

Далее можно оценить энергию, по-видимому, необходимую для инициирования искрового пробоя по поверхности диэлектрика $W_{\text{пробоя}}$, когда происходит короткое замыкание емкости $C_{\text{диэл}}$:

$$W_{\text{пробоя}} = \frac{C_{\text{диэл}}U2}{2} = 20\cdot10^{-5}\ \text{Дж}. \qquad (5)$$

Как видно, энергия, необходимая для пробоя по поверхности диэлектрика, заметно больше энергии микроразряда, поэтому пробой и не происходил. Полную энергию, выделяющуюся в нашем случае в искровом разряде по поверхности диэлектрика, можно оценить как:

$$W_{\text{искр}} \approx I\langle U\rangle\Delta t_{\text{искр}} \approx 3\cdot10^{-4}\ \text{Дж}, \qquad (6)$$

где I – максимальная сила тока в искровом разряде, $\langle U\rangle$ – среднее напряжение и $\Delta t_{\text{искр}}$ – продолжительность протекания основного импульса тока.

Количество электронов, эмитируемых микроразрядом $N_{\text{эл.микр}}$, можно оценить, предполагая их разлет изотропным в полусферу: исходя из количества электронов, попавших на зонд $N_{\text{эл.зонд}}$ (из осциллограммы рис. 18б), и, зная расстояние от точки протекания разряда до зонда l = 7 см и радиус зонда r = 1 см:

$$N_{\text{эл.зонд}} \approx \frac{I_{\text{зонд}}\cdot\Delta t_{\text{зонд}}}{2e} \approx 10^{10}. \qquad (7)$$

$$N_{\text{эл.микр}} = N_{\text{эл.зонд}}\frac{l^2}{\pi r^2} = 10^{12}. \qquad (8)$$

где $I_{\text{зонд}}$ – максимальный ток электронов на зонд от микроразряда, $\Delta t_{\text{зонд}}$ – продолжительность импульса тока электронов на зонд (по основанию).

Рассчитанные для микроразряда величины интересно сравнить с параметрами известного в физике вакуумного разряда объекта – эктона. Эктон – это элементарный центр взрывной эмиссии электронов, представление о котором лежит в основе теории искрового и дугового разряда в вакууме, предложенной Г. А. Месяцем. Согласно данным, приводимым Месяцем Г. А., энергия эктона, образующегося в результате электрического взрыва микроострия на поверхности металлического электрода, составит $W_{\text{эктона}} = (5-7)\cdot10^{-7}$ Дж, а количество электронов, испускаемых эктоном, $N_{\text{эл.электрона}} = 5\cdot10^{11}$ частиц. Следует отметить, что в своей расчетной модели автор не учитывал протекания некоторых физических процессов и потому энергия, необходимая для рождения эктона, занижена.

Действительно, если мы возьмем среднюю энергию испускаемых из микроразряда электронов из проведенных измерений электронной температуры (предположив, что в микроразряде достигается та же температура, что и в искре ~5 эВ) и умножим на общее число испущенных из микроразряда электронов, то получим величину ~$8\cdot10^{-7}$ Дж, что близко к величине, приводимой Месяцем Г. А. Но, если мы добавим энергию, необходимую для образования плазмы, учтя, по крайней мере, ионизацию первоначально нейтральной среды, то уже получим величину ~$1\cdot10^{-6}$ Дж, что с учетом энергии, переносимой электронами между обкладками конденсатора емкостью $C_{\text{диэл}}$, существенно ближе к ранее полученной нами оценке энергии микроразряда.

Кстати, на осциллограммах сигнала с зонда импульсу тока, соответствующего приходу на зонд потока электронов, предшествует наводка продолжительностью $\tau_{\text{прол}}$ = 50 нс. Если мы предположим, что наводка создается самим потоком электронов, распространяющимся в пространстве, то скорость регистрируемых электронов составит $1{,}4\cdot10^6$ м/с, а кинетическая энергия ~ 6 эВ, что свидетельствует в пользу выше приведенной оценки полной энергии испущенных из микроразряда электронов.

Количество эмитируемых электронов хорошо согласуется с величиной, приводимой Месяцем Г. А. Более того, если взять для сравнения еще один параметр – время жизни эктона $t_{\text{ж.эктона}} = 20$ нс, и сравнить его с регистрируемой продолжительностью потока электронов из микроразряда на зонд $t_{\text{сигн}} = (20-30)$ нс, можно заметить, что эти времена практически совпадают.

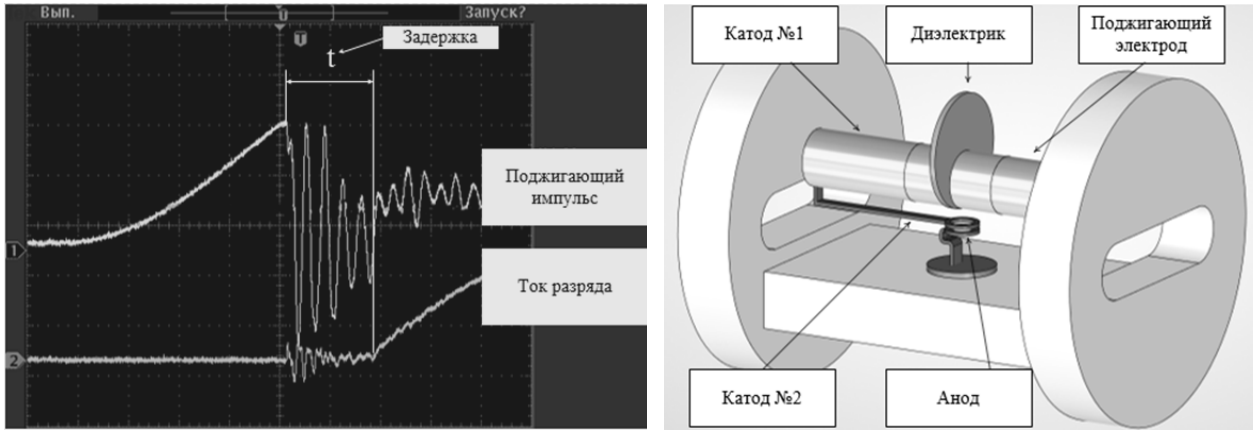
По всей видимости, нам удалось зафиксировать самопроизвольное рождение единичных эктонов.

Зависимость времени задержки от давления газа и расстояния от узла поджига

Важный параметр разрядника – время задержки между моментом подачи управляющего импульса напряжения на поджигающий электрод и началом протекания коммутируемого тока через разрядник (рис. 3а). Изменяя давление в вакуумной камере и расстояние между узлом поджига и основным разрядным промежутком, наблюдали, как изменяется при этом время задержки в разряднике с двойным катодом (рис. 3б).

По полученным в этих экспериментах данным, была построена зависимость (рис. 4) задержки возникновения дугового разряда от давления остаточных газов при различных расстояниях от узла поджига до основного разрядного промежутка (катод № 2 – анод). На графике (рис. 4) можно выделить два характерных набора точек: для расстояния 0,25 см (задержка ~0,1 мкс) и для расстояний ≥ 0,4 см (задержка ~1 мкс). Наблюдаемые задержки невозможно объяснить только движением плазмы из узла поджига (скорость плазмы ~10^4 м/с).

Возможным фактором, обуславливающим возникновение разряда в промежутке катод № 2 – анод, может являться эмиссия из искрового разряда в узле поджига излучения и электронов, которые ионизуют остаточный газ. На малых расстояниях плотность потока излучения и электронов (скорость ~10^6 м/с) велика и обеспечивает высокую степень ионизации и быстрое возникновение дугового разряда. С ростом расстояния плотность потока падает, первоначально возникает слаботочный разряд, например, объемный тлеющий, который со временем в результате развития ионизационно-перегревной неустойчивости претерпевает самопроизвольную контракцию, т. е. сжатие канала тока, и переходит в дуговой.



а б

Рис. 3. Иллюстрация методики измерения и исследовательский макет: а – методика измерения временной задержки; б – макет разрядного устройства с двойным катодом

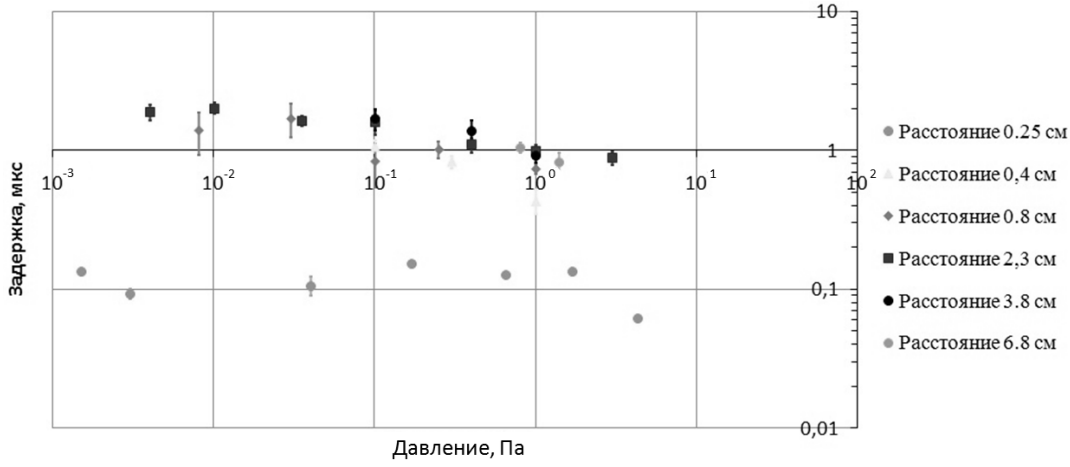
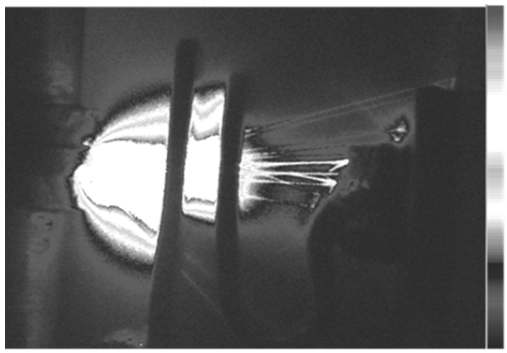


Рис. 4. Зависимость задержки возникновения дугового разряда от давления остаточных газов при различных расстояниях от узла поджига до основного разрядного промежутка (в логарифмическом масштабе)

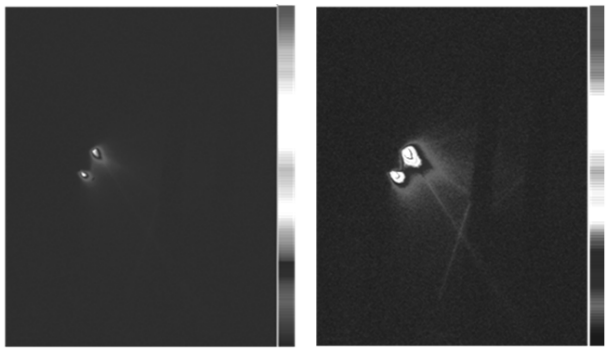
Скоростная фотосъемка разряда

Изучение пространственной структуры разряда было решено начать с фотосъемки при помощи фотокамеры с малой экспозицией.

Эксперименты проводились при давлении 10^{-4} мбар, с экспозицией 60 мкс, при разных полярностях потенциала, подаваемого на анод в системе с двойным катодом (рис. 3б). Оказалось, что факт зажигания разряда зависит от полярности прикладываемого к электродному промежутку напряжения. При отрицательной полярности «анода» разряд в основном разрядном промежутке загорался крайне редко (рис. 5б).



а



б в

Рис. 5. Фотографии разряда при различной полярности потенциала анода: а – потенциал анода: +100 В; б – потенциал анода: –100 В; в – потенциал анода: –100 В, повышенный контраст изображения

В связи с этим, можно сделать вывод о том, что в развитии разряда основную роль играют потоки электронов, эмитируемые узлом поджига. По-видимому, при отрицательном потенциале анода электронам не удается попасть в основной разрядный промежуток и осуществить ионизацию остаточного газа. Следует отметить, что в некоторых случаях разряд все же загорается, по всей видимости, благодаря ионизирующему действию излучения инициирующего разряда.

В экспериментах был замечен разлет макрочастиц из узла поджига, причем направление их разлета зависит от полярности прикладываемого напряжения. По-видимому, они обладают отрицательным зарядом. Это можно объяснить тем, что, попадая в плазму разряда, любое проводящее тело приобретает отрицательный заряд из-за того, что подвижность электронов плазмы больше, чем подвижность ионов. В конце своего пути частицы испытывают столкновение с поверхностью анода, вследствие чего можно наблюдать эффект, напоминающий расплескивание капли жидкости при столкновении с твердой поверхностью. В связи с этим можно сделать вывод о том, что макрочастицы – это капли жидкого металла катода № 1.

Заключение

1. Методом электростатического зонда Ленгмюра для плазмы искрового разряда по поверхности диэлектрика определены температура и концентрация плазмы, эмитируемой в различных направлениях. Показана перспективность использования интерферометрии для изучения динамики пространственной структуры катодного и анодного пятна.

2. Обнаружено явление возникновения микроразрядов по поверхности диэлектрика в узле поджига, предшествующих пробою. На основе анализа результатов эксперимента сделан вывод о том, что зафиксировано самопроизвольное рождение единичных эктонов – элементарных центров взрывной электронной эмиссии.

3. Обнаружены свидетельства определяющей роли излучения и потоков электронов инициирующего разряда в формировании проводящей среды разряда в основном коммутируемом промежутке при давлениях остаточного газа $10^{-3} – 10^{2}$ Па.

4. Методом скоростной фотосъемки установлено присутствие в разряде заряженных макрочастиц - капель жидкого металла материала катода. Продемонстрирована определяющая роль потока электронов из инициирующего разряда в формировании проводящей среды разряда в основном коммутируемом промежутке при давлениях остаточного газа 10^{-2} Па.

Литература

1. Месяц Г. А. Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. М.: Мир, 2000. С. 424.

ВЛИЯНИЕ ИОННОГО АССИСТИРОВАНИЯ НА ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

Е. В. Краев, И. С. Макогон

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Вступление

В современных оптическом приборостроении и лазерной технике применение оптических элементов с интерференционными покрытиями уже продолжительное время считается не просто нормой, а зачастую необходимостью. При различных конфигурациях тонких пленок можно получать просветляющие, отражающие, поляризационные покрытия, интерференционные фильтры и т. д. С развитием техники и методов нанесения тонких пленок существенно расширился диапазон материалов, применяемых для получения интерференционных покрытий. Также расширился арсенал устройств для испарения материала. В настоящее время наиболее распространенными материалами для получения интерференционных покрытий являются оксиды. В отличие от ранее применяемых материалов, оксиды обладают высокой механической прочностью, химической стойкостью, в том числе к воде. Чаще всего для нанесения тонких пленок оксидов применяют электронно-лучевой испаритель, поскольку он обеспечивает высокие скорости нанесения тонких пленок, работает в условиях высокого вакуума (10^{-8} – $8{\cdot}10^{-4}$ мБар) и гибко настраивается под технологические условия.

Для повышения адгезии и стимуляции роста оксидной пленки во время ее нанесения на подложку зачастую повышают температуру внутри вакуумной камеры. Обычно температура во время нанесения поддерживается на уровне 200–300 °С. Однако, не для всех видов используемых подложек возможно использование таких высоких температур. Также при остывании подложки после нанесения покрытия возможно появление термических напряжений в покрытии. Высокие температуры удаляют с поверхности адсорбированные газы. Подобное явление положительно сказывается на фазу подготовки к нанесению покрытия, так как уменьшается остаточное давление внутри вакуумной камеры. В процессе нанесения оксидных пленок необходима подача дополнительного кислорода в камеру для избегания эффекта недоокисления осаждаемой пленки. Высокие температуры подложки также не позволяют дополнительному кислороду задерживаться на поверхности подложки для эффективного окисления осаждаемой пленки.

Применение ионных источников в процессе нанесения тонких пленок избавляет сразу от нескольких недостатков термического метода стимуляции роста пленки. Ионы, обладающие высокой кинетической энергией, разогревают подложку (а в дальнейшем растущую пленку) только в поверхностном слое, не вызывая общего прогрева подложки. При работе ионного источника с использованием в качестве газа кислорода или смесей с ним позволяет пленке эффективней окисляться на поверхности подложки. Соответственно, после нанесения покрытия, оно менее подвержено эффекту появления дефектов после остывания (разница температур в 3–4 раза меньше). Значительно снижается шанс получения недоокисленных пленок.

Ключевым фактором в росте кристаллической пленки является подвижность адатомов. Ионный источник, благодаря поверхностному нагреву, повышает данную подвижность. Поскольку подвижность адатомов высокая, пленка растет равномерно по поверхности, с высокой адгезией к последовательно наносимому покрытию. Соответственно, пленка получается плотной, с малым количеством пустот. Плотность пленки влияет на ее оптические характеристики, например, показатель преломления. При производстве оптических покрытий показатель преломления пленки является основной величиной (также как и толщина пленки), вводимой в расчет итоговых характеристик оптического покрытия. В представленной работе рассмотрено влияние ионного ассистирования на оптические характеристики основных оксидных пленок, применяемых в настоящее время для производства оптических покрытий.

Ионный источник и его применение

Общий вид ионного источника, используемого в работе, представлен на рис. 1

Рис. 1. Общий вид ионного источника

Конструкция ионного источника предполагает получение потока ионов из газоразрядной плазмы. Реализованный механизм получения потока ионов позволяет получать пучки ионов с низкой энергией (100–300 эВ) для применения в процессе ионного ассистирования. Ионные источники, использующие другие методы получения ионных пучков, отличаются большими энергиями ионов, что негативно сказывается на качестве оптических покрытий, так как при больших энергиях ионов (от 500 эВ) реализуется режим ионного травления. При применении подобных источников для ионного ассистирования возможно удаления осажденного материала с подложки, затруднение роста пленки за счет выбивания атомов с поверхности, неравномерный рост пленки, рост дефектов.

Поток газа, контролируемый расходомером, поступает в ионный источник для зажигания газоразрядной плазмы. Энергия и плотность потока ионов задается и контролируется в автоматическом режиме заводским контроллером разряда. Поток газа, контролируемый расходомером, изменяется контроллером разряда для поддержания стабильных параметров ионного разряда.

Нейтрализация заряда происходит с помощью вольфрамовой нити. Нить располагается вблизи ионного пучка. Параметры нейтрализованного заряда наблюдаются контроллером нейтрализатора. При отсутствии или недостаточности нейтрализации заряда ионный пучок может изменить направление потока, на поверхности подложки могут возникнуть разрушения из-за электрического пробоя, происходит накопление заряда на поверхности подложки.

Условия и техника проведения эксперимента

Для проведения экспериментальных нанесений интерференционных пленок используется вакуумная напылительная система. В настоящее время наиболее распространенным методом нанесения оптических покрытий является электронно-лучевое вакуумное осаждение. Электронный пучок с заданной энергией сканирует поверхность тигля с материалом. Под воздействием электронного пучка температура материала поднимается до необходимой для получения давления паров, соответствующих технологическому процессу. Пары материала осаждаются на подложке, образуя тонкую пленку. Данный метод характеризуется высокими скоростями нанесения материалов, универсальностью применения для различных материалов, возможностью контроля наносимого покрытия методом кварцевого резонатора и оптическим монитором. Для нанесения тонких пленок были выбраны основные применяемые материалы – оксиды циркония, гафния и титана. Данные материалы применяются при создании интерференционных покрытий различных назначений – отражающие, просветляющие, поляризационные и т. д. В качестве образцов были выбраны полированные платины стекла К8.

Перед нанесением тонкой пленки вакуумная камера очищается от продуктов напыления, производится закладка материала в чистый тигель электронной пушки. В планетарную систему вращения помещается образец, предварительно очищенный в ультразвуковой ванне и ручной протиркой этиловым спиртом для удаления загрязнений и частиц абразива, оставшихся после изготовления подложки. Для оптического контроля помещается свидетель в устройство смены свидетеля, оптический монитор калибруется и при необходимости настраивается. Откачка вакуумной камеры производится с помощью безмасляного винтового насоса и криогенного насоса. Давление в камере контролируется с помощью широкодиапазонного вакуумметра. После откачки камеры до давления $1 \cdot 10^{-4}$ мБар включается прогрев, реализованный в виде кварцевых ламп суммарной мощностью 4,5 кВт. Камера и подложки прогреваются до температуры 200 °С для удаления адсорбированных газов с поверхности подложки и вакуумной арматуры. После прогрева производится ионная очистка пучком ионов с высокой энергией. На момент начала процесса нанесения тонкой пленки остаточное давление газов в камере не превышает $2 \cdot 10^{-5}$ мБар. Температура внутри камеры устанавливается на уровне 100 °С для избегания эффекта удаления дополнительно поступающего кислорода с поверхности подложки. В процессе нанесения контролируется скорость роста пленки, спектр отражения свидетеля, давление внутри камеры. Скорость роста пленки поддерживается в автоматическом режиме путем регулирования силы тока электронной пушки. Давление в камере поддерживается на одном уровне в автоматическом режиме путем подачи кислорода в камеру через расходомер. По спектру отражения определяется момент, когда пленка или покрытие соответствует необходимому спектру. При совпадении расчетного спектра с измеряемым напыление прекращается.

В качестве контролируемых оптических свойств тонкой пленки был принят показатель преломления. Измерение показателя преломления производится с помощью спектрального эллипсометра. Зависимость показателя преломления от длины волны измеряемой пленки представляется в виде коэффициентов Коши.

Результаты эксперимента

Для определения влияния ионного ассистирования на показатель преломления были изготовлены образцы с тонкими пленками диоксидов титана, циркония и гафния. Условия нанесения пленок в вакуумной камере были неизменными. Скорость роста

пленок составляла 1,2 А/с, давление в камере поддерживалось на уровне $2{,}6 \cdot 10^{-4}$ мБар. В случае, когда ионный источник работал, кислород в камеру поступал из ионного источника и расходомера. При неработающем ионном источнике кислород поступал только через расходомер. Полученные образцы измерялись на спектральном эллипсометре для определения показателя преломления тонких пленок. Сравнительные графики зависимостей показателей преломления от длины волны представлены на рис. 2–4.

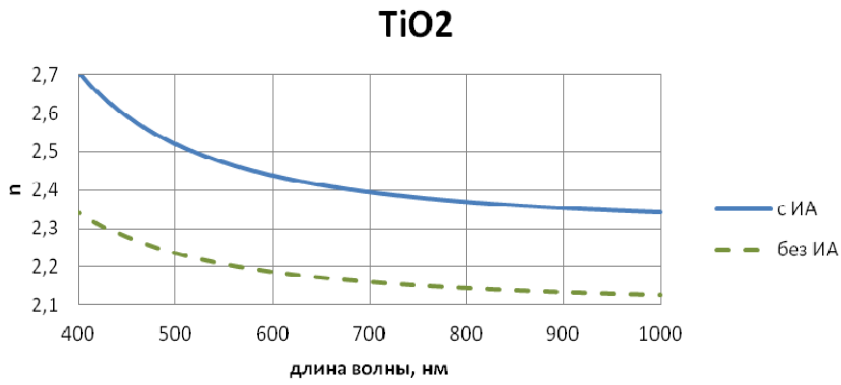


Рис. 2. Зависимость показателя преломления от длины волны диоксида титана с ионным ассистированием и без него

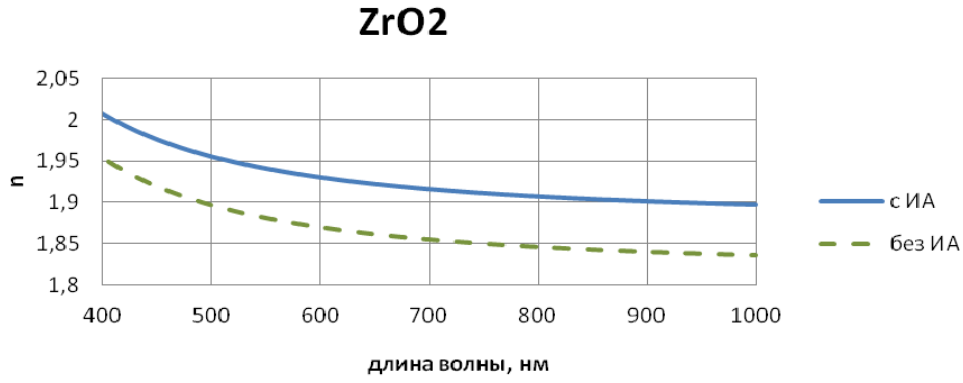


Рис. 3. Зависимость показателя преломления от длины волны диоксида циркония с ионным ассистированием и без него

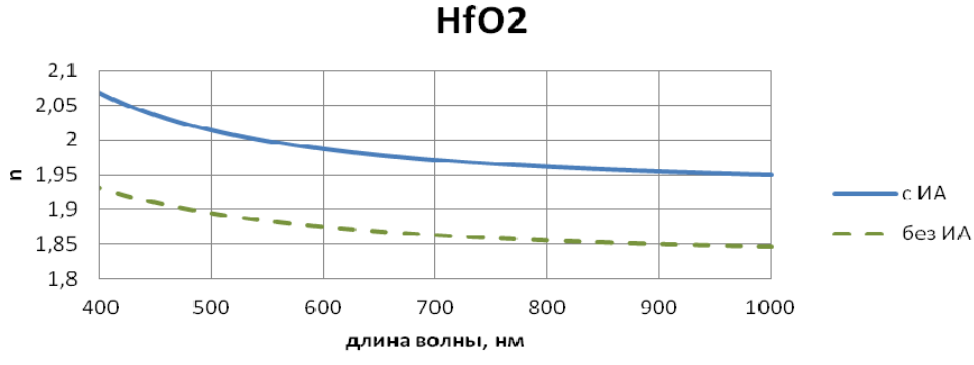


Рис. 4. Зависимость показателя преломления от длины волны диоксида гафния с ионным ассистированием и без него

Обсуждение результатов

Как видно из полученных данных, с ионным ассистированием возрастает показатель преломления тонкой пленки. Данный эффект можно объяснить меньшей пористостью пленки, возникающей за счет уплотнения ионным пучком растущего материала на поверхности подложки. Уплотнение происходит за счет поверхностного нагрева подложки пучком ионов, что в свою очередь увеличивает подвижность адатомов, улучшая адгезию тонкой пленки во время роста.

Повышение показателя преломления тонкой пленки влияет на конечный результат спектральных характеристик оптического покрытия. Поскольку с повышением показателя преломления возрастает оптическая толщина пленки, которая играет решающую роль в формировании спектральных характеристик покрытия, геометрическую толщину тонкой пленки можно уменьшить для получения аналогичных спектральных характеристик. Для примера, произведем расчет просветляющего покрытия для длины волны 550 нм на основе двухслойного покрытия на стекле К8. На рис. 5 представлены расчетные спектры отражения просветляющего покрытия, рассчитанные для диоксида гафния с ионным ассистированием и без него.

Как видно из рис. 5, итоговые спектры рассчитанных покрытий идентичны. Однако для изготовления данных покрытий требуется меньшая толщина диоксида гафния за счет высокого показателя преломления. Необходимые толщины приведены в табл. 1.

Таблица 1

Расчетные толщины для двухслойного просветляющего покрытия с ионным ассистированием и без него

Материал	Толщина пленки, нм	
	С ионным ассистированием	Без ионного ассистирования
HfO_2	60,9	81,3
SiO_2	229,1	218,7

Аналогично рассчитаем отражающее покрытие на основе диоксида титана для длины волны 1064 нм.

Также как и в случае с двухслойным покрытием, при идентичных спектральных характеристиках отражающих покрытий, требуются меньшие толщины пленок при применении ионного ассистирования. Также снижается число пар четвертьволновых слоев, необходимых для создания отражающего покрытия. Необходимые толщины и число слоев приведены в табл. 2.

Таблица 2

Расчетные толщины для отражающего покрытия с ионным ассистированием и без него

Материал	Толщина пленки, нм	
	С ионным ассистированием	Без ионного ассистирования
TiO_2	113,9	124,1
SiO_2	181,4	181,4
Число пар слоев	9	11

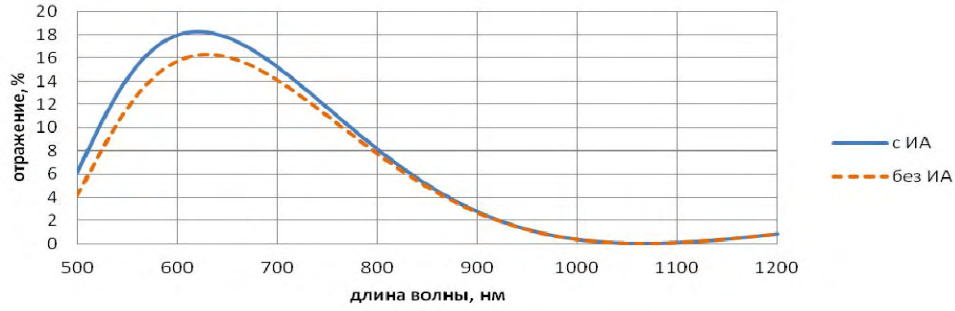


Рис. 5. Расчетный спектр отражения двухслойного просветляющего покрытия с ионным ассистированием и без него

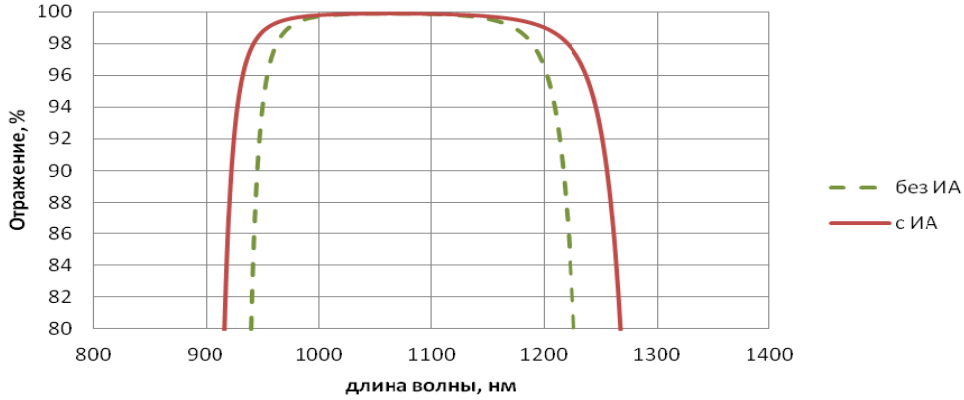


Рис.6. Расчетный спектр отражения отражающего покрытия с ионным ассистированием и без него

Исходя из приведенных данных, можно сделать вывод о влиянии ионного ассистирования на оптические свойства интерференционных пленок. Все три исследуемых материала, широко использующихся для создания оптических покрытий, показали значительное увеличение показателя преломления тонкой пленки. Увеличение показателя преломления тонкой пленки при производстве оптических покрытий имеет важное значение при расчете и нанесении покрытий. В случае с просветляющими покрытиями применение ионного ассистирования позволяет наносить меньшую толщину высокопреломляющего слоя, однако толщина низкопреломляющего слоя становится больше. В случае с отражающими покрытиями, помимо уменьшения толщины высокопреломляющего слоя, уменьшается число пар слоев, необходимых для достижения высокого коэффициента отражения готового изделия.

Применение ионного ассистирования при изготовлении оптических покрытий, помимо изменения оптических свойств, имеет большой экономический эффект. Снижение толщины наносимых слоев приводит к уменьшению времени изготовления покрытия и затрат материалов. Снижение числа пар слоев для отражающих покрытий ведет к снижениям затрат ресурсов до 20 %.

В данной работе проведен анализ изменения показателя преломления, как основного оптического свойства интерференционной пленки, от наличия пучка ионов при осаждении этих пленок. Однако, следует учесть опыт коллег [3] о влиянии ионного ассистирования на коэффициент экстинкции тонкой пленки, поскольку поглощение и рассеяние тонких пленок существенно влияют на конечные оптические свойства изделия. Также следует отметить, что ионное ассистирование в проведенной работе проводилось в фиксированном режиме. По предварительным проведенным нами экспериментальным работам можно утверждать, что на оптические свойства влияет не только фактор наличия или отсутствия ионного пучка в процессе нанесения пленки, но и энергетические параметры этого пучка. Приведенные направления исследований являются приоритетными для дальнейшего определения влияния ионного ассистирования на оптические характеристики диэлектрических покрытий.

Литература

1. Tikhonravov A. V., Trubetskov M. K., Amotchkina T. V. Optical parameters of oxide films typically used in optical coating production // Applied optics. 2011. Vol. 50. N9. P. 75–85.

2. Duparré A., Ristau D. Optical Interference Coatings Measurement Problem // Applied optics. 2008. Vol. 47. P. 179–184.

3. Thielsch R., Gatto A., Heber J., Kaiser N. A comparative study of the UV optical and structural properties of SiO_2, Al_2O_3 and HfO_2 single layers deposition by reactive evaporation, ion-assisted deposition and plasma ion-assisted deposition // Thin solid films. 2002. Vol. 410. P. 86–93.

ЗАДАЮЩИЙ ГЕНЕРАТОР С УПРАВЛЯЕМЫМИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫМИ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА УСТАНОВКИ «ЛУЧ»

И. В. Кузьмин, Б. Г. Зималин, А. В. Савкин, А. Н. Рукавишников, Р. Ю. Костюнин, И. В. Мишина

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Исследование процессов, возникающих при взаимодействии интенсивного лазерного излучения с веществом, является одним из приоритетных направлений мощных лазерных установок [1, 2]. Возможность управления в совокупности со стабилизацией параметров лазерного излучения на выходе установки позволяет существенно расширить спектр исследуемых конструкций мишеней и повысить воспроизводимость результатов. Как правило, управление параметрами излучения осуществляется в задающем генераторе установки в процессе формирования и предусиления исходного лазерного импульса. При последующем увеличении энергии излучения в главном усилительном тракте необходимо учитывать искажение пространственно-временных параметров импульса, возникающих вследствие насыщения и неоднородного по апертуре распределения коэффициента усиления.

Лазерная установка «Луч» построена по принципу усиления относительно слабого импульса с энергией ~мДж в четырехпроходном усилительном тракте, содержащем дисковые каскады со световой апертурой 200×200 мм^2. В большинстве проводимых на установке «Луч» [3] экспериментах по облучению мишеней требуется лазерный импульс прямоугольной временной формы и длительностью, регулируемой в диапазоне 3–5 нс. Достижение выходной энергии излучения до килоджоульного уровня неизбежно сопряжено с выходом в режим насыщенного усиления на последнем проходе, что приводит к существенному искажению изначально заданной на входе временной формы лазерного импульса. В связи с этим, формирование прямоугольной формы лазерного импульса на выходе установки возможно при подаче на вход главного усилительного тракта лазерного импульса сложной нарастающей временной формы.

Предельная выходная энергия установки, ограниченная лучевой прочностью финальных оптических элементов, может быть достигнута при условии формирования максимально однородного пространственного распределения интенсивности пучка на выходе главного усилительного тракта. Одним из основных процессов, приводящих к искажению пространственной формы пучка на выходе установки, является усиление спонтанного излучения, возникающее вдоль большей стороны дисковых активных элементов и приводящее к формированию неравномерного коэффициента усиления по апертуре каскадов. В этом случае повысить общую энергию излучения при сохранении пиковой плотности энергии на безопасном уровне можно посредством формирования на входе главного усилительного тракта лазерного пучка со специальной, изменяемой вдоль одной координаты формой пространственного профиля.

Данная работа посвящена исследованию системы формирования излучения, позволяющей профилировать временную и пространственную форму лазерных импульсов с учетом влияния насыщения усиления и неоднородного распределения коэффициента усиления в дисковых каскадах установки «Луч». В состав системы входят задающий гетеролазер (ЗГЛ), тракт предусиления и система формирования пространственного профиля лазерного пучка.

Система формирования излучения

Первоначальная система формирования излучения на установке «Луч» представляет собой твердотельный лазер, работающий в режиме модуляции добротности со стержнем из фосфатного стекла с примесью Nd^{3+} в качестве активной среды [4]. Формирование временной формы лазерного импульса в данной системе осуществляется с помощью двух последовательно расположенных затворов Поккельса, позволяющих регулировать длительность импульса в пределах $\tau_{0,5} \approx 1$–10 нс [4]. Подобный способ обладает существенным недостатком, так как не позволяет менять временную форму лазерного импульса произвольным образом. Для устранения данного недостатка в состав установки «Луч» введена новая система формирования излучения, временные и спектральные параметры которой формируются ЗГЛ с центральной длиной волны излучения 1053 нм. Регулировка временных и спектральных параметров осуществляется посредством управления формой импульса тока и рабочей температурой излучающего лазерного диода. На рис. 1 показан спектр ЗГЛ.

Ширина спектральной линии на рис. 1 ограничена аппаратной функцией спектрометра и не превышает ≈0,1 нм. Длина волны лазерного диода $\lambda \approx 1053{,}2$ нм подобрана с помощью изменения температуры термоконтроллера.

На рис. 2–4 приведены характерные формы импульса тока на ЗГЛ и соответствующие им оптические импульсы. Форма импульса тока задается в про-

граммном обеспечении на компьютере и преобразуется в аналоговый сигнал с помощью ЦАП, установленного в драйвере управления лазерным диодом. Далее излучение ЗГЛ усиливается в волоконном усилителе (ВУ) в $\approx 10^3$ раз. Регулировкой окна пропускания затвора Поккельса, расположенного после ВУ, можно получать различные формы лазерного импульса при одинаковом импульсе тока (рис. 3 и 4).

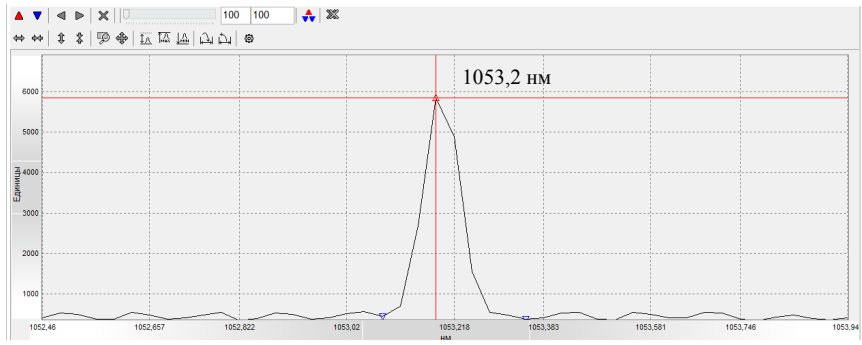
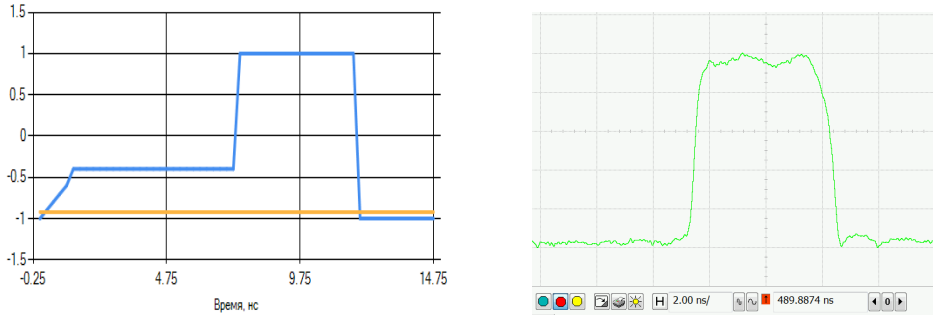
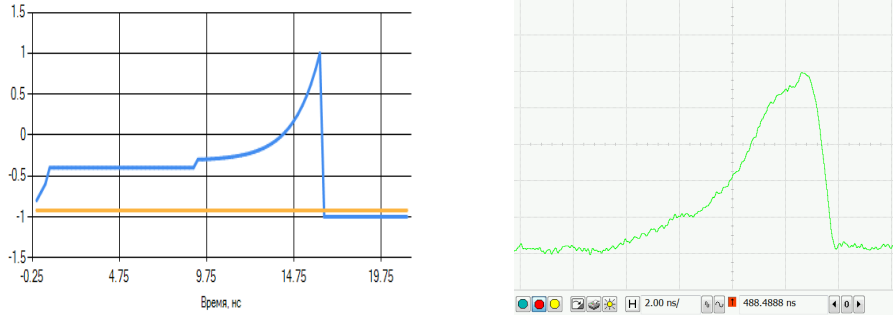


Рис. 1. Спектр задающего гетеролазера



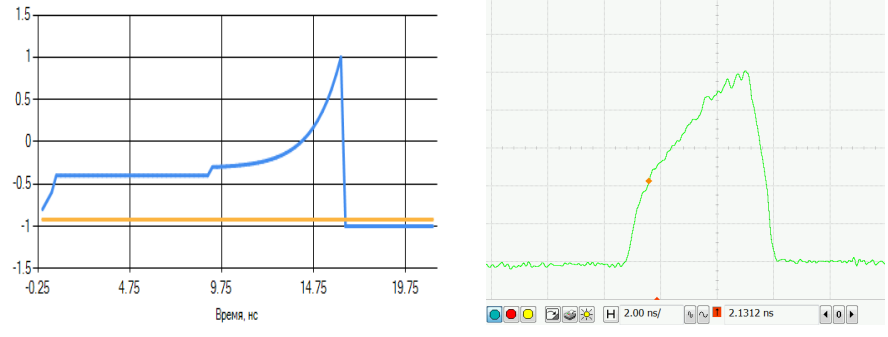
а б

Рис. 2. Импульс ЗГЛ: а – форма импульса тока в программе управления драйвером ЗГЛ, б – оптический импульс на выходе затвора Поккельса



а б

Рис. 3. Импульс ЗГЛ: а – форма импульса тока в программе управления драйвером ЗГЛ, б – оптический импульс на выходе затвора Поккельса



а б

Рис. 4. Импульс ЗГЛ: а – форма импульса тока в программе управления драйвером ЗГЛ, б – оптический импульс на выходе затвора Поккельса

Излучение ЗГЛ, усиленное в волоконном усилителе, заводится во входной каскад параметрических усилителей на основе нелинейно-оптических кристаллов LBO. Накачка параметрических усилителей осуществляется излучением второй гармоники лазера накачки (λ = 532 нм). На рис. 5 приведена схема системы формирования излучения на основе параметрического усилителя.

Длительность импульса накачки составляет $\tau \approx 20$ нс, что позволяет оптимальным образом совмещать во времени сигнальную волну и волну накачки в кристаллах, выбирая участки, где накачка наиболее равномерна. На рис. 6 показан процесс параметрического усиления в выходном усилителе ПАУ2. Провал в осциллограмме импульса лазера накачки соответствует передаче энергии в сигнальную волну и соответственно усилению импульса ЗГЛ. Энергия в импульсе ЗГЛ после параметрического усилителя составляет десятки мДж при длительности импульса $\tau_{0,5} \approx 5$ нс. При работе ПАУ2 в режиме насыщения энергия импульса достигает ≈70 мДж, при этом временная форма импульса вырождается в прямоугольную независимо от исходной формы.

Формирование пространственного распределения энергии в пучке на выходе ЗГ-М осуществляется в нескольких подсистемах, расположенных после ПАУ2 (рис. 5) [5]. Первая, выполненная на основе апертурной диафрагмы и пространственного фильтра, формирует гауссов профиль пучка. Затем, градиентным телескопом гауссов профиль пучка преобразуется в профиль с плоской вершиной распределения энергии. Специальная фазовая пластинка, расположенная в сходящемся пучке и поляризатор формируют внутреннюю структуру распределения энергии в пучке в виде протяженной вдоль одной координаты параболы. Цель пространственного профилирования – компенсация неоднородности коэффициента усиления в дисковых усилительных каскадах установки «Луч». Пространственное распределение зависит от взаимной ориентации оптических элементов подсистемы и подробно описано в [5]. Посредством зубчатой аподизирующей диафрагмы [6] и пространственного фильтра формируется квадратная апертура пучка и проводится аподизация.

На рис. 7 приведены изображения пучка и одномерный профиль интенсивности на впрыске в установку «Луч», откуда лазерный пучок транслируется на вход силового усилителя, в котором энергия излучения увеличивается до килоджоульного уровня [3].

Энергия в лазерном импульсе на выходе системы формирования излучения ограничена энергией в импульсе лазера накачки и не превышает ≈50 мДж при длительности импульса ЗГЛ с $\tau_{0,5} \approx 5$ нс. Регулировка энергии усиленного импульса ЗГЛ на впрыске в усилительный тракт установки «Луч» может осуществляться изменением нескольких величин: тока накачки волоконного усилителя, влияющего на энергию сигнальной волны на входе в ПАУ; энергии накачки на входе в ПАУ, влияющей на коэффициент параметрического усиления; углом поворотом поляризатора на выходе системы пространственного профилирования.

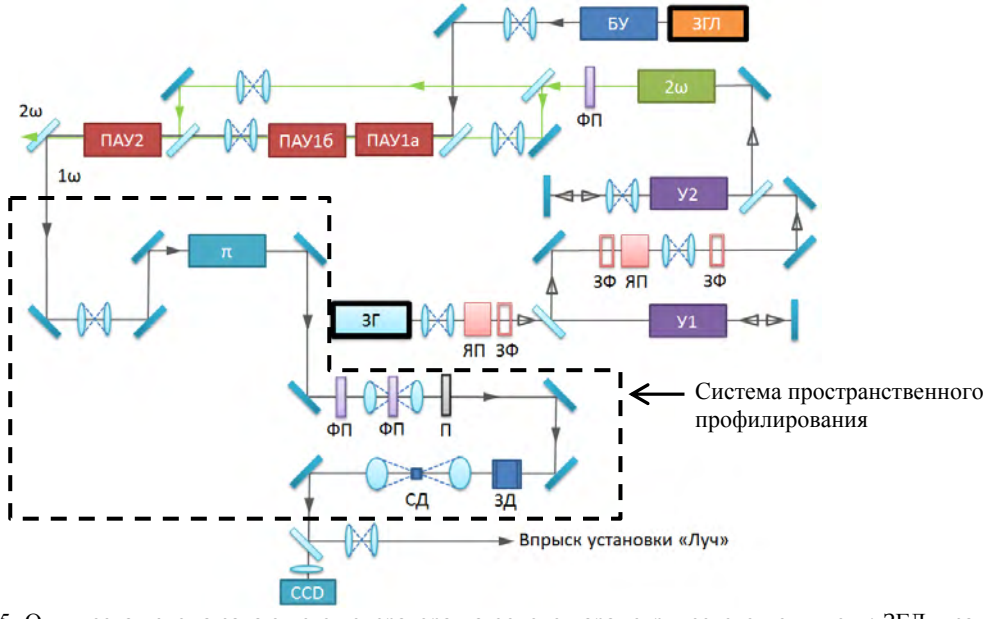


Рис. 5. Оптическая схема задающего генератора на основе параметрического усилителя: ЗГЛ – задающий гетеролазер, БУ – бустерный волоконный усилитель, ПАУ – параметрический усилитель, 2ω – преобразователь во вторую гармонику, ФП – фазовая пластинка, π – градиентный телескоп, У – усилитель (квантрон), ЗФ – затвор Фарадея, ЯП – ячейка Поккельса, ЗГ – задающий генератор лазера накачки, П – поляризатор, ЗД – зубчатая диафрагма, СД – селектирующая диафрагма, CCD – ПЗС-камера

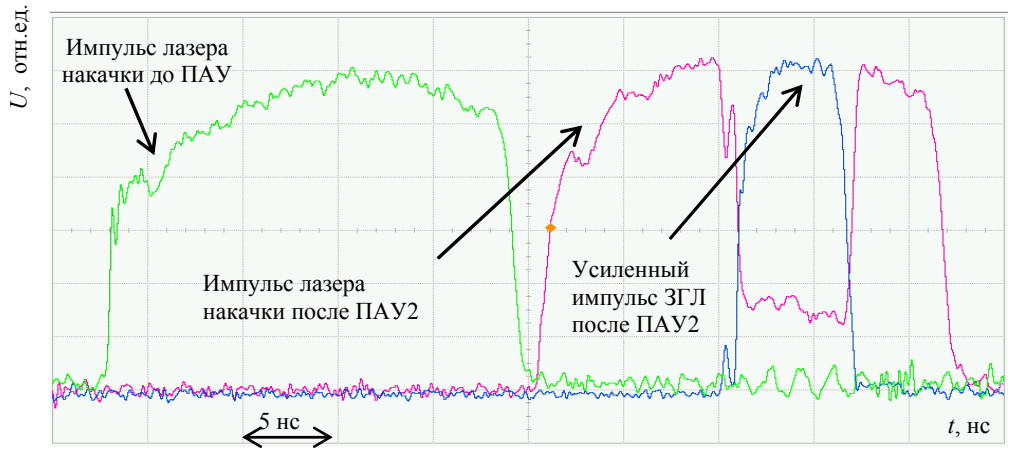


Рис. 6. Осциллограммы импульса лазера накачки и усиленного импульса ЗГЛ

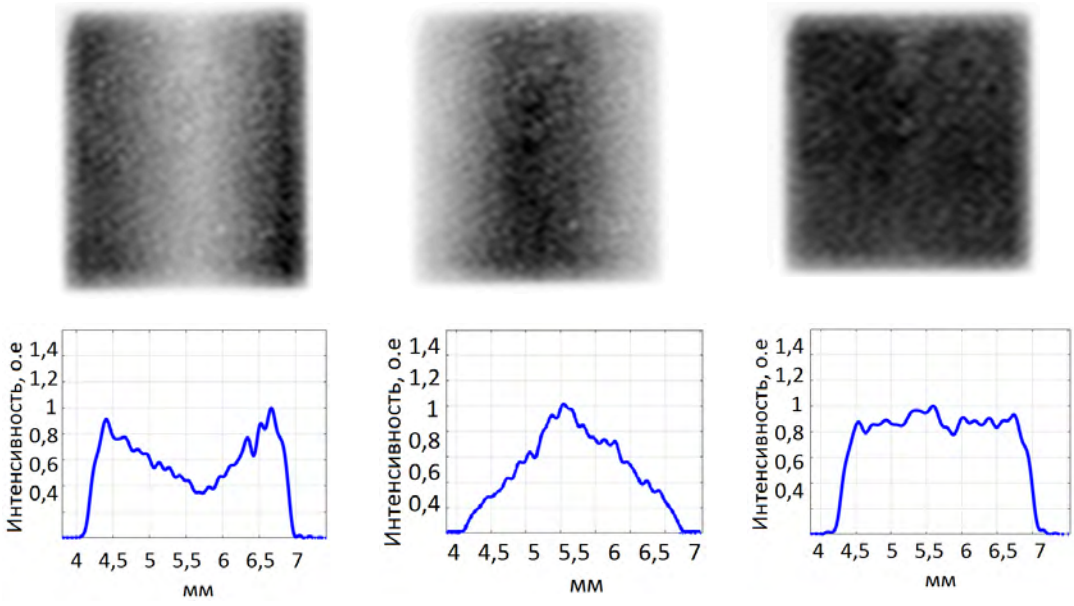


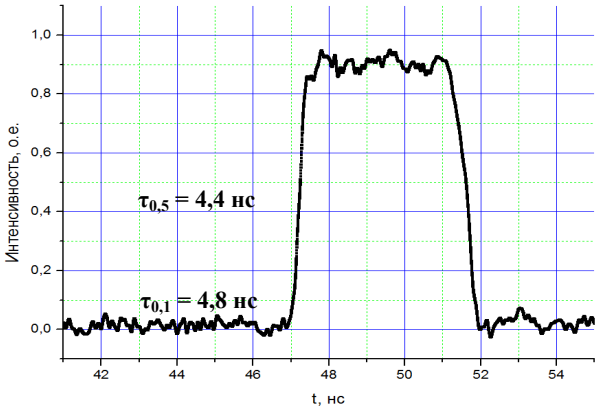
Рис. 7. Варианты формирования внутренней структуры пространственного распределения пучка на входе главного усилителя установки «Луч»

Искажение пространственно-временных параметров лазерного импульса в усилительном тракте установки «Луч»

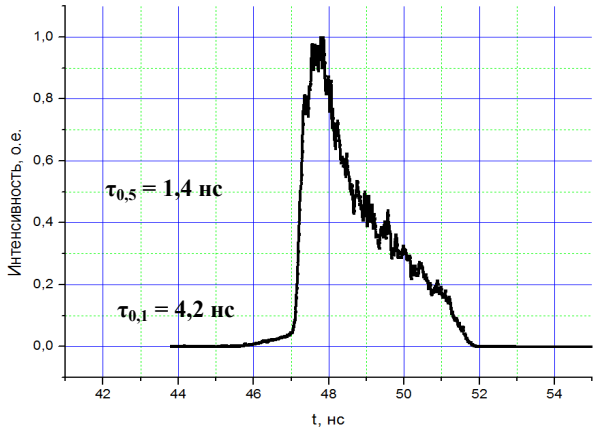
Силовой усилитель установки «Луч» позволяет достигать энергии в лазерном импульсе ≈3,3 кДж при входной энергии ~10 мДж [3]. Достижение килоджоульного уровня энергии неизбежно приводит к тому, что в выходных дисковых активных элементах усиление проходит в режиме насыщения, в связи с чем искажается временная форма усиливаемого лазерного импульса.

На рис. 8–9 приведены осциллограммы лазерного импульса на входе и на выходе усилительного тракта установки «Луч».

На рис. 8 показано влияние эффекта насыщения на временную форму прямоугольного лазерного импульса с длительностью ≈5 нс: на осциллограмме усиленного импульса передний фронт становится выше заднего фронта в ≈5 раз, в результате чего длительность $\tau_{0,5}$ сокращается в ≈3 раза. Подобное искажение нарушает условия проводимого опыта и повышает вероятность повреждения оптических элементов. В последующих экспериментах форма импульса тока на ЗГЛ изменена таким образом, чтобы получить лазерный импульс с нарастанием мощности от переднего фронта к заднему (рис. 9а). При усилении такого импульса в силовом тракте установки «Луч» временная форма лазерного импульса на выходе получается квазипрямоугольной (рис. 9б).



а

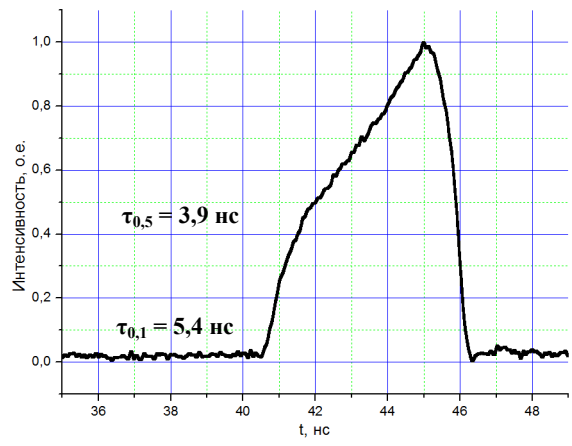


б

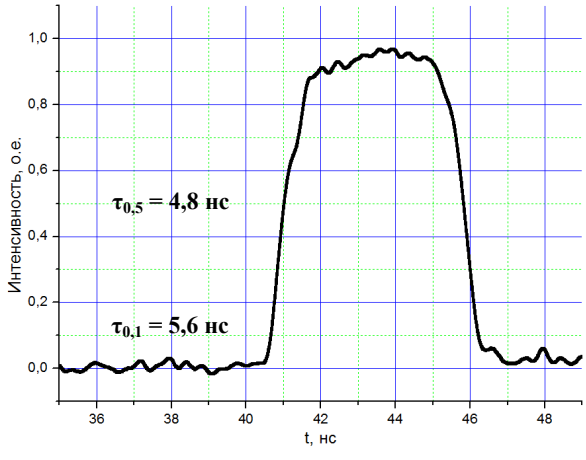
Рис. 8. Осциллограммы лазерного импульса длительностью ≈4–5 нс без профилирования: а – на входе в усилительный тракт установки «Луч», б – на выходе

На данный момент система формирования излучения не позволяет точно задавать форму входного лазерного импульса в соответствии с расчетной, в частности, из-за нестабильной работы задающего генератора лазера накачки. Форма импульса, приведенная на рис. 9а подобрана экспериментальным путем.

Усиление лазерного излучения в широкоапертурных трактах имеет важную особенность. Дисковые активные элементы имеют прямоугольную форму и располагаются под углом Брюстера к оптической оси системы для минимизации френелевских потерь. При этом усиление спонтанного излучения, возникающего вдоль большей стороны активных элементов, приводит к неоднородному сбросу инверсии по апертуре элемента и, как следствие, искажению распределения коэффициента усиления, которое представляет собой протяженную вдоль одной координаты параболу.



а

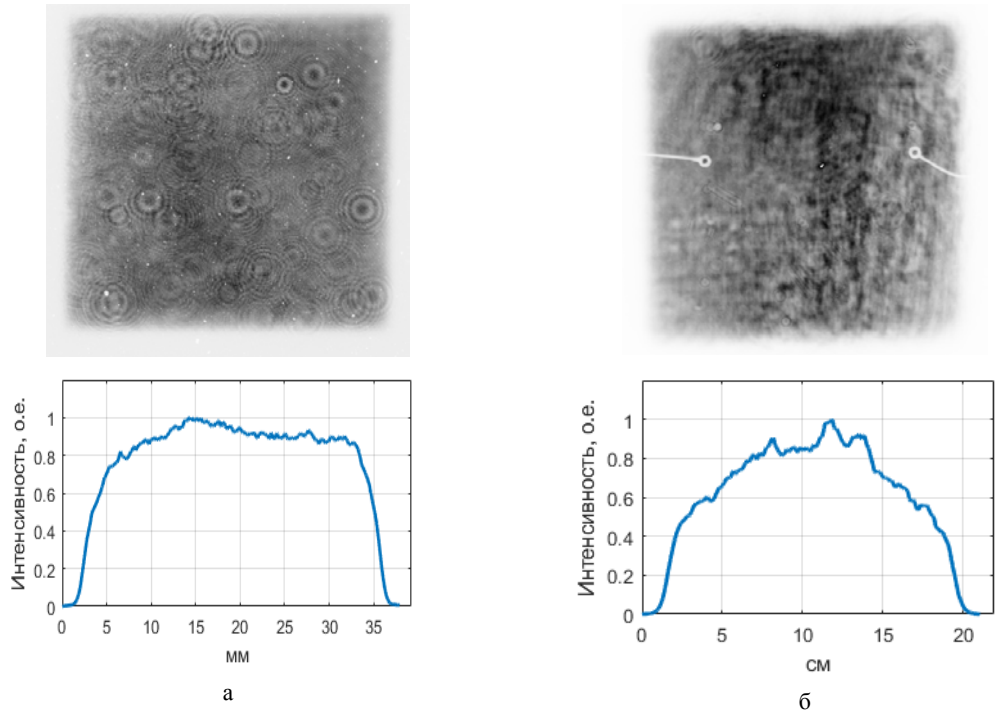


б

Рис. 9. Осциллограммы лазерного импульса длительностью ≈4-5 нс с профилированием: а – на входе в усилительный тракт установки «Луч», б – на выходе

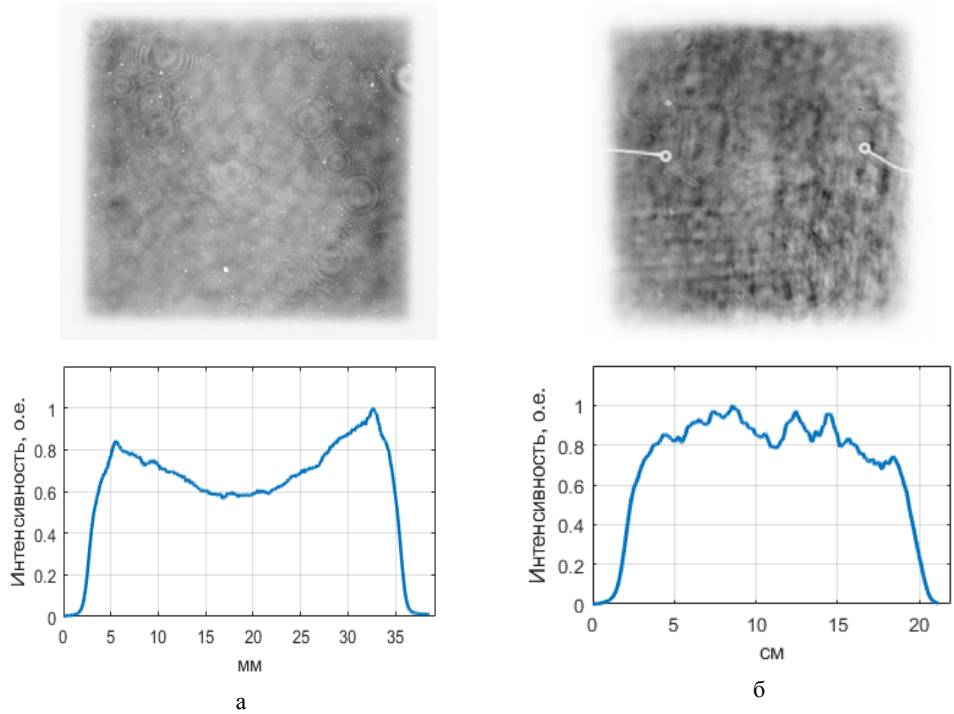
На рис. 10 показаны изображение пучка и профиль интенсивности без компенсации неоднородности усиления, а на рис. 11 – с компенсацией неоднородности усиления.

Если на выходе системы формирования излучения пространственное распределение лазерного пучка имеет профиль близкий к прямоугольному (рис. 10а), то на выходе усилительного тракта установки «Луч» пространственный профиль искажается в соответствии с распределением коэффициента усиления по апертуре активных элементов (рис. 10б). Перепад плотности энергии между краями и центром выходного лазерного пучка составляет ≈60 % (рис. 10б), что снижает предел допустимой энергии в лазерном импульсе на выходе установки из-за возможного разрушения оптических элементов.



а б

Рис. 10. Изображение пучка и профиль интенсивности без компенсации неоднородности усиления: а – на входе в усилительный тракт установки «Луч», б – на выходе.



а б

Рис. 11. Изображение пучка и профиль интенсивности с компенсацией неоднородности усиления: а – на входе в усилительный тракт установки «Луч», б – на выходе

В предыдущем разделе показано, что система пространственного профилирования позволяет формировать лазерный пучок с распределением в виде протяженной вдоль одной координаты параболы. При использовании пучка с таким пространственным распределением на входе в усилительный тракт (рис. 11а) на выходе можно получить более однородное распределение с перепадом интенсивности от центра к краям ≈20 % (рис. 11б). Таким образом, используемая система формирования излучения позволяет повысить предельные энергетические возможности в установках с широкоапертурным усилительным трактом.

Заключение

В составе лазерной установки «Луч» проведена экспериментальная отработка нового задающего генератора с управляемыми пространственно-временными и энергетическими параметрами импульса. Описан принцип работы системы формирования излучения, основанный на использовании каскада параметрических усилителей, преобразующих энергию второй гармоники лазера накачки ($\lambda = 532$ нм) в энергию импульса задающего гетеролазера ($\lambda = 1053$ нм). Показана возможность регулировки временной формы лазерного импульса на выходе системы формирования излучения, что позволяет компенсировать эффект насыщения в усилительном тракте установки «Луч» при достижении килоджоульного уровня энергии в импульсе с длительностью $\tau_{0,5} \approx 5$ нс. Возможность формирования пучка с пространственным распределением в виде протяженной вдоль одной координаты параболы позволяет компенсировать неоднородность коэффициента усиления в широкоапертурных дисковых активных элементах и таким образом повысить предельные энергетические возможности. Результаты проведенных исследований показали перспективность применения разработанной системы формирования лазерного излучения в многоканальной лазерной установке нового поколения.

Литература

1. Гаранин С. Г. Мощные лазеры и их применение в исследованиях физики высоких плотностей энергии // УФН, 2011. Т. 184, № 4. С. 434–441.

2. Лебо И. Г. Исследование гидродинамической неустойчивости в задачах лазерного термоядерного синтеза методами математического моделирования // Москва: ИПМ, 2001.

3. Гаранин С. Г., Зарецкий А. И., Илькаев Р. И., Кириллов Г. А., и др. Канал мощной установки «ЛУЧ» для ЛТС с энергией импульса 3,3 кДж и длительностью 4 нс // Квантовая электроника, 2005. Т. 35, № 4. С. 299–301.

4. Front-end system of the «Luch» facility / Rukavishnikov N. N., Savkin A. V., Sharov O. A., Sukharev S. A., Zimalin B. G. // XXVII European Conference on Laser Interaction with Matter, book of abstracts, 2002. P. 63

5. Бельков С. А., Воронич И. Н., Гаранин С. Г., Зималин Б. Г., Савкин А. В., Шаров О. А. Формирование пространственного профиля лазерного пучка в тракте мощных неодимовых установок // Квантовая электроника, 2015. Т. 45, № 6. С. 503–507.

6. Бельков С. А., Воронич И. Н., Гаранин С. Г., Зималин Б. Г., Рукавишников Н. Н., Савкин А. В., Шаров О. А. Исследование аподизации лазерного пучка зубчатыми апертурными диафрагмами для мощных установок лазерного термоядерного синтеза // Оптический журнал. 2015. Т. 82, № 6.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ УСКОРЯЮЩЕГО РЕЗОНАТОРА НАЧАЛЬНОЙ ЧАСТИ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ПРОТОНОВ

К. А. Липенкова, А. А. Брехова, Л. Е. Поляков, М. Л. Сметанин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

При работе в непрерывном режиме ускоряющая высокочастотная (ВЧ) структура подвергается высоким тепловым нагрузкам, которые могут привести к изменению геометрии внутренней полости резонатора и его составных частей и, как следствие, к уходу резонансной рабочей частоты. Это может привести к дополнительным потерям и изменениям параметров пучка заряженных частиц. В результате этого, задача обеспечения термостабилизации является чрезвычайно актуальной, так как напрямую связана с эффективностью работы ускоряющей структуры. С целью обеспечения термостабилизации ускоряющей структуры необходимо предусмотреть водяное охлаждение в наиболее теплонагруженных областях резонатора.

В программе трехмерного моделирования построена 3D-модель четырехлопастного ускоряющего резонатора (4К-резонатор) с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (ПОКФ) с окнами магнитной связи.

Проведен расчет распределения мощности тепловых потерь и температурных распределений в 4К-резонаторе. В результате проведения расчетов была предложена оптимальная конфигурация каналов водяного охлаждения, расположенных внутри лопастей резонатора. Данная конфигурация обеспечивает стабильный тепловой режим и неизменность геометрии резонатора.

Введение

В настоящее время рассмотрение возможности создания синхротронного комплекса является актуальной задачей. Циклический ускоритель – синхротрон позволяет получать высокоэнергетичные пучки протонов, легких ионов и тяжелых заряженных частиц. Качество пучка, получаемое на выходе синхротрона, во многом определяется параметрами линейного ускорителя, который будет использован в качестве инжектора для синхротрона.

Чаще всего в качестве начальной части линейного ионного ускорителя применяется ускоряющая структура с ПОКФ (международное название Radio Frequency Quadrupole, RFQ), где частицы группируются и ускоряются от нескольких десятков кэВ до 2–3 МэВ, а затем инжектируются в основную часть ускорителя [1].

Важным этапом в разработке ускоряющей структуры является расчет тепловых характеристик резонатора. Реализации непрерывного режима работы ускорителя предполагает высокие тепловые нагрузки, которые могут привести к сдвигу частоты рабочей моды. Поэтому задача термостабилизации ускоряющего резонатора с ПОКФ является чрезвычайно актуальной задачей.

Ускоряющий резонатор с ПОКФ

В программе трехмерного моделирования построена модель четырехлопастного резонатора (4К-резонатор) с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой с окнами магнитной связи.

По сравнению с традиционным 4К-резонатором, резонатор с окнами связи более компактен и имеет лучшее разделение рабочего (квадрупольного) и паразитного (дипольного) типа электромагнитных колебаний [2].

Проведена аналитическая оценка электродинамических характеристик резонатора. Для достижения требуемых темпа ускорения и выходной энергии протонов, в создаваемой модели необходимо обеспечить разность потенциалов между электродами 120 кВ на всем протяжении ускоряющей структуры.

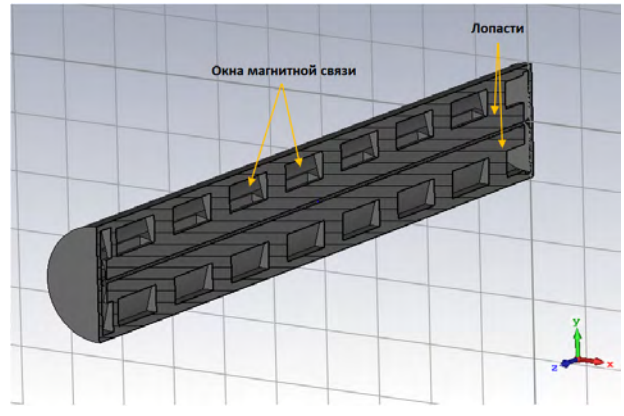


Рис. 1. Трехмерная модель четырехкамерного резонатора

С использованием электродинамического расчета на собственных модах была оптимизирована геометрия резонатора (рис. 1) и получены его основные электродинамические характеристики. В качестве материала резонатора в расчете использовался идеальный проводник (PEC) с проводимостью $\sigma = 5{,}8 \cdot 10^7$ 1/Ом·м.

Для определения распределения мощности тепловых потерь в стенках резонатора использована методика из статьи [3]. На первом этапе был проведен электростатический расчет распределения напряженности электрического поля между электродами. Для этого в электростатическом расчете между электродами задавалась разность потенциалов, обеспечивающая квадрупольное распределение напряженности электрического поля в соответствие со схемой подключения, представленной на рис. 2.

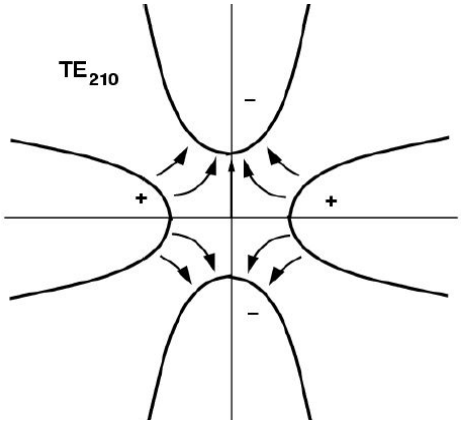


Рис.2. Вид квадрупольного распределения напряженности электрического поля

Исходя из полученной амплитуды напряженности электрического поля между электродами, определялся коэффициент, используемый при расчете тепловых потерь:

$$K = \left(\frac{E_{static}}{E_{em}} \right)^2, \qquad (1)$$

где E_{static} – амплитуда напряженности электрического поля, определенная в электростатическом расчете; E_{em} – амплитуда напряженности электрического поля, определенная в расчете на собственных модах.

Путем умножения распределения мощности тепловых потерь, полученного в электродинамическом расчете на собственных модах, на полученный коэффициент K рассчитано распределение мощности тепловых потерь в резонаторе (рис. 3).

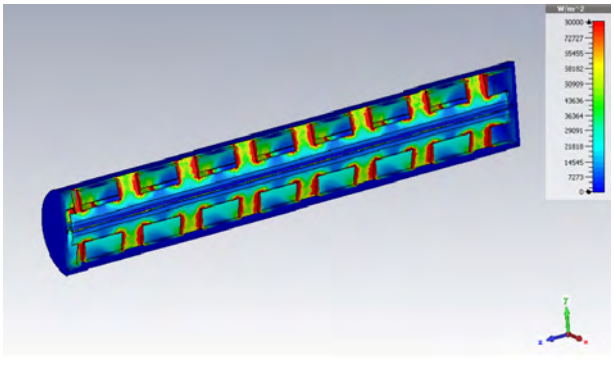


Рис.3. Распределение тепловых потерь в модели 4К-резонатора с окнами связи

Результат расчета показал, что в 4К-резонаторе с ПОКФ для рабочей частоты 162 МГц суммарные потери мощности в стенках составляют 185 кВт.

Из рис. 3 видно, что максимальные потери сосредоточены на торцах окон связи и на краях лопастей резонатора.

Основные параметры рассчитанной структуры представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные параметры четырехкамерного резонатора

Параметр	Величина
Тип ускоряемых частиц	p^+
Входная энергия, кэВ	47
Выходная энергия, МэВ	2.15
Длина резонатора, мм	2460
Внутренний диаметр резонатора, мм	342
Внешний диаметр резонатора, мм	380
Толщина стенок резонатора, мм	19
Высота окон связи, мм	90
Ширина окон связи, мм	213
Количество окон в одной лопасти, шт.	7,5
Рабочая частота, МГц	162
Напряжение между электродами, кВ	120
Добротность	11300
Мощность потерь, кВт	185

Тепловой расчет

В первом случае проводился расчет температурных распределений в модели резонатора без активного водяного охлаждения. На рис. 4 представлены результаты расчета температурных распределений в 3D-модели 4К-резонатора.

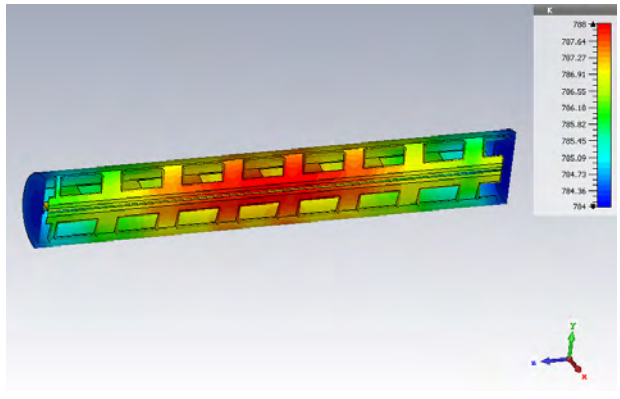


Рис. 4. Температурные распределения в 3D-модели 4К-резонатора

Следует отметить, что области с максимальной температурой находятся в районе окон магнитной связи и приторцевых областях. Из рис. 4 видно, что максимальная равновесная температура составляет 788 К. Такие высокие температуры могут приводить

к изменению геометрии (деформации) корпуса резонатора, изменению распределения электромагнитного поля внутри него и, как следствие, к сдвигу частот электромагнитных волн внутри резонатора и падению добротности. Следовательно, для обеспечения термостабилизации ускоряющей структуры необходимо водяное охлаждение [4].

Для оптимальной термостабилизации резонатора в наиболее теплонагруженных областях обычно высверливают каналы для водяного охлаждения. Поэтому для снижения равновесной температуры в модель резонатора были внедрены трубки охлаждения. Форма каналов водяного охлаждения была выбрана таким образом, чтобы решить проблему перегрева электродов. Существует несколько способов улучшить эффективность охлаждения, например, увеличить диаметр или сделать водяной канал ближе к поверхности лопасти резонатора. Кроме этого, каналы водяного охлаждения можно просверлить вокруг окон связи, так как основные области, подвергающиеся сильным тепловым нагрузкам, находятся вблизи их краев. Трехмерная модель резонатора с каналами охлаждения показана на рис. 5 и 6.

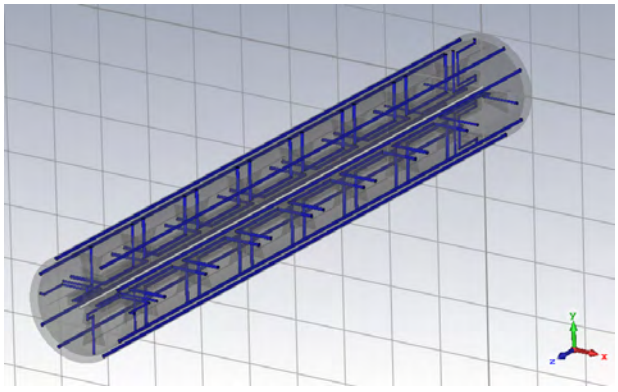


Рис. 5. 3D-модель 4К-резонатора с активным водяным охлаждением

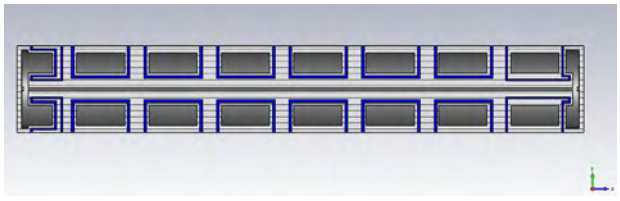


Рис. 6. 3D-модель 4К-резонатора с активным водяным охлаждением в разрезе

Модель имеет 40 каналов водяного охлаждения. Температура охлаждающей воды – 20 °С. Температура окружающей среды – 21 °С. В табл. 2 представлены основные параметры каналов.

Коэффициент теплоотдачи воды рассчитывался по формуле [5]:

$$\alpha = 350 + 2100\sqrt{\upsilon}, \qquad (2)$$

где υ – скорость водяного потока, м/с.

Другие параметры материалов, используемые в тепловом расчете, представлены в табл. 3.

Таблица 2

Основные параметры каналов охлаждения

Расположение канала	Диаметр, мм	Количество, шт
Каналы вокруг окон магнитной связи	12	28
Каналы в приторцевых областях	9	4
Продольные каналы в корпусе резонатора	12	8

Таблица 3

Основные параметры материалов, используемые в тепловом расчете

Параметр	Значение
Теплопроводность корпуса резонатора (нержавеющая сталь), Вт/К/м	82,5
Теплоемкость (нержавеющая сталь), кДж/К/кг	0,465
Излучательная способность (нержавеющая сталь)	0,67
Коэффициент теплоотдачи (нержавеющая сталь), Вт/м^2/К	5,6
Теплопроводность воды, Вт/К/м	0,6
Теплоемкость воды, кДж/К/кг	4,2

Проведена серия тепловых расчетов при различных скоростях водяного потока. Результаты термодинамических расчетов приведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты расчетов для различных скоростей потока воды

Параметр	Значение				
Скорость, м/с	2,5	3	3,5	4	4,5
Общий расход воды, л/мин (во всех каналах охлаждения)	649	776	906	1037	1166
Коэффициент теплоотдачи α, Вт/м^2·К	3668	3983	4277	4550	4802
Максимальная температура корпуса резонатора, К	336,5	334	333,8	333,8	333,8

Как видно из табл. 4, оптимальный вариант соответствует скорости водяного потока 3 м/с. При этом обеспечивается минимальная равновесная температура в корпусе резонатора при оптимальном расходе воды, который составляет 776 л/мин. Дальнейшее увеличение расхода не приводит к заметному снижению равновесной температуры. Устойчивое температурное распределение показано на рис. 7.

Как видно из рис. 7, максимальная равновесная температура в корпусе резонатора при скорости водяного потока 3 м/с составляет 334 К, а максимальная температура лопастей резонатора – 330 К.

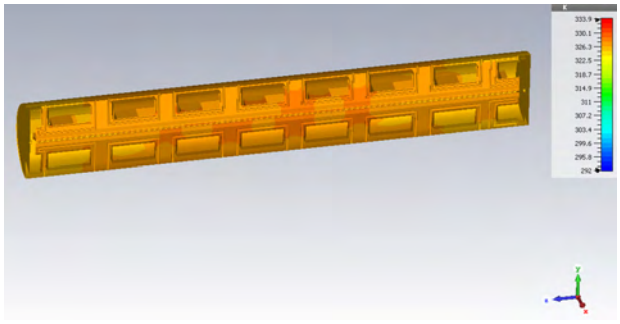


Рис. 7. Результат полученных температурных распределений в 4К-резонаторе с активным водяным охлаждением при скорости водяного потока 3 м/с

Необходимо отметить, что пиковая равновесная температура в модели резонатора с активным водяным охлаждением на 454°К меньше, чем в модели резонатора без охлаждения.

Заключение

При проектировании ускорителей с ПОКФ работающих в непрерывном режиме необходимо учитывать тепловые потери в стенках резонатора.

В работе проведен расчет распределения мощности тепловых потерь в 4К-резонаторе с ПОКФ с магнитными окнами связи. Результаты расчета показали, что средняя мощность тепловых потерь в стенках 4К-резонатора составила 185 кВт.

Проведен расчет температурных распределений в модели резонатора без активного водяного охлаждения. Получена равновесная температура, равная 788 К. Исходя из чего, сделан вывод о том, что необходимо предусмотреть активное водяное охлаждение, так как такие высокие температуры приводят к изменению геометрии резонатора и сдвигу резонансной рабочей частоты.

Построена модель 4К-резонатора с магнитными окнами связи с каналами охлаждения. Проведена серия тепловых расчетов резонатора при различных скоростях потока воды в каналах. Результаты расчета показали, что при скорости потока воды равной 3,5 м/с и выше максимальная температура корпуса резонатора не изменяется. В результате чего был выбран вариант, который соответствует скорости потока воды равной 3 м/с, поскольку он имеет меньший расход воды 776 л/мин и приемлемую равновесную температуру внутренних поверхностей резонатора (до 334 К). Полученные результаты будут использоваться в дальнейшем для оптимизации конструкции и проведения дополнительных термодинамических расчетов.

Стоит отметить, что для оценки влияния тепловых потерь на электродинамические характеристики резонатора необходимо проводить расчет деформации корпуса резонатора. Данный расчет должен показать, достаточны ли выбранная скорость потока воды в каналах охлаждения и конфигурация каналов для сохранения геометрии корпуса резонатора, и, как следствие, его электродинамических характеристик (рабочая частота, добротность, шунтовое сопротивление, мощность тепловых потерь) в заданных диапазонах.

Литература

1. Капчинский И. М. Теория линейных резонансных ускорителей. Динамика частиц. М.: Энергоиздат, 1982. С. 130–144.

2. Qi Fu, Kun Zhu, Yuanrong Lu, Zhi Wang et al. Study for a 162,5 MHz window-type RFQ // Proceedings of IPAC2016. 2016. P. 423–425.

3. Qi Fu, Kun Zhu, Yuanrong Lu, Zhi Wang et al. Progress of a 162,5 MHz high-current RFQ with coupling windows // Proceedings of LINAC2016. 2016. P. 589–591.

4. Polozov S. M., Lozeev Y. Y. Thermodynamics simulation for the CW radio-frequency quadrupole accelerator // Proceedings of RuPAC2018. 2018. P. 282–284.

5. Кухлинг Х. Справочник по физике: Пер. с нем. М.: Мир, 1983. С. 520.

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ДЕТОНАЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ ВВ-ТТ ПО АНАЛИЗУ СНИМКОВ МИКРОСТРУКТУРЫ

Л. И. Липенкова[1], *М. Ю. Батьков, Д. В. Мильченко, А. И. Пятойкина*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.
[1]СарФТИ НИЯУ МИФИ, г. Саров Нижегородской обл

Известно, что физико-химические свойства твердых веществ в определенной степени зависят от их микроструктуры. На практике одни свойства материалов являются относительно-чувствительными, а другие – относительно-нечувствительными. В частности, для взрывчатых веществ (ВВ) к относительно-нечувствительным свойствам относится скорость детонации, к относительно-чувствительным – критические параметры детонации. Известны случаи, когда показатели критического диаметра $d_{кр}$ сильно различаются для ряда образцов ВВ одинаковой химической природы, но различной структуры. Например, в зависимости от технологии получения зарядов из ТНТ величины критического диаметра их детонации могут меняться более чем на порядок, с ~2 до > 38 мм [1]. В этом, как и в других подобных случаях, прослеживаются корреляции между количеством дефектов в кристаллической структуре ВВ (пор, межзеренных границ и т. д.) и величиной $d_{кр}$ – чем больше структурных дефектов, тем меньше критический диаметр.

Хорошо известно также, что детонационная способность индивидуальных ВВ заметно зависит от дисперсности частиц – чем меньше частицы ВВ, тем выше их детонационная способность [2]. Однако, для простейших высоконаполненных взрывчатых составов (ВС) (наполнитель ~80 % по массе, остальное пластификатор) повышение детонационной способности наблюдается при уменьшении размера частиц лишь до определенного уровня, после чего, при прочих равных условиях, детонационная способность снижается [3].

Возникает вопрос, можно ли, исходя из параметров микроструктуры, оценить детонационную способность ВВ. Поскольку микроструктурный анализ требует значительно меньшего количества вещества и времени на эксперимент, чем газодинамические испытания для определения детонационной способности, такая возможность была бы практически весьма полезной.

Существуют различные способы повышения детонационной способности ВС, один из которых связан с повышением дефектности частиц наполнителя. Наиболее перспективным путем повышения дефектности частиц наполнителя, с точки зрения достижения целевых свойств и разработки промышленной технологии, является термовакуумная перекристаллизация ВВ [4, 5], осуществляемая путем возгонки ВВ при нагревании в вакууме с последующим осаждением на подложку. Такая технология позволяет получать ВВ и взрывную смесь (ВС), на их основе, с высоким уровнем детонационной способности, недостижимым для стандартной технологии перекристаллизации ВВ из растворителя [6].

Результаты последних исследований в этом направлении показали, что в зависимости от микроструктуры детонационная способность гексогена, перекристаллизованного по термовакуумной технологии (гексогена-ТТ) и ВС, на его основе, различаются. Это обстоятельство показывает, что для обеспечения стабильности и оценки свойств ВВ-ТТ необходима разработка способа контроля микроструктуры ВВ-ТТ и установление зависимости между микроструктурой и детонационной способностью ВВ-ТТ.

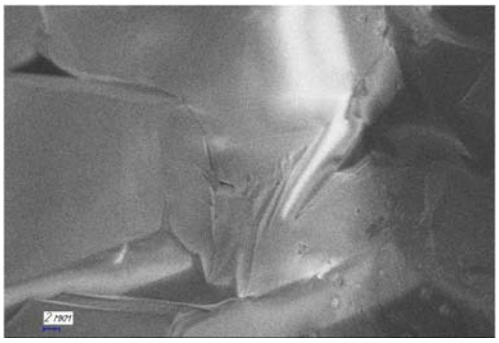
Анализ доступных методов контроля свойств ВВ показал, что наибольшей перспективой для решения поставленной задачи, в первую очередь, с точки зрения практической реализации, обладает способ расчета удельной длины границ раздела кристаллов ВВ по снимкам микроструктуры, получаемым с помощью электронного микроскопа.

Целью настоящей работы является разработка способа расчета удельной длины границ раздела кристаллов гексогена-ТТ и установление количественной зависимости между особенностями микроструктуры и детонационной способностью гексогена-ТТ.

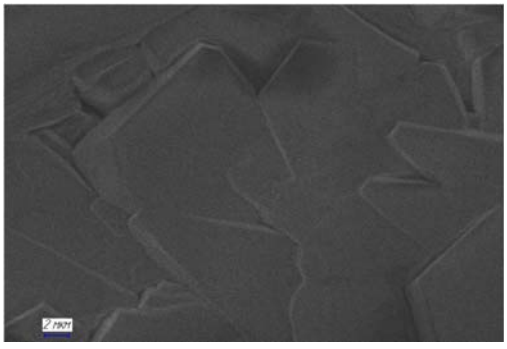
Схема проведения измерений

Для проведения исследований с использованием имеющихся в ИФВ термовакуумных установок методом возгонки и осаждения ВВ были изготовлены образцы гексогена-ТТ по трем различным технологическим режимам, отличающимся конструкцией испарителя и условиями проведения процесса. Полученные образцы пронумерованы, как это показано на рис. 1.

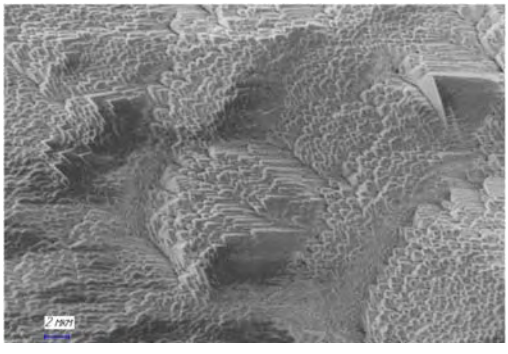
Микроструктуру изготовленных образцов, не удаляя ВВ с подложки, контролировали с помощью растрового электронного микроскопа с возможностью увеличения до 100 000 раз.



а



б



в

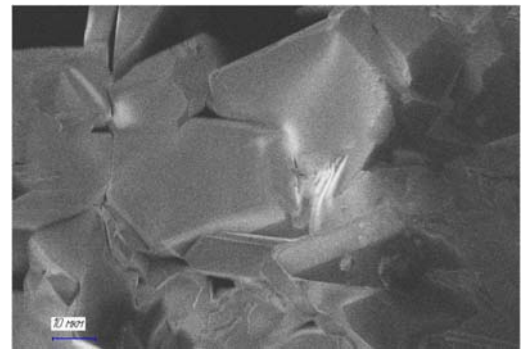
Рис. 1. Фотографии микроструктуры образцов:
а – образец № 1; б – образец № 2; в – образец № 3

Для получения более наглядного расположения границ раздела кристаллов ВВ полученные изображения были подвергнуты обработке. На первом шаге проведена цветовая коррекция с помощью графического редактора Adobe Photoshop CS4. Целью коррекции было улучшение качества изображений (экспозиция, контрастность, подбор цветового тона, улучшение четкости и резкости). Корректировка проводилась субъективно. На рис. 2 показан пример корректировки изображений.

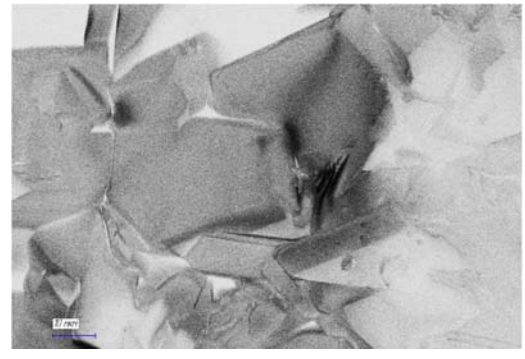
После корректировки изображение импортировалось в систему трехмерного моделирования Компас-3D V15, позволяющую проводить геометрические измерения объекта.

Обработку изображений в системе Компас-3D проводили в следующем порядке:

– выделяли область измерений (функции «прямоугольник», «окружность»);



а



б

Рис. 2. Пример корректировки изображений: а – исходное изображение; б – после коррекции

– измеряли площадь выделенной области (функция «площадь»);

– обводили все видимые границы раздела кристаллов ВВ (функция «ломанная кривая»);

– измеряли длину кривых (функция «длина кривой»).

На рис. 3 показан пример выделенных областей с обведенными границами кристаллов.

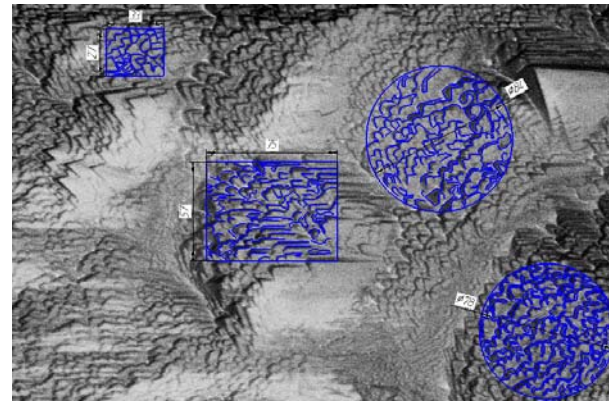


Рис. 3. Пример выделенных областей

После проведения измерений, полученные данные о площади выделенной области и длине границ раздела кристаллов ВВ обработали в программе Microsoft Excel. На рис. 4 показаны графики зависимости длины границ раздела от площади исследуемой области для каждого из исследуемых образцов.

Из рис. 4 видно, что для каждого образца имеет место линейная зависимость между длиной границ раздела кристаллов ВВ и площадью поверхности. Это означает, что имеет место относительное равномерное распределение границ раздела по всей исследованной подобласти подложки. То есть для оценки характеристик микроструктуры образцов можно использовать относительно ограниченный участок поверхности напыленного ВВ. В табл. 1 показаны результаты измерений.

Из табл. 1 видно, что среднее значение удельной длины границ раздела кристаллов ВВ для исследованных образцов различается. Для образца № 3 отмечается наибольшее среднее значение удельной длины границ раздела кристаллов ВВ, превышающее остальные образцы на порядок.

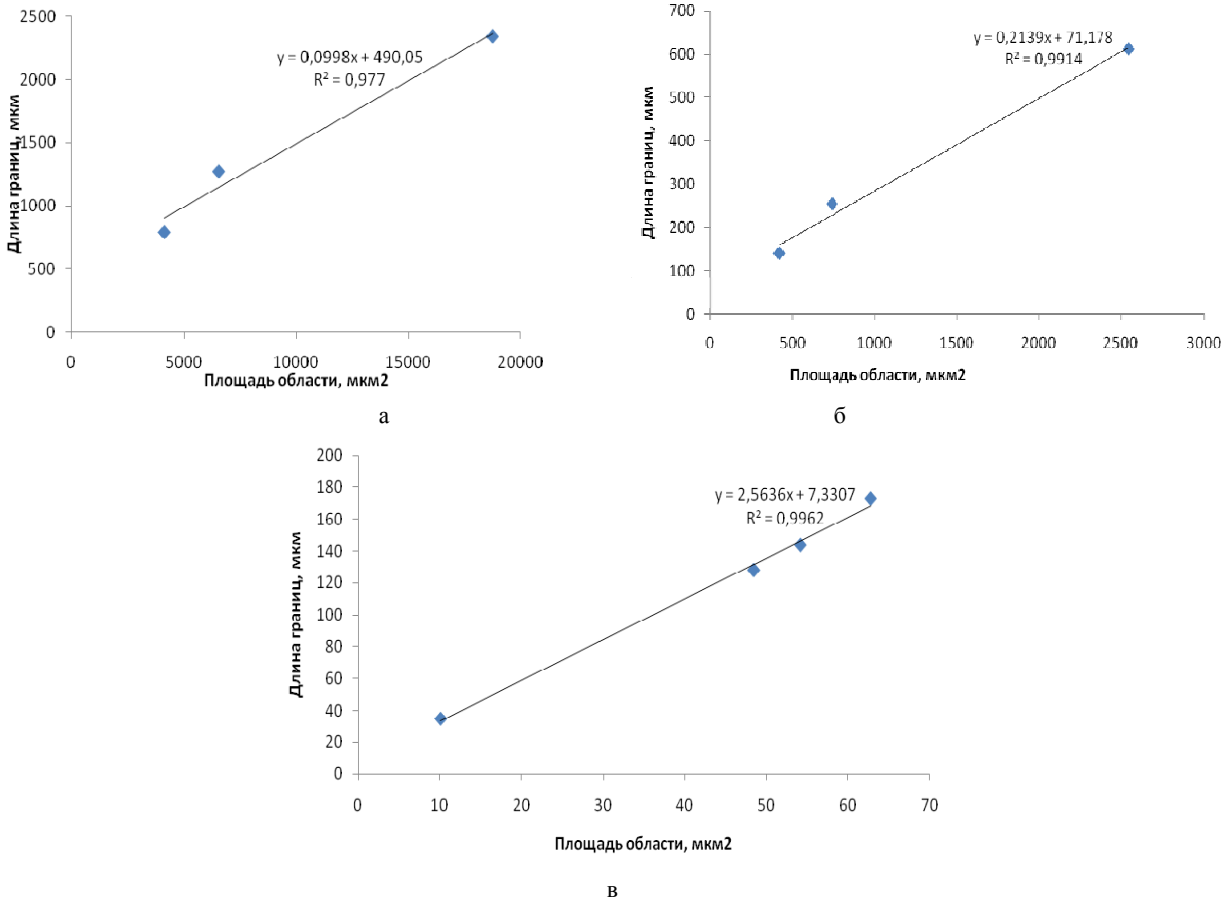


Рис. 4. Зависимость длины границ раздела от площади исследуемой области: а – образец № 1; б – образец № 2; в – образец № 3

Таблица 1

Результаты измерений

Номер образца	Номер измерения	Площадь области S, мкм^2	Длина границ L, мкм	Удельная длина границ раздела, мкм/мкм^2	Среднее значение удельной длины границ раздела, мкм/мкм^2
1	1	4122,48	793,63	0,19	0,17
	2	6549,12	1273,34	0,19	
	3	18752,65	2340,74	0,12	
2	4	421,41	140,66	0,33	0,31
	5	742,24	254,32	0,34	
	6	2543,52	611,64	0,24	
3	7	48,48	128,12	2,64	2,87
	8	62,85	173,06	2,75	
	9	54,19	143,81	2,65	
	10	10,11	34,59	3,42	

Связь детонационных характеристик с микроструктурой

Для установления зависимости между удельной длиной границ раздела кристаллов ВВ и детонационной способностью гексогена-ТТ использовали данные о детонационной способности гексогена-ТТ, полученного с использованием имеющихся различных технологических режимов, и пластичного ВС на его основе. В табл. 2 показана зависимость детонационной способности гексогена-ТТ от среднего значения удельной длины границ раздела кристаллов ВВ.

Таблица 2

Зависимость детонационной способности гексогена-ТТ от среднего значения удельной длины границ раздела кристаллов ВВ

№ образца	Среднее значение удельной длины границ раздела, мкм/мкм^2	Критическая толщина детонации гексогена-ТТ, мм	Критическая толщина детонации ВС на гексогене-ТТ, мм
1	0,17	0,3	1,5
3	2,87	0,1	0,27

На рис. 5 данные табл. 2 представлены в виде зависимости детонационной способности гексогена-ТТ и ВС на его основе от среднего значения удельной длины границ раздела кристаллов ВВ.

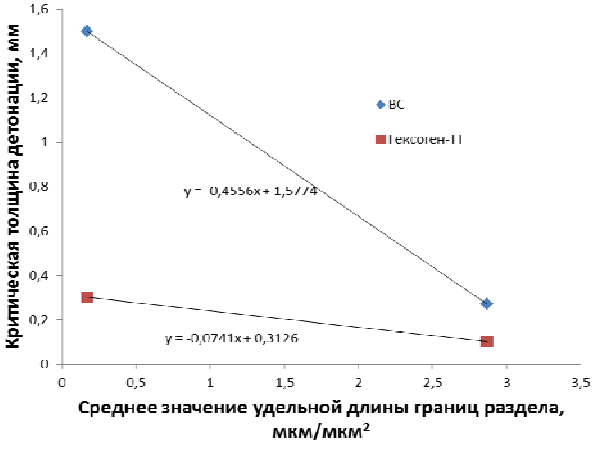


Рис. 5. Зависимость детонационной способности гексогена-ТТ и ВС на его основе от среднего значения удельной длины границ раздела кристаллов ВВ

Из рис. 5 видно, что с увеличением среднего значения удельной длины границ раздела кристаллов ВВ критическая толщина гексогена-ТТ и ВС на его основе уменьшается, т. е. детонационная способность повышается.

В результате проведенной работы определена удельная длина границ раздела гексогена-ТТ образцов № 1–3. Установлено, что указанная характеристика зависит от технологических режимов, с помощью которых получены образцы гексогена-ТТ. Отметим, что с увеличением удельной длины границ раздела детонационная способность как монослоев гексогена-ТТ, так и пластичного ВС на его основе улучшается.

Полученные данные свидетельствуют о наличии количественной зависимости между удельной длиной границ раздела кристаллов ВВ и его детонационной способностью. Предлагаемый контроль микроструктуры ВВ-ТТ, по всей видимости, при надлежащем уровне отработки, может использоваться для предварительной оценки детонационных свойств ВВ-ТТ.

Литература

1. Price D. Shock sensitivity, a property of many aspects. 5th Sympos. (Internate) on Detonation. Pasadena, California, 18-21 August 1970. P. 128–139.

2. Физика взрыва. Под ред. Орленко Л. П. Изд. 3-е перераб. М.: Физмалит, 2002. Т. 1.

3. Котомин А. А., Душенок С. А., Козлов А. С. Критические диаметры детонации гетерогенных взрывчатых систем // Химическая физика энергонасыщенных систем. Известия СПбГТИ (ТУ), 2013. Т. 21.

4. Пат. 2582705, РФ. Способ получения тонкослойных зарядов взрывчатых веществ / Мильченко Д. В., Губачев В. А., Михайлов А. Л., Вахмистров С. А., Титова Н. Н., Пятойкина А. И., Бессонова А. В., Герман В. Н., Андреевских Л. А. // Бюллетень изобретений. 2016.

4. Мильченко Д. В., Губачев В. А., Андреевских Л. А., Вахмистров С. А., Михайлов А. Л., Бурнашов В. А., Халдеев Е. В., Пятойкина А. И., Журавлев С. С., Герман В. Н. Нано-структурированные ВВ, получаемые методом осаждения из газовой фазы. Особенности структуры и взрывчатых свойств // Физика горения и взрыва. 2015. Т. 51, № 1. С. 96–101.

6. Пат. 2616729, РФ. Мильченко Д. В., Михайлов А. Л., Вахмистров С. А., Титова Н. Н., Пятойкина А. И., Бессонова А. В., Журавлев С. С. Способ получения смесевого пластичного взрывчатого вещества. // Бюллетень изобретений. 2017.

СОЗДАНИЕ СТЕНДА И ОТРАБОТКА МЕТОДИКИ ТЕСТИРОВАНИЯ АКТИВНЫХ ДИСКОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА НАЛИЧИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МИКРОВКЛЮЧЕНИЙ

Б. Г. Зималин, С. В. Кошечкин, И. В. Кузьмин, С. А. Макаров, С. В. Мочкаев, В. А. Островский, А. В. Савкин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Активные дисковые элементы (АДЭ) мощных многоканальных лазерных установок на неодимовом фосфатном стекле производятся из заготовок, варка которых осуществляется в платиновых тиглях. Это практически неизбежно ведет к попаданию в стекло частиц платины, что при последующем воздействии лазерного излучения приводит к возникновению разрушений в объеме АДЭ. Поэтому важнейшим параметром качества активных элементов для мощных твердотельных лазерных систем, работающих на фосфатном стекле, является число и размер металлических микровключений платины.

Согласно модели разрушения лазерного стекла из-за наличия платиновых включений, предложенной в [1], лазерное излучение поглощается платиной, при этом тонкий слой платины с фронтальной стороны включения испаряется. Ударная волна проходит сквозь частицу и передается в стекло. Стекло, являясь хрупким материалом, трескается вследствие ударной волны и давления, создаваемого испарившейся платиной. Это разрушение распространяется до тех пор, пока давление паров платины не станет ниже требуемого для дальнейшего распространения трещин.

Визуальный осмотр объема крупногабаритного АДЭ имеет предел обнаружения порядка 30 мкм [2], наблюдения с помощью микроскопа требуют значительного времени. Для визуализации пузырей и непрозрачных микровключений внутри объема стекла АДЭ применяется метод торцевой подсветки [3] с использованием матрицы мощных светодиодов. Пузыри и микровключения становятся видимыми как яркие точки – центры рассеяния излучения подсветки, тогда как пыль на поверхности образца подсвечивается слабо.

Наиболее эффективным методом обнаружения металлических включений является тест на разрушение. Метод тестирования на разрушение заключается в том, чтобы подвергнуть каждую точку образца мощному лазерному облучению. Серия лазерных импульсов из 5–10 выстрелов с плотностью энергии, выше пороговой, позволяет создать в местах нахождения металлических микровключений разрушения, обнаружимые оптическими методами (>30 мкм). Дополнительная серия облучений из 90–100 выстрелов позволяет увеличить разрушения до максимального размера [2, 4, 5].

Целью настоящей работы является создание лазерного стенда и отработка основ методики контроля АДЭ на наличие металлических микровключений.

Стенд контроля активных дисковых элементов на наличие металлических микровключений

Для контроля активных дисковых элементов на наличие металлических микровключений создан специальный лазерный стенд, который состоит из следующих основных систем: лазера, системы контроля параметров излучения, системы позиционирования образца и системы регистрации разрушений.

Лазер

Лазер стенда контроля активных дисковых элементов на наличие металлических микровключений построен по схеме: задающий генератор (ЗГ), система вырезания и тракт усиления. Оптическая схема лазера приведена на рис. 1.

В качестве ЗГ был выбран лазер на кристалле Nd:YAG. Длина волны излучения 1064 нм, длительность импульса ≈40 нс, энергия ≈15 мкДж, стабильность энергии (среднеквадратичное отклонение) ≈3 %. Лазер работает на частоте повторения 10 Гц.

Графики и осциллограмма импульса представлены на рис. 2: рис. 2а – временная форма лазерного импульса ЗГ; рис. 2б – осциллограмма импульсов в режиме накопления сигнала за ~7000 импульсов (~12 минут непрерывной работы).

Излучение *ЗГ*, рис.1, проходит через первый затвор Поккельса *ЗП1,* в котором вырезается импульс требуемой длительности, рис. 2в. Затем «нулевой» пространственный фильтр формирует пучок с гауссовым пространственным распределением. Для оптической развязки усилителей и *ЗГ* используются затворы Фарадея *ЗФ*, рис. 1. Два прохода через первый усилитель *У1* обеспечиваются поляризационным зеркалом *П31* и ячейкой Фарадея *ЯФ* с фазовой пластинкой λ/2. Второй затвор Поккельса *ЗП2* обеспечивает отсутствие самовозбуждения в схеме. Телескоп *Т2* перестраивает изображение пучка из первого усилителя *У1* на заднее зеркало и обратно. Телескоп *Т3* увеличивает апертуру пучка. После одного прохода через второй усилитель *У2* пучок выводится из схемы лазера через фазовую пластинку λ/2 и систему поляризационных зеркал *П32* и *П33*, что позволяет регулировать энергию на выходе лазера.

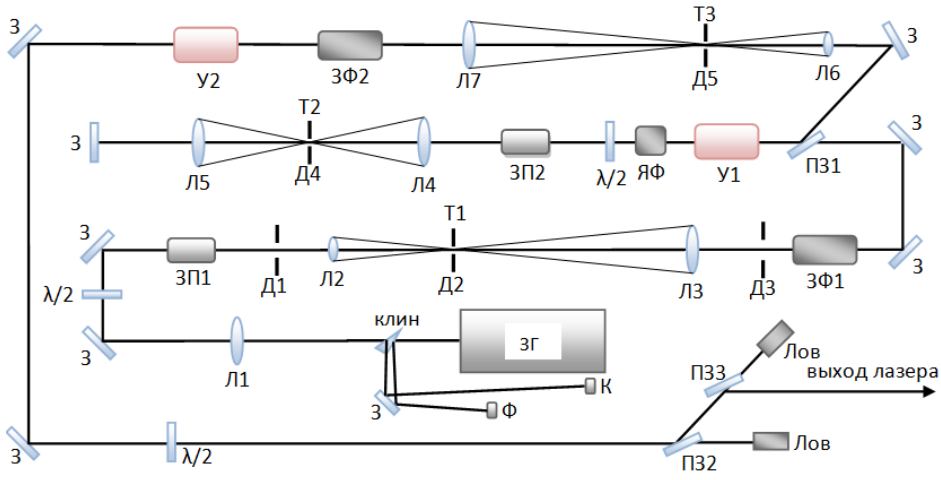
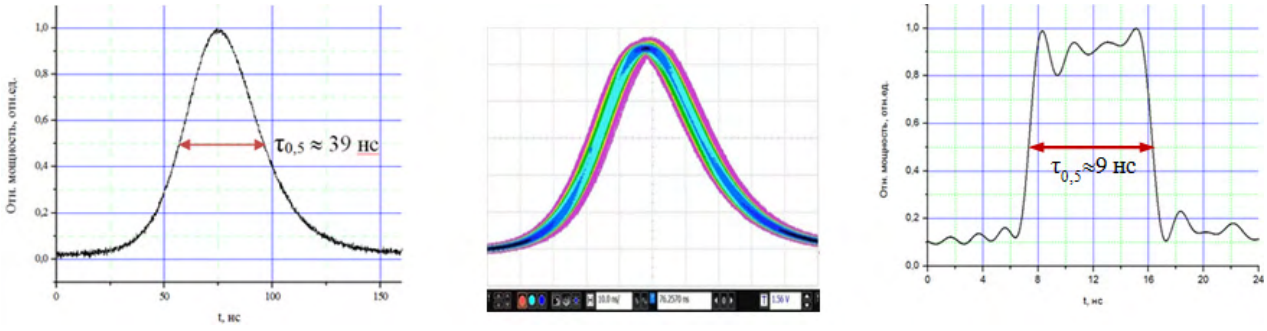


Рис. 1. Оптическая схема лазера стенда контроля наличия микровключений: ЗГ – задающий генератор; З – зеркало; ЗП – затвор Поккельса; Д – диафрагма; ЗФ – затвор Фарадея; ПЗ – поляризационное зеркало; ЯФ – ячейка Фарадея; У – усилитель; λ/2 – фазовая пластинка; Т – телескоп; К – калориметр; Ф – фотодиод; Лов – ловушка; Л – линза



а б в

Рис. 2. Графики и осциллограмма импульсов: а – временная форма импульса ЗГ; б – осциллограмма импульсов ЗГ в режиме накопления сигнала за ~7000 импульсов; в – временная форма импульса после затвора Поккельса ЗП1

Тракт усиления собран на двух квантронах с диодной накачкой и активными элементами из кристалла Nd:YAG диаметром 5 мм (У1, рис. 1) и 10 мм (У2, рис. 1), работающих в двухпроходном и однопроходном режимах, соответственно.

При работе лазера стержни в квантронах нагреваются и в них образуются тепловые линзы. Изменяя токи, подаваемые на усилители, и частоту следования импульсов можно изменять фокусное расстояние тепловой линзы лазера и минимальный размер пятна. Выбран рабочий режим, который позволяет не использовать дополнительную линзу для фокусировки излучения на образец. На выходе второго усилителя (У2, рис. 1) образуется сходящийся пучок с максимальной энергией 240 мДж и минимальным пятном размером d_{1/e^2}= 2,1 мм в фокусе тепловой линзы.

Параметры лазерного излучения на образце

Система контроля параметров предназначена для контроля временной формы, пространственного распределения и энергии лазерного излучения, падающего на исследуемый образец. На рис.3 приведена схема регистрации параметров лазерного излучения. В систему входят: датчик измерения энергии; оптическое волокно и оптический фотодетектор, подключенный к осциллографу; камера регистрации пространственного распределения.

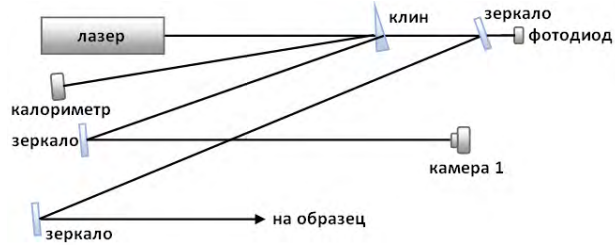


Рис. 3. Схема регистрации параметров лазерного излучения

В табл. 1 приведены основные параметры лазерного излучения стенда контроля наличия микровключений в АДЭ.

Для расчета плотности энергии на образце используется эффективная площадь пучка (площадь пучка с равномерным распределением плотности энергии, равной максимальной плотности энергии в реальном пучке и содержащим такую же энергию), которая определяется следующим образом [6]:

$$S_{eff} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} \varepsilon(x,y)dxdy}{\varepsilon_{pk}}, \quad (1)$$

где $\varepsilon(x,y)$ – пространственное распределение плотности энергии в пятне, а ε_{pk} – максимум данного распределения.

Эффективная длительность импульса t_{eff} – это отношение полной энергии импульса E к максимальной мощности импульса P_{pk} [6]:

$$t_{eff} = \frac{E}{P_{pk}} = \int_0^{\infty} P(t)dt \Big/ P_{pk}. \quad (3)$$

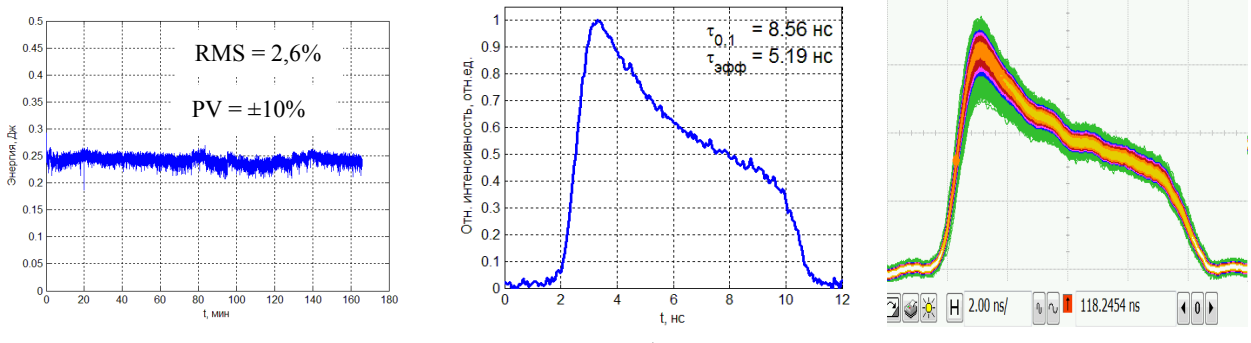
На рис. 4 представлены графики и осциллограмма импульсов: рис. 4а – зависимость энергии на выходе лазера от времени за период ≈2,5 часа, характеризующая стабильность; рис. 4б – характерная временная форма лазерного импульса; рис. 4в – осциллограмма импульсов в режиме накопления сигнала за ~5000 импульсов (~10 мин непрерывной работы).

На рис. 5 представлено характерное пространственное распределение пучка на образце.

Таблица 1

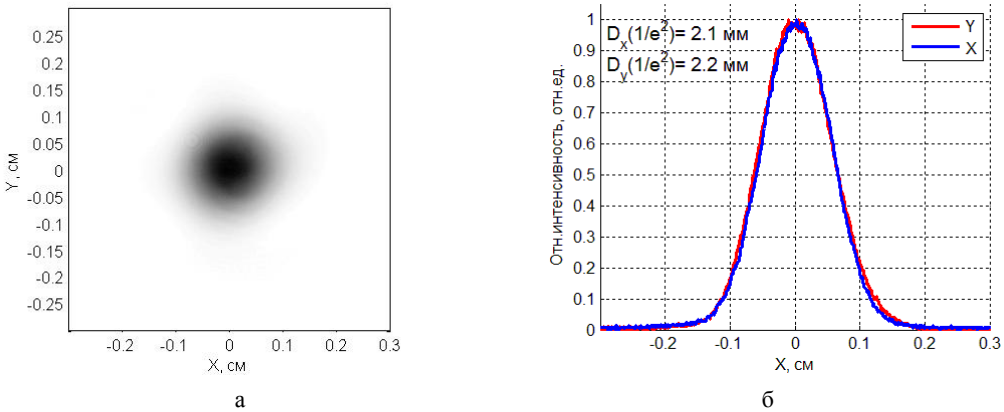
Основные параметры лазерного излучения на образце

Параметр		Значение
Длина волны		1064 нм
Поляризация		линейная
Частота		10 Гц
Энергия лазерного импульса		до 240 мДж
Стабильность энергии	СКО (RMS)	3 %
	максимальный разброс (PV)	±10 %
Длительность импульса	$\tau_{0,1}$	9 нс
	τ_{eff}	5 нс
Диаметр пучка в плоскости образца	$d_{1/e2}$	2,1 мм
	$d_{0,5}$	1,2 мм
	d_{eff}	1,5 мм
Плотность энергии в плоскости образца		до 14 Дж/см^2



а б в

Рис. 4. Графики и осциллограмма импульсов: а – зависимость энергии на выходе лазера от времени за период ≈2,5 часа; б – характерная временная форма импульса на выходе лазера; в – осциллограмма импульсов в режиме накопления сигнала за ~5000 импульсов



а б

Рис. 5. Характерный пространственный профиль лазерного пучка на АДЭ: а – изображение пучка; б – распределение интенсивности в пучке

Исследование каустики пучка показало, что при смещении на ±5 см относительно центра каустики размер пучка не изменяется. При смещении на ±10 см эффективная площадь увеличивается примерно на 3 %. Таким образом, плотность энергии лазерного излучения фактически не изменяется на толщине образца (≈4,8 см) в направлении распространения излучения.

Система позиционирования образца

Система позиционирования предназначена для перемещения образца с целью последовательного облучения всей его поверхности. Образец устанавливается рабочими поверхностями, ориентированными под углом Брюстера к лучу лазера, на платформу, позиционируемую в плоскости X-Z. Образец устанавливается в центре каустики пучка, формируемого тепловой линзой лазера. АДЭ закрепляется в специальную оправу с торцевой подсветкой. Сверху и снизу в оправу встроены диодные ленты. Данная подсветка позволяет хорошо рассмотреть включения и пузыри в объеме образца [3]. На рис. 6 приведена фотография системы позиционирования образца и системы регистрации разрушений.

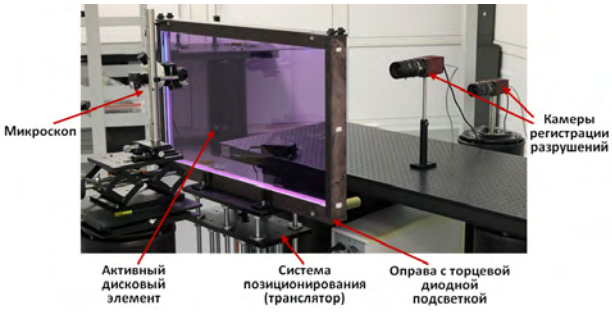


Рис. 6. Системы позиционирования образца и регистрации разрушений

Образцы устанавливаются под углом Брюстера к излучению, так АДЭ располагаются на установке. Это позволяет уменьшить время тестирования. Транслятор перемещает АДЭ с необходимой скоростью в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Скорость сканирования может варьировать для осуществления единичных выстрелов или серии по всему объему образца. Система позиционирования позволяет работать в автоматизированном режиме: после ввода основных параметров запускается транслятор и образец перемещается по заданному алгоритму.

Система регистрации разрушений

Система регистрации разрушений необходима для обнаружения повреждений. В систему входят: две камеры регистрации (камера 2 и 3) и микроскоп.

С помощью камер 2 и 3 АДЭ фотографируется до и после облучения. Камеры устанавливаются на разном расстоянии от образца, чтобы получать фотографии в двух увеличениях. По результатам сравнения фотографий до и после облучения определяется количество появившихся разрушений в объеме образца. Детальное исследование появившихся разрушений проводится с помощью микроскопа.

Методика тестирования активных дисковых элементов на наличие металлических включений

Методика тестирования АДЭ на металлические включения предназначена для обнаружения металлических включений в активных дисковых элементах. Методика основана на тестировании элементов на разрушение, заключающимся в том, чтобы подвергнуть каждую точку образца мощному лазерному облучению, обнаружить появившиеся разрушения, измерить их количество и размеры.

Во время облучения транслятор последовательно смещает образец по горизонтали и вертикали по заданному алгоритму. До и после облучения АДЭ фотографируется. Сравнивая фото образца до и после облучения, определяются положения разрушений. Когда местонахождения повреждений обнаружены, они наносятся на карту разрушений. Размер повреждений измеряется с помощью оптического микроскопа и эталонной миры. Если количество и размер разрушений не превосходят определенных критических значений[1], то разрушения облучаются дополнительно 100 раз для увеличения их размера до максимального.

При выборе алгоритма сканирования АДЭ ключевое значение имеют следующие параметры: скорость движения образца относительно излучения по горизонтали V, смещение между строчками d_z и максимальная плотность энергии на образце ε_{max}. Варьируя три данных параметра можно получать различные режимы облучения с заданным количеством выстрелов в одну точку в определенном диапазоне плотностей энергии. Основной целью при выборе режима сканирования является облучение каждой точки образца не менее чем пятью импульсами с плотностью энергии выше порогового значения (однородное облучение) за минимальное время.

Из работы [2] следует, что для импульса длительностью 6 нс порог разрушения стекла на металлических включениях составляет ≈3,5 Дж/см^2. При тестировании образцов на наличие металлических включений ключевое значение имеет именно количество выстрелов в каждую точку с плотностью энергии выше пороговой.

При проведении экспериментов по тестированию АДЭ использовались два режима облучения АДЭ:

– режим облучения I – обеспечивает самое однородное облучение АДЭ (пять и более импульсов в каждую точку с плотностью энергии выше порога),

[1)] На установке NIF, например, согласно первоначальным требованиям на стекло критическое значение составляло 5 разрушений на слэб размером не более 100 мкм [7], однако при комплектовании каналов использовались слэбы с максимальным числом разрушений 20 и максимальным размером 1000 мкм [8]

но сканирование занимает продолжительное время ~30 часов, также режим I позволяет снизить максимальную плотность энергии;

– режим облучения II – самый быстрый (~15 ч), но не совсем однородный (есть области с облучением четырьмя импульсами в каждую точку с энергией выше порога обнаружения).

В качестве примера рассмотрим режим облучения I, который приведен на рис. 7.

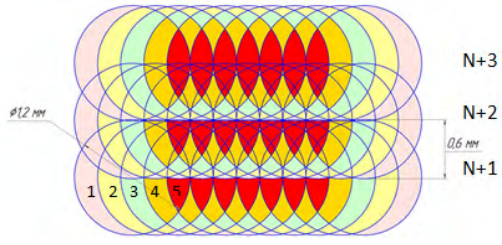


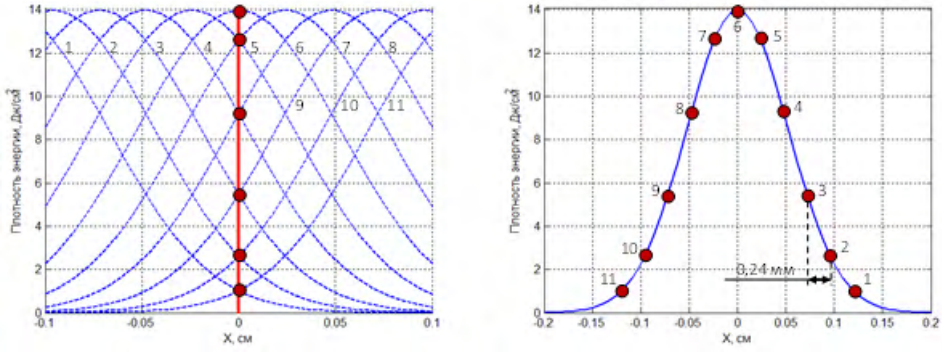
Рис. 7. Режим облучения I

После прохода строчки по горизонтали со скоростью 2,4 мм/с образец смещается на расстояние 0,6 мм (половина диаметра пучка по уровню 0,5) по вертикали, и отстреливается следующая строчка. Окружность – сечение пучка по уровню 0,5 (7 Дж/см^2), цифрами и цветами обозначено количество выстрелов в данную область с плотностью энергии от 7 до 14 Дж/см^2. При флуктуации энергетических параметров излучения в пределах ±10 % минимальная плотность энергии в 7 Дж/см^2 всегда превышает порог разрушения (5,5 Дж/см^2).

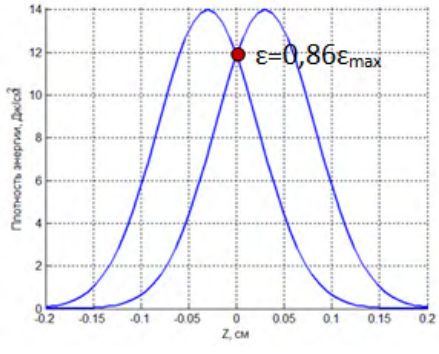
На рис. 8 представлен гауссов пучок и его смещение: рис. 8а – смещение максимума гауссова пучка с постоянной скоростью при движении АДЭ со скоростью V = 2,4 мм/с; рис. 8б – гауссов пучок с отмеченными плотностями энергии, попадающими в одну точку; рис. 8в – пересечение гауссовых пучков при проходе соседних строчек при смещении по оси OZ на радиус пучка по уровню 0,5 (0,6 мм).

На рис. 8а линией обозначена одна и та же точка на образце, в которую попадают данные импульсы. Кружками обозначены плотности энергии, попадающие в эту точку. Таким образом, каждую 0,1 с пучок смещается относительно АДЭ на 0,24 мм и облучает одну и ту же точку на образце с плотностью энергии, показанной на рис. 8б. На рис. 8в кружком обозначена максимальная плотность энергии, попадающая в точки между соседними строчками.

В результате оптимизации параметров облучения получен режим облучения III, который позволяет сканировать образцы за меньшее время (~23 ч), чем в режиме I, при этом облучение получается более однородным, чем в режиме II (пять и более импульсов в каждую точку АДЭ с плотностью энергии выше порога). Стоит отметить, если снизить требование для минимальной плотности энергии с 7 Дж/см^2 до 6 Дж/см^2, то время затрачиваемое на облучение АДЭ составляет примерно 17 ч (режим облучения IV). Данный режим также можно использовать при тестировании АДЭ, но при стабильности энергетических параметров излучения в пределах ±5%.



а б



в

Рис. 8. Графики гауссова пучка и его смещения: а – смещение гауссова пучка с постоянной скоростью при движении по оси OX; б – гауссов пучок с отмеченными плотностями энергии, попадающими в одну точку; б – смещение пучка по оси OZ на 0,6 мм

Отработка методики тестирования активных дисковых элементов на наличие металлических включений

Методика тестирования активных дисковых элементов на наличие металлических включений экспериментально отрабатывалась на активных дисковых элементах в двух режимах облучения.

При исследовании образца № 1 в режиме I даже при сниженной энергии облучения обнаружились многочисленные разрушения, поэтому с целью экспериментального определения величины пороговой энергии обнаружения металлических включений исследовались области образца при нескольких значениях максимальной падающей плотности энергии в пучке:

1) до 7 Дж/см^2 – 100 разрушений на 400 строчках (12,7 шт./литр);

2) до 4 Дж/см^2 – 0 разрушений на 40 строчках;

3) до 5 Дж/см^2 – 0 разрушений на 25 строчках;

4) до 6 Дж/см^2 – 16 разрушений на 65 строчках (12,2 шт./литр);

5) до 7 Дж/см^2 – 38 разрушений на 130 строчках (14,4 шт./литр).

Из полученных результатов следует, что порог разрушения стекла на металлических включениях при облучении образца лазерными импульсами длительностью 5 нс находится в диапазоне от 3,4 до 4 Дж/см^2 (что соответствует падающей плотности энергии от 5 до 6 Дж/см^2 на образец, расположенный под углом Брюстера). Полученный результат согласуется с зависимостью пороговой плотности энергии от длительности импульса, представленной в [2].

На рис. 9 представлены изображения АДЭ № 1 до и после облучения. Черными прямоугольником выделены области, в которых проводились исследования при разных максимальных плотностях энергии от 4 до 7 Дж/см^2. Серыми прямоугольниками с цифрами обозначены области снятые камерой 2 при большем увеличении. Кружками обозначены области, в которых по анализу изображений обнаружены изменения после облучения. На рис. 10 приведены характерные разрушения, появившиеся после облучения.

В этом же режиме проведено тестирование еще одного образца (АДЭ № 2). В результате сравнения изображений до и после облучения обнаружено 13 разрушений в объеме (1 шт./литр). Эти разрушения были подвергнуты дополнительному облучению 100 выстрелов на определение их максимального размера. Плотность энергии в лазерном импульсе составляла 7 Дж/см^2. На рис. 11 показан последовательный рост разрушения, вызванного наличием металлического микровключения, при увеличении количества выстрелов по нему. Как видно из рис. 11, после 100 выстрелов получено разрушение больше миллиметра. На рис. 12 приведены характерные разрушения после облучения 100 импульсов.

а б

Рис. 9. Изображение АДЭ № 1: а – до облучения, б – после облучения

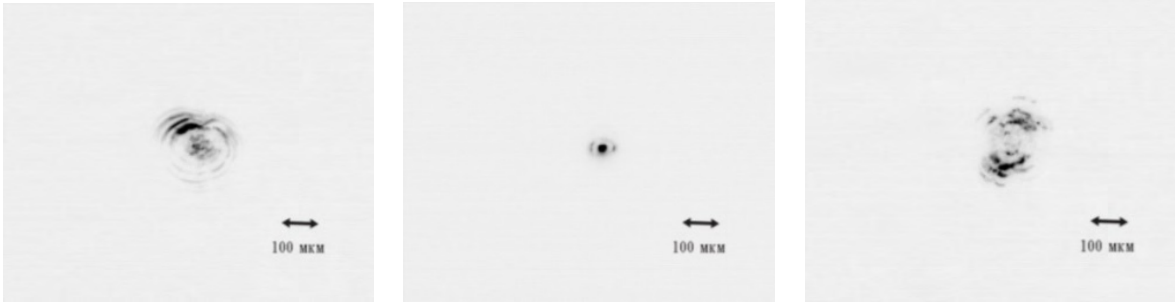
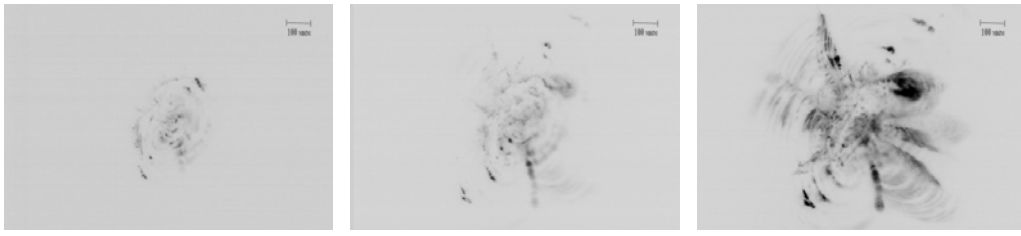


Рис. 10. Изображения характерных разрушений



а б в

Рис. 11. Изображения разрушения после облучения: а – 5-кратного, б – 10-кратного, в – 100-кратного

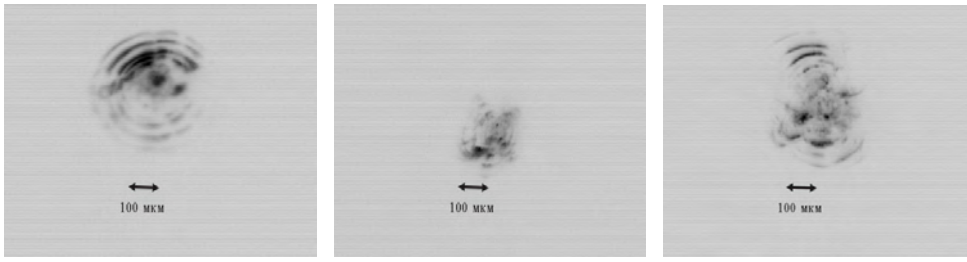


Рис. 12. Изображения характерных разрушений после 100 импульсов

В режиме облучения II проведено тестирование двух АДЭ. В результате тестирования АДЭ № 3 в области облучения зарегистрировано 113 разрушений (9,8 шт./литр). Средний размер разрушений больше 100 мкм. После тестирования АДЭ № 4 получено 92 разрушения (8 шт./литр). Полученные результаты демонстрируют, что режим II также вполне успешно позволяет тестировать АДЭ на наличие металлических включений. Несомненным плюсом данного режима является в два раза меньшее время сканирования образцов, по сравнению с режимом I. Поэтому последующие тестирования еще пяти образцов проводились в режиме облучения II.

В табл. 2 приведены результаты тестирования образцов на наличие металлических включений. Все представленные образцы изготовлены из стекла КНФС 3.

Таблица 2

Результаты тестирования образцов на наличие металлических включений

№	Образец	Исследованная область, мм^3	Количество разрушений		Режим облучения
			шт.	шт./литр	
1	АДЭ № 1	700×360×47	154	13	режим I
2	АДЭ № 2	700×400×46	13	1	
3	АДЭ № 3	700×400×41	113	9,8	режим II
4	АДЭ № 4	700×400×41	92	8	
5	АДЭ № 5	700×420×41	39	3,2	
6	АДЭ № 6	700×420×41	23	1,9	
7	АДЭ № 7	700×420×41	21	1,7	
8	АДЭ № 8	700×420×41	19	1,6	
9	АДЭ № 9	700×420×41	10	0,8	

Заключение

В результате выполнения настоящей работы:

1) создан стенд тестирования активных дисковых элементов на наличие металлических микровключений, в который входят следующие системы: лазер, система контроля параметров излучения, система позиционирования образца и система регистрации разрушений. Основные параметры лазерного излучения: длина волны $\lambda = 1064$ нм, частота $\nu = 10$ Гц, максимальная плотность энергии в плоскости образца $\varepsilon_{макс} = 14$ Дж/см^2, длительность импульса $\tau_{eff} = 5$ нс;

2) описана методика тестирования АДЭ на наличие металлических микровключений, рассмотрены четыре режима облучения;

3) проведены исследования по нахождению порога разрушения АДЭ на металлических включениях при облучении лазерными импульсами длительностью $\tau_{eff} = 5$ нс. Из полученных результатов следует, что порог находится в диапазоне (3,7±0,3) Дж/см^2 (плотность энергии внутри образца, расположенного под углом Брюстера);

4) экспериментально отработана методика тестирования АДЭ на наличие металлических микровключений. Приведены результаты тестирования АДЭ. Отработанный подход тестирования образцов оказался успешным и позволяет обнаружить металлические микровключения в стекле активных дисковых элементов. В качестве рабочего режима, на настоящий момент рекомендуется режим II, занимающий наименьшее время сканирования.

Литература

1 Pitts J. H. Modeling Laser Damage Caused by Platinum Inclusions in Laser Glass, in Laser Induced Damage in Optical Materials / Proceedings of the Boulder Damage Symposium. Boulder, Colorado, Oct. 1985.

2 Milan O., Hatcher C. W., Campbell J. H. Platinum Particles in the Nd:doped Disk of Phosphate Glass in the Nova Laser, in Laser Induced Damage in Optical Materials // Proceedings of the Boulder Damage Symposium. Boulder, Colorado, Oct. 1985.

3 Rainer F. Mapping and Inspection of Damage and Artifacts in Large-Scale Optics // LLNL. December 22, 1997.

4 Gonzales R. P., Milan O. Evolution During Multiple-Shot Irradiation of Damage Surrounding Isolated Platinum Inclusions in Phosphate Laser Glasse, in Laser Induced Damage in Optical Materials // Proceedings of the Boulder Damage Symposium. Boulder, Colorado, Oct. 1985.

5 Weinzapfel C. L, Greiner G. J., Walmer C. D. Large scale damage testing in a production environment. Lawrence Livermore National Laboratory.

6 International standard ISO 11254-1_2000. First edition 2000-06-01.

7 Campbell J. H., Ehrmann P., Suratwala T. I. and all. Properties of and Manufacturing Methods for NIF Laser Glasses. FUSION, ICF Quarterly report, 1999. Vol. 9, N 2. P. 7–124.

8. Suratwala T. I., Campbell J. H., Miller P. E. and all. Phosphate laser glass for NIF: production status, slab selection and recent technical advances. Optical Engineering at the Lawrence Livermore National Laboratory, 2004.

ВЛИЯНИЕ МЕТОДОВ ОЧИСТКИ ПОВЕРХНОСТИ ПОДЛОЖКИ ПЕРЕД НАНЕСЕНИЕМ ОПТИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ НА ЛУЧЕВУЮ ПРОЧНОСТЬ ИЗДЕЛИЯ

И. С. Макогон, Е. В. Краев

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Пленки, нанесенные на преломляющие и отражающие грани оптических элементов, позволяют формировать требуемые, разнообразные спектральные кривые отражения и пропускания. Незначительная масса и относительная простота реализации позволяют широко применять интерференционные покрытия.

Самыми распространенными видами интерференционного покрытия являются зеркальные и просветляющие покрытия. Высокоотражающие покрытия состоят из относительно большого количества пар слоев диэлектрических материалов. Толщина и количество пар слоев определяется исходя из условий получения требуемого отражения на заданной длине волны и рабочем угле отражения. Просветляющие покрытия, как правило, состоят из пары слоев оксидов с разными оптическими свойствами. Варьируя толщины и показатели преломления слоев, возможно увеличить спектральный диапазон и уменьшить остаточное отражение.

Спектральные свойства оптических покрытий определяются конструкцией интерференционных систем, методом нанесения слоев, их природой, а так же материалом и поверхностью оптической детали (подложки). Контроль технологических параметров, режимов нанесения слоев в процессе формирования покрытий и использование чистых пленкообразующих материалов обеспечивают высокую воспроизводимось свойств покрытий.

Состояние поверхности подложки в свою очередь зависит от предварительной обработки и вносит вклад в лучевую прочность конечного изделия. Особенно существенное влияние заметно на просветляющих покрытиях. Данный факт связан с тем, что на поверхность подложки падает вся энергия лазерного излучения, и малейшие дефекты поверхности – внедренные в поверхность подложки частицы полировального кампаунда, микротрещины – начинают играть заметную роль [1].

Перед нанесением оптического покрытия подложку необходимо очистить от остаточных загрязнений после изготовления и полировки, а так же от загрязнений, возникших в результате ручных манипуляций с подложкой. В данной работе был исследован вклад методов очистки поверхности подложки в лучевую прочность изделия.

Методы очистки

Очистка оптических деталей на большинстве отечественных предприятиях реализуется вручную, с помощью безворсовых салфеток с применением этилового спирта и других растворителей. Автоматизация процесса очистки оптики приводит к устранению влияния человеческого фактора и повышению производительности труда. Тем не менее автоматические мойки имею ряд недостатков, ограничивающих их применение. В частности высокую цену, наличие специальных чистящих материалов для каждой ванны и значительный их расход.

Основным химическим растворителем, используемыми для очистки является этиловый гидролизный 96 % спирт. Он хорошо удаляет отпечатки пальцев и растворяет мыло, однако плохо растворяет минеральные масла, животные жиры и из-за медленного испарения воды при очистке возможно возникновение мазков. Для решения данных проблем и более эффективной чистки рекомендуется использовать этиловый осушенный 98 % спирт, который не оставляет мазков.

Ультразвуковая очистка позволяет удалять крупные жировые загрязнения вследствие интенсивного локального перемешивания под действием, создаваемых в растворителе ударных волн. Растворитель, насыщенный примесями непрерывно удаляется с поверхности подложки, а его заменяет чистый растворитель. Механические колебания, создаваемые в подложке, способствуют удалению макро загрязнений и пыли. После промывки подложку следует извлекать таким образом, чтобы на поверхности оставалось минимальное количество жидкости. Остающиеся на поверхности капли воды при высыхании образуют видимые пятна, изменяющие свойства формируемого покрытия, поэтому после промывки рекомендуется провести дополнительную протирку с использование этилового спирта [2].

Растворы кислот взаимодействуют с загрязнениями, превращая их в более растворимые соединения, однако их использование для очистки имеет ограничения из-за недостаточной химической стойкости материалов подложки. Вследствие этого существует необходимость подбора концентрации и режима обработки эмпирическим путем для каждого типа подложки. Для стеклянных подложек было определено, что оптимальный режим обработки является смачивание в 0,3 % растворе плавиковой кислоты HF.

На основе анализа литературных данных и имеющихся возможностей были выделены 6 методов очистки:

1) ручная протирка безворсовой тряпкой с применением этилового гидролизного спирта;

2) ручная протирка безворсовой тряпкой с применением этилового осушенного спирта;

3) обработка подложки в слабом растворе (0,3 %) HF длительностью 1 мин. с последующей ручной протиркой этиловым осушенным спиртом;

4) обработка подложки в слабом растворе HF (0,3 %) длительностью 2 мин. с последующей ручной протиркой этиловым осушенным спиртом;

5) ультразвуковая очистка в дистиллированной воде с последующей протиркой этиловым осушенным спиртом;

6) ультразвуковая очистка в дистиллированной воде без протирки.

Условия и техника проведения эксперимента

Для оценки влияния методов очистки подложек на лучевую прочность использовались плоскопараллельные пластины диаметром 75 мм, изготовленные одной партией из стекла марки К8 методом полировки.

Шесть образцов, очищенные приведенными выше методами, загружаются в камеру вакуумной напылительной установки для одновременного нанесения оптического покрытия.

В качестве наносимого покрытия было выбрано просветляющее двухслойное покрытие на основе диоксида гафния HfO_2 и диоксида кремния SiO_2. Данное покрытие выбрано опираясь на мировой опыт и литературные источники, согласно которым комбинация данных материалов для просветляющего покрытия обладает наибольшей лучевой прочностью.

Перед нанесением тонкой пленки вакуумная камера очищается от продуктов напыления, производится закладка материала в чистый тигель электронной пушки. В планетарную систему вращения помещаются образцы. Для оптического контроля помещается свидетель в устройство смены свидетеля, оптический монитор калибруется и при необходимости настраивается. Откачка вакуумной камеры производится с помощью безмасляного винтового насоса и криогенного насоса. Давление в камере контролируется с помощью широкодиапазонного вакуумметра. После откачки камеры до давления $1 \cdot 10^{-4}$ мБар включается прогрев, реализованный в виде кварцевых ламп суммарной мощностью 4,5 кВт. Камера и подложки прогреваются до температуры 200 °С для удаления адсорбированных газов с поверхности подложки и вакуумной арматуры. После прогрева производится ионная очистка пучком ионов с высокой энергией. На момент начала процесса нанесения тонкой пленки остаточное давление газов в камере не превышает $2 \cdot 10^{-5}$ мБар. Температура внутри камеры устанавливается на уровне 100 °С для отсутствия эффекта удаления дополнительно поступающего кислорода с поверхности подложки.

Покрытия наносятся одновременно на все образцы, находящиеся в камере. Это позволяет оценить влияние только метода очистки подложек, так как все остальные условия принимаются равнозначными. После нанесения покрытия образцы выдерживаются в камере до комнатной температуры.

Результаты эксперимента

До и после напыления были проведены измерения шероховатости поверхности подложки на оптическом профилометре. Измерения проводились в 10 точках, размер измеряемой зоны 140 на 115 мкм. Средняя шероховатость образцов представлена в табл. 1.

Таблица 1

Средняя шероховатость образцов

Номер метода очистки	Шероховатость до обработки, нм	Шероховатость после обработки, нм
1	1,05	1,0
2	1,03	1,09
3	1,00	0,97
4	1,07	0,71
5	1,01	1,05
6	1,07	1,02

Из табл. 1 следует, что средняя шероховатость образцов не изменилась, за исключением образца № 4. Это связано с тем фактом, что обработка в растворе плавиковой кислоты в течение двух минут позволила стравить неровности и тем самым сгладить поверхность. Основное воздействие плавиковая кислота оказывает на острия и трещиноватый слой, оставшиеся после механической полировки образцов. При реакции с кислотой профиль поверхности «выравнивается» – острия сглаживаются, трещиноватый слой уменьшается, снижая общую шероховатость подложки.

Визуальный осмотр под микроскопом после напыления показал, что на подложках 1 и 6 присутствуют мазки, оставленные от испарения этилового гидролизного спирта и дистиллированной воды.

После напыления образцы обрабатывались ионизатором для снятия поверхностного заряда и передавались на измерение лучевой прочности по методике 1-on-1. Измерения проводились при длительности импульса лазерного излучения 3 нс на длине волны 1064 нм. Исследуемые образцы подвергались облучению серией импульсов с одинаковой энергией. Затем энергия излучения изменялась, и облучение образцов проводилось по следующему ряду. Процедура повторялась до тех пор, пока не были получены несколько значений плотности энергии с вероятностью разрушения от 0 до 100 %. Порогом считалась плотность энергии, при которой вероятность разрушения равна нулю. Результаты определе-

ния порога разрушения представлены в табл. 2. В табл. 2 приведены значения порога разрушения при 0 % вероятности разрушения (столбец 1-on-1 0 %), при 50 % вероятности разрушения (столбец 1-on-1 50 %), при 100 % вероятности разрушения (столбец 1-on-1 100 %).

Таблица 2

Значение порога разрушения

Метод очистки	1-on-1 0%, Дж/см^2	1-on-1 50%, Дж/см^2	1-on-1 100%, Дж/см^2
1	0,5	2,5	4,5
2	0,8	4,7	8,6
3	0,8	2,5	4,3
4	1,9	4,3	8,7
5	0,8	4,2	7,8
6	0,15	2,5	4,8

Из табл. 2 следует, что образцы 1, 2, 3 и 5 имеют приблизительно одинаковое значение лучевой прочности, в пределах 0,5–0,8 Дж/см^2. Порог разрушения образца 4 почти в 3 раза выше и составляет 1,9 Дж/см^2. Образец 6 имеет самую низкую лучевую прочность 0,15 Дж/см^2.

Исходя из полученных данных, можно сделать несколько выводов:

1) этиловый осушенный 98 % спирт, в отличие от этилового гидролизного 96 % спирта, не оставляет после себя мазков;

2) применение ультразвуковой очистки подложек перед нанесением покрытия применяется в случае наличия остаточных загрязнений после изготовления заготовок. Дополнительная обработка перед нанесением покрытия не играет роли в величине лучевой прочности конечного изделия;

3) применение раствора плавиковой кислоты в течение одной минуты не дает положительного эффекта, обработка в течение двух минут позволяет повысить лучевую прочность более чем в 2 раза, а так же уменьшает шероховатость поверхности подложки.

Литература

1. Бабаянц Г. И., Гаранин С. Г., Жупанов В. Г., Клюев Е. В., Савкин А. В. и др. Разработка и исследование диэлектрических покрытий с высокой лучевой прочностью // Квантовая электроника. 2005. № 35.

2. Технология тонких пленок (справочник) / Под. ред. Елинсона М. И., Смолко Г. Г. Пер. с англ. М.: Сов. Радио, 1977. Т. 1. С. 664.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНВЕРСИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЭНЕРГИЮ ПЛАЗМЫ, ОТРАЖЕННОГО СВЕТА И РЕНТГЕНА

С. П. Мартыненко, А. А. Горбунов, В. В. Иванов, П. Ю. Лопатин, Р. В. Гаранин, А. В. Кострикин, В. Н. Пугачева, И. А. Белов, А. Н. Рукавишников, И. В. Никольский

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Во многих лабораториях мира ведутся интенсивные исследования физических процессов, происходящих при взаимодействии мощного лазерного излучения с высокотемпературной плазмой. Глубокое понимание этих процессов необходимо в частности для ответа на вопрос о возможности практической реализации лазерного термоядерного синтеза.

Хотя к настоящему времени выполнено большое количество теоретических и экспериментальных работ, посвященных взаимодействию лазерного излучения (ЛИ) с различными типами мишеней, остаются вопросы в механизме поглощения и рассеяния ЛИ плазмой, в понимании процесса генерации ею рентгеновского излучения (РИ).

Изучение этого круга вопросов в экспериментах со сферическими мишенями представляет значительные трудности. Вместе с тем, некоторые основные закономерности происходящих процессов можно изучать и в более простых по постановке опытах на плоских мишенях.

Целью данной работы являлось исследование характера пространственного распределения энергии плазмы, РИ и рассеянного ЛИ в результате взаимодействия ЛИ с плоской золотой мишенью при следующих условиях: лазерный импульс с длиной волны $\lambda = 527$ нм и длительностью 4 нс воздействует на плоскую золотую фольгу толщиной 30 мкм с интенсивностью в диапазоне $I = (0{,}8 \div 5) \cdot 10^{14}$ Вт/см^2.

Для достижения поставленной цели было необходимо решить ряд задач:

1) выбрать метод для исследования баланса энергии и индикатрисы рассеяния;

2) произвести калибровку калориметров в интересующем диапазоне длин волн;

3) провести серию экспериментов по исследованию конверсии лазерного излучения в рентгеновское излучение и изучению индикатрисы отраженного ЛИ и плазмы.

Методика исследования характера пространственного распределения энергии разлетающейся плазмы, РИ и рассеянного ЛИ основывалась на использовании калориметрической сборки [1], однако, она была переработана для регистрации энергий, близких к минимальному пороговому значению используемых калориметров. Схема была дополнена усилителями постоянного тока, коэффициент усиления которых мог изменяться от $1 \cdot 10^3$ до $1 \cdot 10^5$. Калориметрическая сборка состояла из плазменно-световых калориметров (ПСК) и рентгеновских калориметров (РК), конструкция которых будет описана ниже.

На рис. 1 приведена схема устройства ПСК [2].

ЛИ, рассеянное плазмой, вместе с потоком частиц и РИ через входную диафрагму *1* попадает на приемную площадку *2* плазменного калориметра. Приемная площадка *2* представляет собой диск из стекла К8 толщиной 1 мм, имеющего на длине волны ЛИ $\lambda = 527$ нм коэффициент поглощения <1 % [3]. С учетом отражения лазерного излучения от граней стекла 95 % всего излучения данного диапазона частот проходит через стекло К8, попадает на площадку *3*, где поглощается. Площадка *3* представляет собой диск из стекла НС12, которое на длине волны 527 нм имеет коэффициент пропускания ЛИ <0,1 % [4]. Нагрев площадки *2* обусловлен поглощением в ней энергии потока плазмы и РИ [3]. Разница температуры между приемными площадками *2, 5* и термостатом *6* измеряется с помощью термоэлектрических модулей, на основе полупроводниковых твердотельных электрических микроохладителей ТЭМО-8 *4* [5, 6]. Термостатом является латунная шайба, имеющая вес много больше, чем вес приемной площадки. Определение поглощённой энергии проводится путем одновременного измерения многоканальной системой сбора данных сигналов с термоэлектрических модулей с учетом калибровки каждой из приемных площадок.

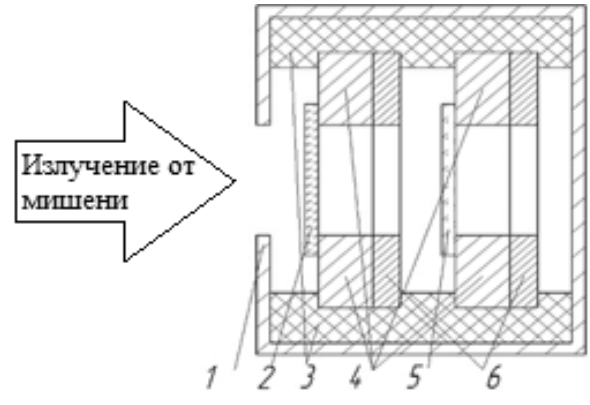


Рис. 1. Конструктивная схема ПСК: 1 – входная диафрагма; 2 – приемная площадка плазменного калориметра (стекло К8); 3 – диэлектрические проставки; 4 – твердотельные электрические микроохладители; 5 – приемная площадка светового калориметра (стекло НС12); 6 – термостаты

На рис. 2 изображена схема калориметрической сборки ПСК, которая была установлена в камере на

расстоянии 185 мм от мишени. Сборка представляла собой 13 ПСК, размещенных в одной плоскости, равномерно по дуге с шагом 15°. Величина полного угла, стягиваемого дугой, составляла 180°.

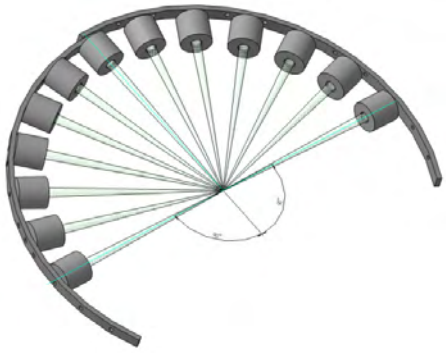


Рис. 2. Схема калориметрической сборки ПСК, участвовавшей в экспериментах по исследованию конверсии ЛИ в РИ

В отличие от работы [1] облучение мишеней ЛИ проводилось под тремя углами падения: 0, 30 и 60 градусов. Калориметрические измерения проводились в двух плоскостях: в плоскости падения ЛИ и в плоскости, перпендикулярной плоскости падения.

В зависимости от задач эксперимента, ось центрального калориметра совпадала с нормалью мишени – в экспериментах, в которых дуга калориметрической сборки располагалась в плоскости падения ЛИ, либо с осью отражённого от мишени ЛИ – в экспериментах, в которых плоскость падающего ЛИ перпендикулярна плоскости калориметрической сборки.

РК также были расположены в одной плоскости равномерно по дуге окружности на расстоянии 500 мм от мишени. Величина центрального угла, стягиваемого дугой, составляла 90°. Принципиальная схема устройства РК изображена на рис. 3 [2].

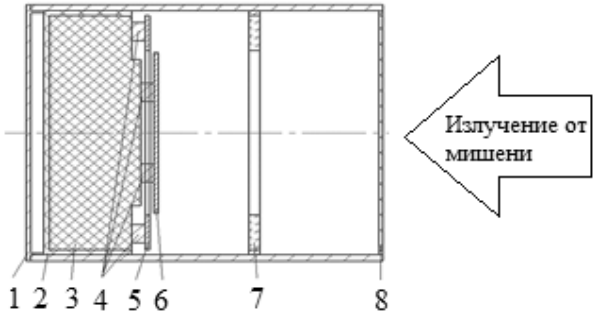


Рис. 3. Принципиальная схема устройства рентгеновского калориметра: 1 – корпус калориметра; 2 – термоизоляционная подложка; 3 – тело термостата; 4 – твердотельные электрические микроохладители; 5 – фоновая приемная площадка, 6 – основная приемная площадка; 7 – защитное стекло; 8 – фильтр $C_{10}H_8O_4$ (0,5 мкм)

В конструкции рентгеновского калориметра использовались две медные приемные площадки, толщиной 250 мкм одинаковой площади и массы. Одна из площадок выполнена в виде диска ∅40 мм, расположенного внутри второй приемной площадки, выполненной в виде кольца с внешним диаметром ∅64 мм и шириной 9,5 мм. Для уменьшения поглощения излучения видимого диапазона их поверхность выполнена зеркальной с нанесением слоя Cr. Внешняя кольцевая площадка защищена от воздействия РИ с помощью кольца тех же размеров, выполненного из стекла толщиной 1,2 мм, и служит для измерения вклада в полезный сигнал энергии рассеянного ЛИ.

Для отсечения потока плазмы на калориметр устанавливался рентгеновский фильтр из $C_{10}H_8O_4$ (полиэтилентерефталат, лавсан), который эффективно пропускает рентгеновское излучение. Спектральная характеристика фильтра представлена на рис. 4.

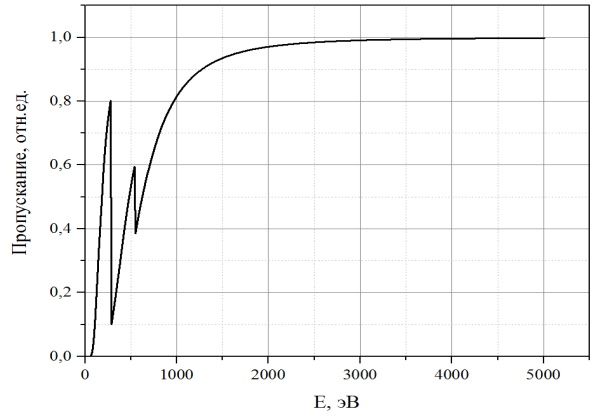


Рис. 4. Спектральная характеристика фильтра $C_{10}H_8O_4$ 0,5 мкм

Перед проведением экспериментов проводилась калибровка обоих видов калориметров. Процесс калибровки ПСК заключался в определении чувствительности каждого калориметра к известной величине энергии ЛИ в интересующем диапазоне. Для этого использовался твердотельный импульсно-периодический лазер с рабочей длиной волны 532 нм для имитации рассеянного ЛИ и 266 нм для имитации излучения плазмы. Энергия ЛИ достаточно точно измеряется (с погрешностью 2,5 %) калиброванными средствами.

Принципиальная схема калибровочного комплекса изображена на рис. 5.

ЛИ из *1* с помощью телескопа *2* и фокусирующей линзы *3* трансформировалось и вводилось в вакуумную камеру *7*. В центре вакуумной камеры *7* располагался калориметр *6,* на исследуемую площадку которого подавалось ЛИ необходимой длины волны. Энергетические параметры ЛИ контролировались с помощью калиброванного на заданную длину волны измерителя энергии *4* путем отражения части энергии от клина *5*. Давление в вакуумной камере составляло $\approx 5 \cdot 10^{-5}$ Торр. Сигналы с калибруемых калориметров усиливались с помощью усилителей постоянного тока, и регистрировались многоканальной системой сбора данных.

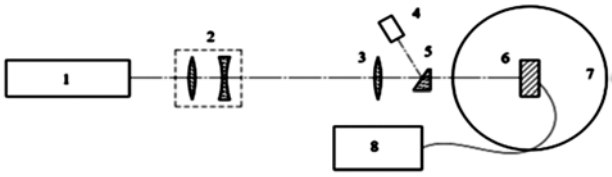


Рис. 5. Принципиальная схема калибровки калориметров: 1 – лазерный комплекс; 2 – телескоп; 3 – фокусирующая линза; 4 – калориметр; 5 – клин; 6 – калибруемая площадка калориметра; 7 – вакуумная камера; 8 – многоканальная система сбора данных с усилителями

Калибровка плазменно-световых калориметров заключалась в определении чувствительности каждого калориметра к известной величине энергии ЛИ в интересующем диапазоне длин волн. Так же процесс калибровки включал в себя исследование взаимного влияния площадок.

Погрешность калибровки определялась следующими факторами:

1) погрешностью работы усилителей постоянного тока, используемых в тракте регистрации – 2,5 %;

2) погрешностью прибора регистрации сигналов – паспортное значение, которое зависит от уровня измеряемого сигнала и от диапазона регистрации, составляет 1 %;

3) взаимным влиянием площадок калориметров. Вклад сигнала с площадки К8 в сигнал с площадки НС12 – 2 %, и вклад сигнала с площадки НС12 в сигнал с площадки К8 –5 %;

4) пропусканием площадки К8 на длине волны 248 нм – 3 %;

5) погрешность контрольного калориметра – 2,5 %;

6) погрешностью работы термоэлектронных микроохладителей – 10 %.

Погрешность для ПСК высчитывалась по формуле:

$$\delta W_{\text{пск}} = \sqrt{\delta W_1^2 + \delta W_2^2 + ... + \delta W_6^2}. \qquad (1)$$

Таким образом, погрешность значений, полученных при калибровке ПСК, составила 12 % для площадки К8 и 11 % для площадки НС12. Полученные значения чувствительностей площадок к поглощенному излучению для используемых ПСК с учетом погрешности представлены в табл. 1.

Разница чувствительностей площадок различных калориметров может быть связана с конструкционными особенностями калориметров.

Перед проведением экспериментов проводилась калибровка РК. Она включала в себя определение чувствительности центральной площадки к поглощенному излучению и оценку вклада ЛИ в общий сигал с помощью лазерного комплекса. На поверхность центральной площадки наносилось несколько слоев пламенной сажи, поглощающий 98 % всего падающего излучения (532 нм), с массой много меньше массы самой приемной площадки.

Погрешность для РК обуславливалась следующими параметрами:

Таблица 1

Данные по калибровке ПСК с учетом погрешностей

Номер калориметра ПСК	Чувствительность площадки К8, мВ/Дж	Чувствительность площадки НС12, мВ/Дж
1	0,8±0,1	0,9±0,1
2	0,68±0,08	0,8±0,1
3	0,8±0,1	0,86±0,09
4	1,2±0,1	1,0±0,1
5	1,4±0,2	1,2±0,1
6	2,3±0,3	1,9±0,2
7	1,9±0,2	1,9±0,2
8	2,1±0,3	1,5±0,2
9	1,9±0,2	1,9±0,2
10	1,9±0,2	2,0±0,2
11	2,1±0,3	2,1±0,2
12	0,8±0,1	0,86±0,09
13	0,72±0,09	0,8±0,1

1) погрешностью прибора регистрации сигналов – 1 %;

2) погрешность контрольного калориметра – 2,5 %.

3) взаимным влиянием площадок – 3,5 %;

4) погрешностью работы термоэлектронных микроохладителей – 10 %.

Тогда погрешность для РК высчитывалась по формуле:

$$\delta W_{\text{брк}} = \sqrt{\delta W_1^2 + \delta W_2^2 + \delta W_3^2 + \delta W_4^2}. \qquad (2)$$

Таким образом, погрешность калибровки составила 11 %. Значения полученных чувствительностей к поглощенному излучению для используемых калориметров с учетом полученных погрешностей представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значения чувствительностей для РК

Номер рентгеновского калориметра	Чувствительность мВ/Дж
1	0,78±0,09
2	7,3±0,9
3	3,9±0,4
4	4,5±0,5
5	14±2

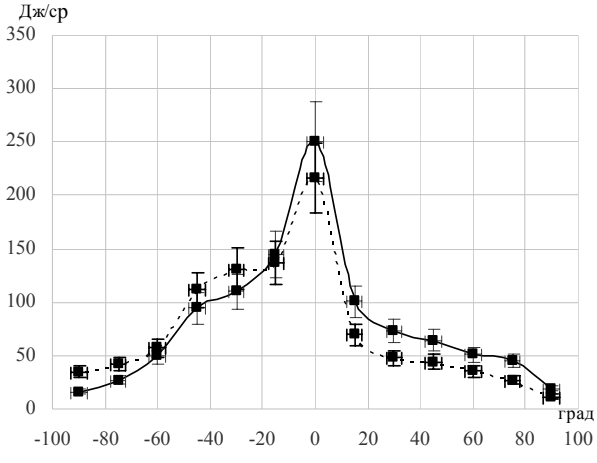
Как и в случае с ПСК разница чувствительностей площадок различных калориметров также может быть связана с их конструкционными особенностями.

На рис. 6 показано расположение диагностик в камере взаимодействия при проведении исследования конверсии ЛИ в РИ. Показано расположение калориметрических сборок относительно плоскости падающего ЛИ.

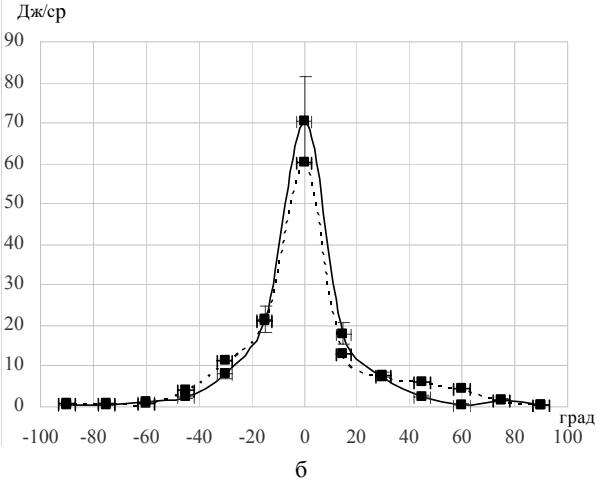
а б

Рис. 6. Расположение калориметрических сборок в камере взаимодействия в экспериментах при измерениях в разных плоскостях падения ЛИ на мишень: а – в плоскости падения ЛИ, б – в перпендикулярной плоскости падения ЛИ; 1 – ЛИ; 2 – мишень; 3 – ПСК; 4 – рентгеновские калориметры; 5 – обскура (для измерения интенсивности ЛИ на мишени); 6 – электронные спектрометры; 7 – позиция центрального калориметра

Результаты измерений приведены на рис. 7–9.



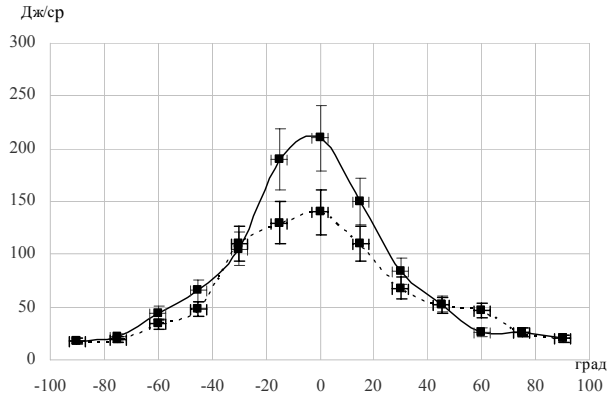
а



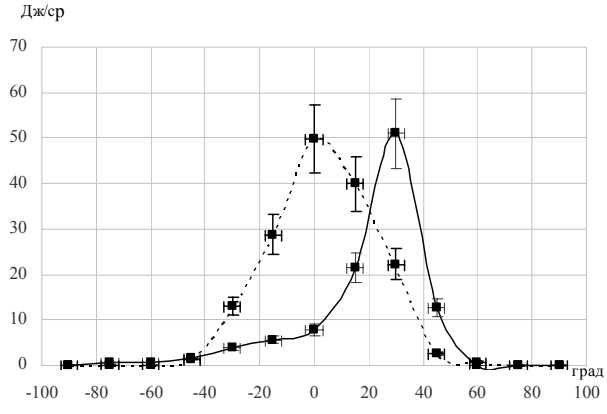
б

Рис. 7. Типичные результаты измерений в экспериментах с углом падения ЛИ на мишень 0°: а – плазменных калориметров; б – световых калориметров

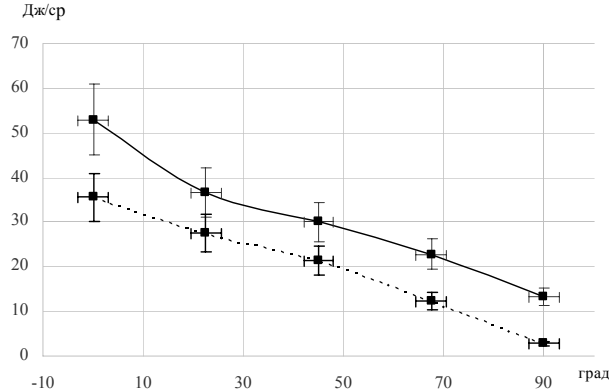
На рис. 7 сплошной линией изображены эксперименты с расположением дуги калориметров в плоскости падения ЛИ, пунктирной линией изображены результаты экспериментов при расположении дуги калориметров в плоскости, перпендикулярной плоскости падения ЛИ. Данные результаты представлены для одного уровня лазерной энергии.



а



б



в

Рис. 8. Типичные результаты измерений в экспериментах с углом падения ЛИ на мишень 30°: а – плазменных калориметров, б – световых калориметров, в – РК

На рис. 8 сплошной линией изображены эксперименты с расположением дуги калориметров в плоскости падения ЛИ, пунктирной линией изображены результаты экспериментов при расположении дуги калориметров в плоскости, перпендикулярной плоскости падения ЛИ. Данные результаты приводятся для одного уровня лазерной энергии.

В экспериментах с углом падения лазерного излучения на мишень 30° коэффициент конверсии составил 14±2 %. Значение коэффициента конверсии получено в предположении симметричной картины распределения РИ относительно нормали мишени.

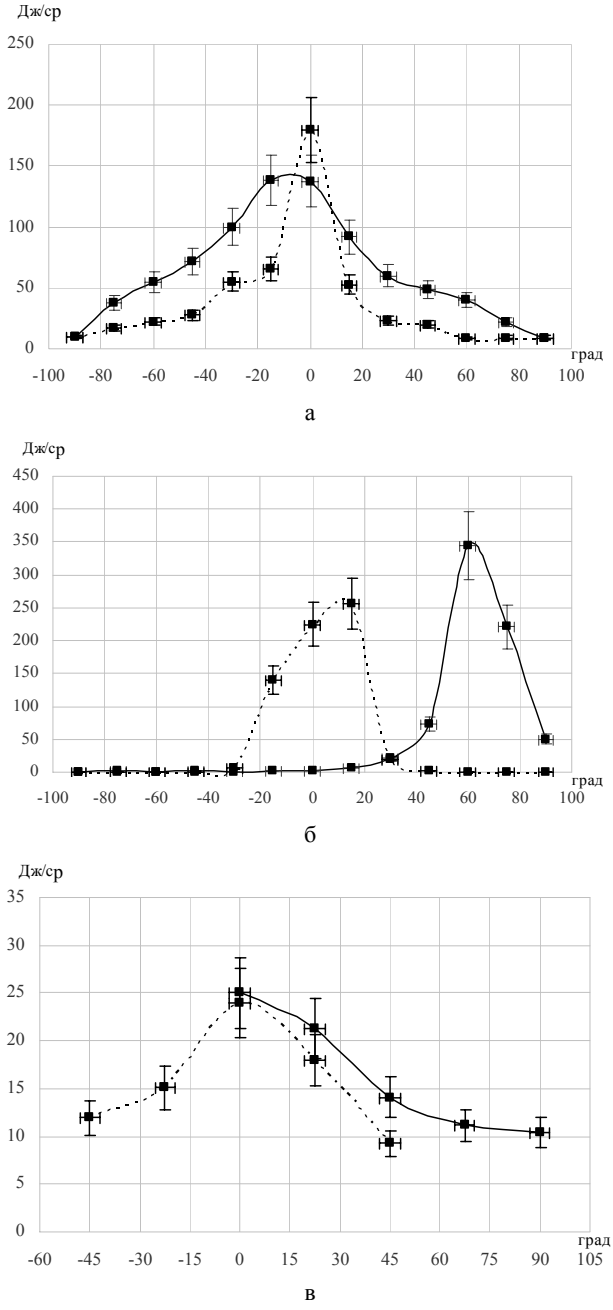


Рис. 9. Типичные результаты измерений в экспериментах с углом падения ЛИ на мишень 60°: а – плазменных калориметров, б – световых калориметров, в – РК

На рис. 9 сплошной линией изображены эксперименты с расположением дуги калориметров в плоскости падения ЛИ, пунктирной линией изображены результаты экспериментов при расположении дуги калориметров в плоскости, перпендикулярной плоскости падения ЛИ. Данные результаты приводятся для одного уровня лазерной энергии.

В экспериментах с углом падения лазерного излучения 60° к нормали мишени, коэффициент конверсии составил 12±2 %. Значение коэффициента конверсии получено в предположении симметричной картины распределения РИ относительно нормали мишени.

Выводы

- Произведена калибровка калориметров.
- Выбрана методика и адаптирована для проведения калориметрических измерений для экспериментов с низким уровнем энергии регистрации.
- Проведена серия экспериментов по исследованию эффективности конверсии ЛИ в отраженное ЛИ, энергию плазмы и РИ плазмы при различных углах падения ЛИ на мишень (0°, 30° и 60°) в двух плоскостях относительно падения ЛИ на мишень.

Показана картина распределения плазменных потоков, рассеянного ЛИ и РИ при

разных углах воздействия на мишень ЛИ. При угле падения на мишень 0° плазма и отраженный свет имеют четко выраженную индикатрису в направлении нормали мишени, что подтверждается проведенными работами [7]. В опытах с углом падения на мишень 30°, когда калориметры расположены в плоскости падения лазерного луча, наблюдается четкая индикатриса рассеянного ЛИ в направлении отраженного от мишени лазерного излучения. В тех же экспериментах зарегистрировано отражение рассеянной плазмы в сторону, обратную падающему лазерному лучу. В экспериментах с падением ЛИ под углом 60°, когда калориметры расположены в плоскости падения лазерного луча, также наблюдается направленность рассеянной световой компоненты сигнала в направлении отраженного от мишени лазерного излучения. Распределение рентгена в опытах 30° и 60°не имеет явно выраженной индикатрисы.

Литература

1. Belkov S. A., Bessarab A. V., Dolgoleva G. V., Kunin A. V. Investigation of laser energy conversion into plasma x-rays in the system ISKRA-4 // Czechoslovak journal of phusics. 1992. Vol. 42, N10. P. 969.

2. Gunn S. R., Rupert V. C. Calorimeters for Measurement of Ions, X-Ray, and Scattered Radiations in Laser-Fusion Experiments // Review of Scientific Instruments. 1977. Vol.48, N11. P. 1375–1380.

3. ГОСТ 3514-78. Стекло оптическое бесцветное.

4. ГОСТ 9411-91. Стекло оптическое цветное.

5. Гассанов П., Войтенко Г., Возная Г. Термоэлектронные приборы ТЭМО и ТЭБ // Радио. 1983. № 11. С. 59–60.

6. Анатычук Л. И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства. Киев: Наукова думка, 1979.

7. Даниелян Г. Л., Осипов М. В. и др. Метод регистрации рассеянного плазмой лазерного излучения. Москва: Препринт ФИАН, 2007. № 25.

ОТРАБОТКА МЕТОДИК ИЗМЕРЕНИЯ ПОРОГА РАЗРУШЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА СТЕНДЕ КОНТРОЛЯ ЛУЧЕВОЙ ПРОЧНОСТИ

Б. Г. Зималин, А. В. Савкин, С. В. Мочкаев, С. В. Кошечкин, И. В. Кузьмин, С. А. Макаров, В. А. Островский

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Одна из основных задач при создании мощных многоэлементных лазерных систем – повышение их эффективности и надежности работы, которые напрямую зависят от работы отдельных элементов. Одна из причин выхода из строя оптических элементов лазера (активных элементов, зеркал, выходных окон и т. п.) – низкая лучевая прочность.

В связи с необходимостью контроля лучевой прочности оптических элементов в ИЛФИ создан лазерный стенд, на котором отработано несколько методик измерения порога разрушения. Первая методика, методика двоичного поиска, применяется для предварительной оценки значения порога разрушения. Вторая отработанная методика – методика «1-на-1». Она использует вероятностный подход и аналогична методике «1-on-1» описанной в международном стандарте ISO 21254 [2]. С помощью этой методики измеряется зависимость вероятности разрушения образца от плотности энергии лазерного излучения. Результатом является максимальное значение плотности энергии, при которой вероятность разрушения оптического элемента равна нулю. Третья отработанная методика – методика «N-на-1» [3]. С помощью данной методики измеряется порог разрушения оптического элемента при лазерном «упрочнении» этого элемента. Результаты отработки методики показали, что лазерное «упрочнение» значительно (до нескольких раз) повышает порог разрушения оптического элемента.

Описание стенда

Отработка методик измерения порога разрушения под действием лазерного изучения проводилась на стенде контроля лучевой прочности [4]. Стенд включает в себя: лазер, схему заведения в каналы измерений на первой или второй гармониках, схему фокусировки излучения на образец, систему регистрации параметров излучения, систему позиционирования образца и систему регистрации разрушений. Оптическая схема стенда приведена на рис. 1.

В качестве лазера используется одночастотный Nd:YAG лазер, разработанный в ИЛФИ [4]. На его выходе формируется лазерный пучок с энергией до ≈0,7 Дж на длине волны 1064 нм, длительностью импульса 3 нс и апертурой 7 мм. Режим работы лазера импульсный или импульсно-периодический с частотой до 10 Гц.

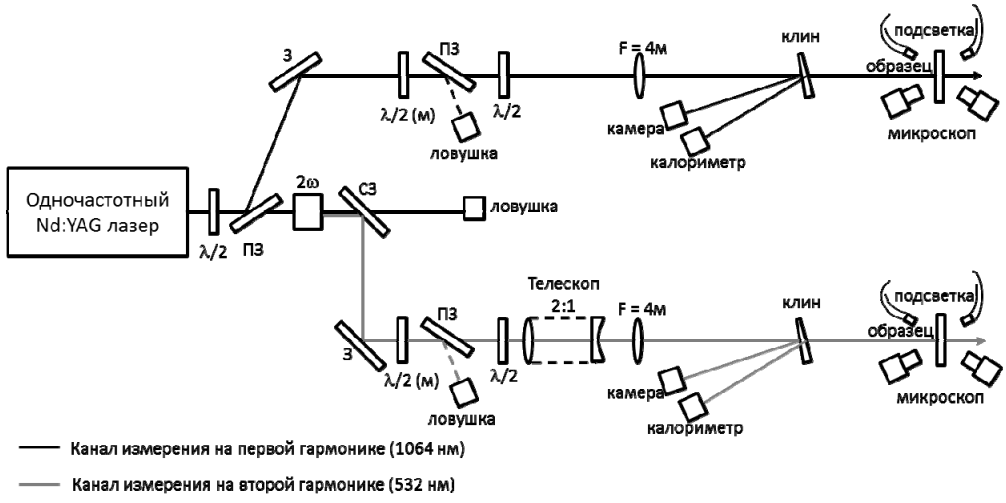


Рис. 1. Оптическая схема стенда контроля лучевой прочности: З – зеркало; ПЗ – поляризационное зеркало; СЗ – селектирующее зеркало; λ/2 – полуволновая фазовая пластинка; λ/2 (м) – полуволновая фазовая пластинка установленная в моторизированной оправе; 2ω – преобразователь во вторую гармонику; *F* – фокусное расстояние линзы в м

Схема заведения в каналы измерений на первой или второй гармониках сделана на базе полуволновой фазовой пластинки и поляризационного зеркала, и предназначена для выбора рабочего канала. В зависимости от ориентации оси фазовой пластинки излучение лазера либо отражается от поляризационного зеркала, либо проходит через него. За поляризационным зеркалом располагается преобразователь во вторую гармонику из кристалла LBO. Коэффициент преобразования во вторую гармонику составляет ≈70 %, что позволяет получить энергию до ≈0,5 Дж на длине волны 532 нм. В каждом канале измерения дополнительно располагаются полуволновая фазовая пластинка и поляризационное зеркало, с помощью которых регулируется энергия в выбранном канале. Фазовые пластинки установлены в моторизированные оправы, что позволяет управлять энергией падающей на образец в автоматизированном режиме.

Фокусировка лазерного пучка на исследуемый образец осуществляется с помощью линзы с фокусным расстоянием $F = 400$ см. В канале измерения на второй гармонике для увеличения размера пучка в фокусе линзы дополнительно установлен телескоп Галилея с кратностью 2:1. Таким образом, размер пятна на образце составляет ≈1 мм для обеих гармоник излучения.

Система регистрации параметров излучения предназначена для измерения энергии, длительности импульса и пространственного распределения лазерного пучка на образце. Для измерения параметров излучения на образце используется клин, установленный после фокусирующей линзы. Отражение от передней грани заводится в калориметр, осуществляющий регистрацию энергии в лазерном пучке, отражение от задней грани заводится в камеру, располагающейся в эквивалентной плоскости образца и измеряющей пространственное распределение пучка. Регистрация временной формы осуществляется на выходе лазера и после преобразования во вторую гармонику. В табл. 1 представлены параметры лазерного излучения на образце. На рис. 2. приведены характерные пространственные распределения лазерного пучка и характерные формы импульсов на образце в каналах первой и второй гармоник.

Таблица 1

Параметры лазерного излучения на образце в каналах первой и второй гармоник

Длина волны	1064 нм	532 нм
Поляризация излучения	линейная	линейная
Эффективный диаметр пучка	≈0,7 мм	≈0,65 мм
Длительность импульса ($\tau_{0,5}$)	3,3 нс	3,2 нс
Эффективная длительность импульса	3,3 нс	3,4 нс
Энергия	до 0,7 Дж	до 0,5 Дж

Система позиционирования образца предназначена для перемещения образца с целью последовательного многократного облучения исследуемой поверхности образца. На стенде используется моторизированная двухкоординатная система перемещения, позволяющая осуществлять позиционирование образца в автоматизированном режиме. Максимальное перемещение образца по обеим координатам составляет 75 мм.

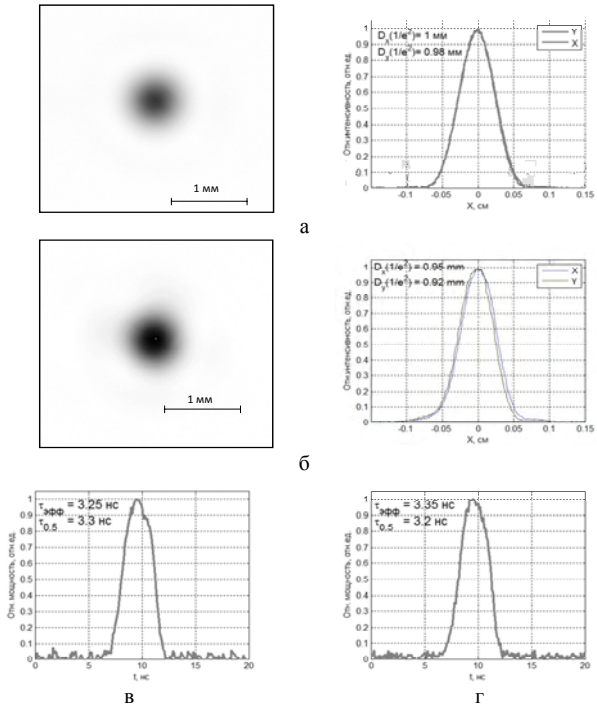


Рис. 2. Характерные пространственные распределения лазерных пучков в каналах гармоник: а – первой, б – второй и характерные временные формы импульса в каналах гармоник: в – первой, г – второй

Регистрация разрушений образца осуществляется с помощью одного или двух оптических микроскопов с установленными на них камерами. Количество и ориентация микроскопов зависит от типа исследуемого образца. Подсветка к образцу подводится с помощью гибких волокон с двух сторон от источника света с регулируемой мощностью. Перед микроскопом устанавливается оптический фильтр поглощающий длину волны лазерного излучения, что позволяет наблюдать за образцом в режиме on-line и регистрировать наличие разрушений.

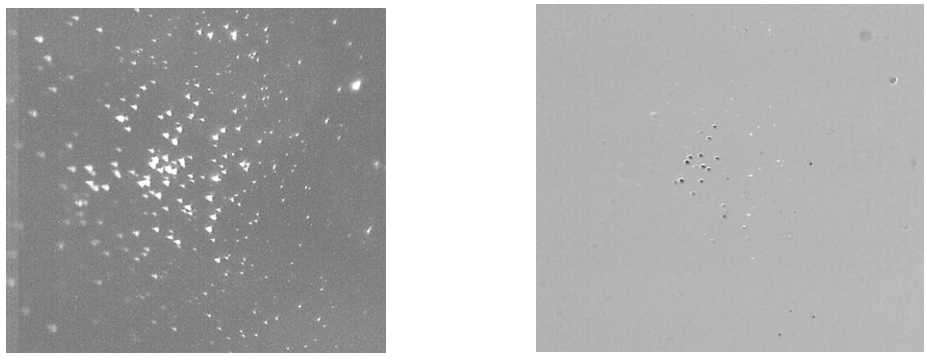
Отработка регистрации разрушений

Регистрация разрушения исследуемого образца является важной задачей при испытаниях. За разрушение принимается любое необратимое изменение испытуемой поверхности или объема образца после воздействия лазерного излучения, фиксируемое с помощью микроскопа. В процессе отработки методик измерения порога разрушения были исследованы различные типы образцов и влияние подсветки на регистрацию разрушений. Проведены исследования режима регистрации разрушений в темном и светлом полях для образцов диэлектрических просветляющих и зеркальных покрытий, а также образцов без покрытия.

В результате отработки регистрации разрушения диэлектрических просветляющих покрытий получено, что разрушения имеют точечный характер, при этом в режиме светлого поля количество точек разрушений регистрируется значительно меньше, чем в режиме темного поля. При этом точки разрушения, регистрируемые в темном поле, появляется при плотностях энергии в разы ниже, чем при регистрации разрушения в светлом поле. На рис. 3 приведены характерные изображения разрушения поверхности образца просветляющего покрытия, полученные в темном и светлом полях.

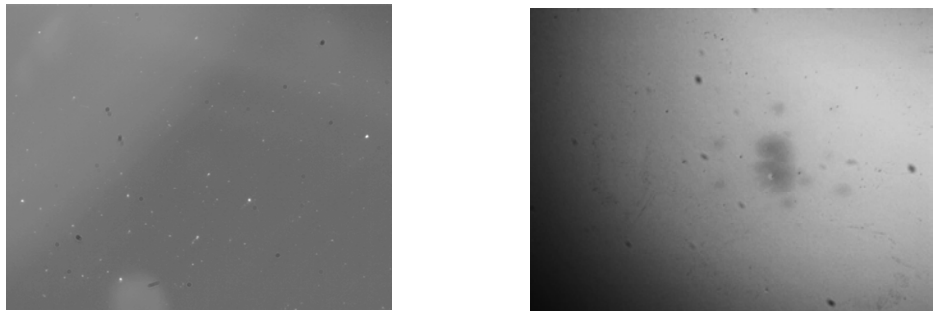
В результате отработки регистрации разрушения диэлектрических зеркальных покрытий получено, что в режиме темного поля разрушения покрытия не фиксируются, а в режиме светлого поля разрушения проявляются в виде пятен. На рис. 4. представлены характерные изображения разрушения поверхности образца диэлектрического зеркального покрытия, полученные в темном и светлом полях.

В результате отработки регистрации разрушения поверхности образцов без покрытия получено, что разрушения имеют точечный характер и чувствительность регистрации разрушения практически одинаковая как в режиме темного поля, так и в режиме светлого поля. На рис. 5. представлены характерные изображения разрушения поверхности образца без покрытия, полученные в темном и светлом полях.



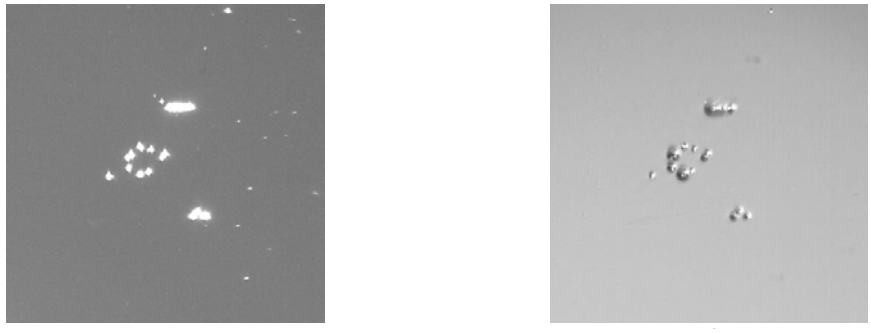
а б

Рис. 3. Характерные изображения разрушения поверхности образца просветляющего покрытия: а – в темном поле, б – в светлом поле



а б

Рис. 4. Характерные изображения разрушения поверхности образца диэлектрического зеркального покрытия: а – светлом поле, б – в темном поле



а б

Рис. 5. Характерные изображения разрушения поверхности образца без покрытия: а – в темном поле, б – в светлом поле

Таким образом, регистрация разрушений диэлектрических просветляющих покрытий проводится в режиме темного поля, диэлектрических зеркальных покрытий – в режиме светлого поля, образцов без покрытий – как в режиме темного поля, так и в режиме светлого поля.

Отработка методики двоичного поиска

Методика двоичного поиска заключается в следующем: испытания начинаются с плотности энергии, соответствующей требованию по порогу разрушения для данного образца. В случае, когда требование на порог не известно, испытания начинают с типичного порогового уровня плотности энергии для данного типа образца. Если при первом выстреле зарегистрировалось разрушение образца, то следующий выстрел сопровождался уменьшением энергии в 2 раза. Если разрушение не зарегистрировалось, то следует увеличить энергию в 2 раза. Процедура увеличения энергии в 2 раза повторяется до тех пор, пока не будет зарегистрировано разрушение образца. Последующие значения уровня плотности энергии выбираются из условия:

– если разрушение обнаружено, то энергия лазерного излучения уменьшается на величину равную среднему значению плотности энергии от двух последних выстрелов;

– если разрушение не обнаружено, то энергия увеличивается на величину равную среднему значению плотности энергии от двух последних выстрелов.

Увеличение и уменьшение энергии необходимо повторять до тех пор, пока отношение минимальной плотности энергии, при которой образец разрушается и максимальной плотности энергии, при которой разрушение плотности образца не зарегистрировано, не станет в пределах погрешности определения плотности энергии. При этом облучается каждый раз новый участок образца. Расстояние между участками облучения должно быть не меньше, чем три диаметра лазерного пучка по уровню интенсивности $1/e^2$, чтобы избежать перекрытия областей облучения. Так как диаметр пучка на образце ≈1 мм, то расстояние между участками облучения должно быть не менее 3 мм.

Среднее значение между минимальной плотностью энергии, при которой образец разрушается, и максимальной плотностью энергии, при которой разрушение поверхности образца не зарегистрировано, и есть прогнозируемое значение порога разрушения. Методика двоичного поиска позволяет определить прогнозируемый уровень примерно за 5 выстрелов, что позволяет быстро оценить значение порога разрушения.

На рис. 6 приведены результаты определения порога разрушения по методике двоичного поиска образца диэлектрического просветляющего покрытия. Испытание начиналось с энергии ≈5 Дж/см^2 (требование на лучевую прочность образца). В результате измерения порог разрушения по данной методике составил 2,7 Дж/см^2, на определение порога понадобилось 5 выстрелов.

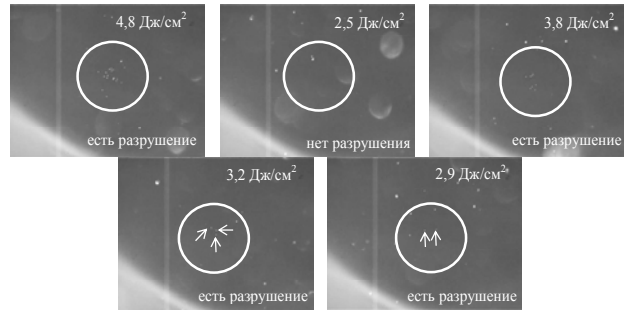


Рис. 6. Результаты определения порога разрушения по методике двоичного поиска образца диэлектрического просветляющего покрытия (измеренный порог разрушения 2,7 Дж/см^2)

Отработка методики «1-на-1»

Методика «1-на-1» использует вероятностный подход и аналогична методике «1-on-1» описанной в международном стандарте ISO 21254 [2]. Она позволяет определить зависимость вероятности разрушения образца от плотности энергии падающего излучения.

Суть методики заключается в следующем. Исследуемый образец подвергается облучению серией импульсов с одинаковой энергией, причём каждый последующий импульс смещается по горизонтали как минимум на три эффективных диаметра лазерного пучка относительно предыдущего участка облучения, чтобы исключить перекрытие областей облучения. Первый уровень энергии выбирается равным значению плотности энергии, определенным по методике двоичного поиска. Затем энергия излучения изменяется, и облучение образца проводится по следующему ряду и т. д. После этого для каждой энергии определяется число выстрелов, при которых произошло разрушение образца, и строится зависимость вероятности разрушения образца от плотности энергии излучения. Процедура повторяется до тех пор, пока не будут получено несколько значений плотности энергии с вероятностью разрушения от 0 до 100 %. Порогом считается плотность энергии, при которой вероятность разрушения равна нулю (определяется с помощью линейной аппроксимации полученных данных).

На рис. 7 схематично представлена матрица областей облучений размерностью (5×5), что соответствует тому, что образец подвергается 5 облучениям с каждым из 5 уровней плотности энергии (всего 25 облучений на образец).

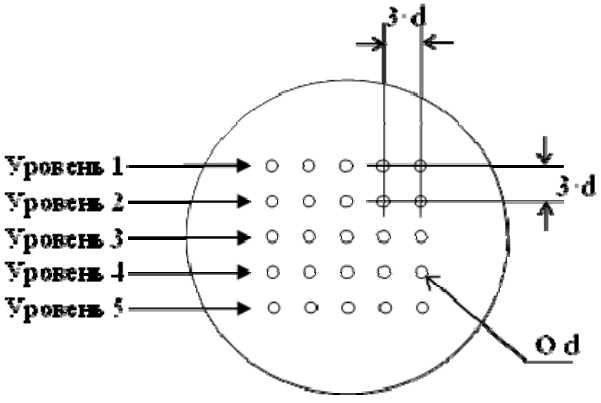


Рис. 7. Матрица областей облучений на образце

В процессе отработки методики было исследовано множество образцов. На рис. 8 представлены графики зависимостей вероятности разрушения образцов просветляющих покрытий от плотности энергии, а в табл. 2 приведены соответствующие значения порога разрушения. Также в табл. 2 приведены значения порога разрушения, полученные при измерении по методике двоичного поиска. Количество выстрелов на каждом уровне энергии при измерении по методике «1-на-1» данных образцов – 10.

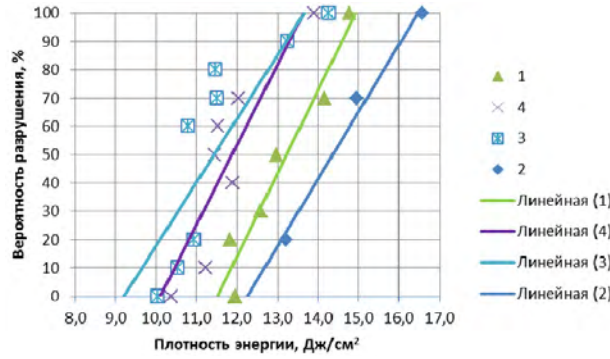


Рис. 8. Графики зависимостей вероятности разрушения образцов просветляющих покрытий от плотности энергии

Таблица 2

Порог разрушения образцов при измерении по методике «1-на-1» и методике двоичного поиска

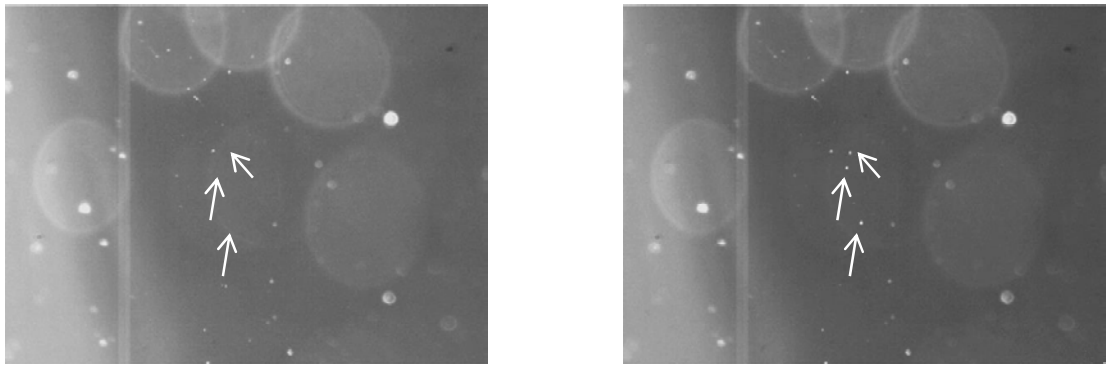
Образцы	Порог разрушения по методике «1-на-1», Дж/см^2	Порог разрушения по методике двоичного поиска, Дж/см^2
1	11,5	12,5
2	12,3	14,1
3	9,2	11,3
4	10,1	11,6

Из анализа полученных данных видно, что порог разрушения, полученный по методике двоичного поиска выше, чем порог разрушения, полученный по методике «1-на-1», и лежит в пределах от 30 до 50 % вероятности разрушений.

На рис. 9 представлено разрушение образца просветляющего покрытия при вероятности разрушения 60 %. Разрушения имеют точечный характер размером ≈10 мкм. На покрытие появилось несколько отдельных точек разрушения размером ≈10 мкм.

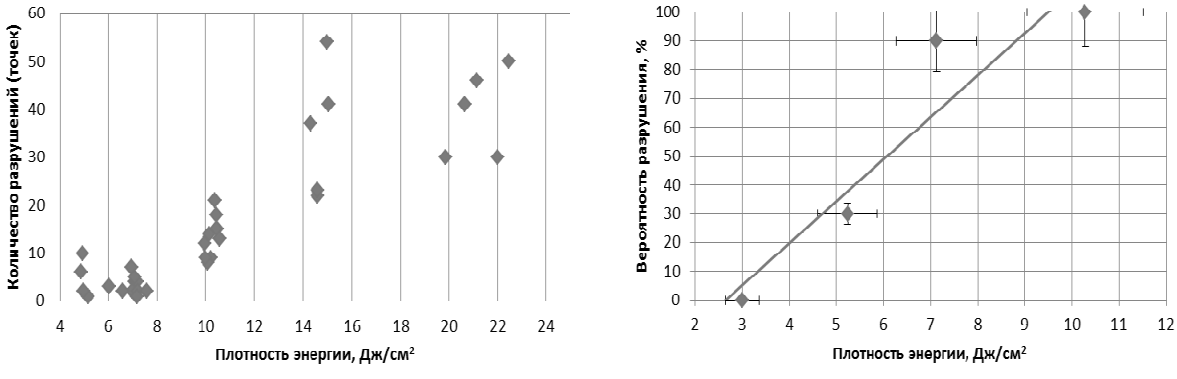
При отработке методики также было проведено исследование зависимости количества точек разрушений на просветляющих покрытиях от плотности энергии, падающей на образец. На рис. 10 представлены график зависимости количества появляющихся точек и график вероятности разрушения от плотности энергии падающего излучения для одного образца.

Из полученных результатов видно, что количество точек разрушения с увеличением плотности энергии растет. В диапазоне вероятности разрушения от 0 до 100 % появляются единичные точки. При превышении 100 % вероятности разрушений количество точек значительно возрастает. Также стоит отметить статистический характер количества разрушений при одинаковой плотности энергии, количество точек разрушений может отличаться в несколько раз при одной и той же плотности энергии в разных областях облучения образца.



а б

Рис. 9. Изображение поверхности образца просветляющего покрытия при вероятности разрушения 60 %: а – до облучения, б – после облучения



а б

Рис. 10. Для одного образца: а – графики зависимости количества разрушений от плотности энергии, б – вероятности разрушения от плотности энергии

Отработка методики «N-на-1»

Методика «N-на-1» позволяет измерить порог разрушения оптического элемента с учетом эффектом лазерного “упрочнения” [3]. Суть методики заключается в следующем: один участок покрытия оптического элемента подвергается серии импульсов с постепенно увеличивающейся энергией. Исследования начинают с уровня энергии в 2–3 раза меньше, чем определенный ранее порог разрушения, полученный по методике «1-на-1» или же по методике двоичного поиска. Каждый последующий выстрел сопровождается увеличением плотности энергии. Шаг между уровнями составляет ≈ 1 Дж/см^2. Увеличение энергии происходит до тех пор, пока не регистрируется разрушение этого участка покрытия. В случае, когда значение порога разрушения не определялось заранее, исследования стоит начинать с минимально регистрируемой энергии. При измерении по этой методике регистрируется два значения: плотность энергии, при которой происходит первое разрушение, и плотность энергии, при котором происходит разрушение сопровождающееся вылетом материала покрытия, искрой и характерным звуковым щелчком.

В табл. 3 представлены результаты испытаний диэлектрических просветляющих покрытий по методике «N-на-1» и значения, полученные по методикам двоичного поиска и «1-на-1».

Таблица 3

Значение порога разрушения, измеренное различными методиками

Образец	Методика двоичного поиска, Дж/см^2	Методика «1-на-1», Дж/см^2	Методика N-на-1 (первое разрушение), Дж/см^2	Методика N-на-1 (вылет материала), Дж/см^2
1	9	4,3	17,9	26,6
2	6,2	5,5	16,2	23,5
3	5,2	2,6	9,5	22,1

Из табл. 3 видно, что значения, полученные по методике «N-на-1» в несколько раз выше, чем значения, полученные по другим методикам. Возникающее первое разрушение образца так же точечное с размером порядка 10 мкм. При дальнейшем повышении до некоторого уровня энергии новых разрушений или же роста разрушения не наблюдается. На рис. 11 приведены изображения поверхности образца

просветляющего покрытия при измерении порога разрушения по методике «N-на-1». Как видно из рис. 11 первое разрушение образца наступило при плотности энергии 17,9 Дж/см^2, при том что порог разрушения этого образца по методике «1-на-1» составил всего 4,3 Дж/см^2, а по методике двоичного поиска – 9 Дж/см^2. Следующее разрушение поверхности зарегистрировано при 20,3 Дж/см^2, а вылет материала при 26 Дж/см^2.

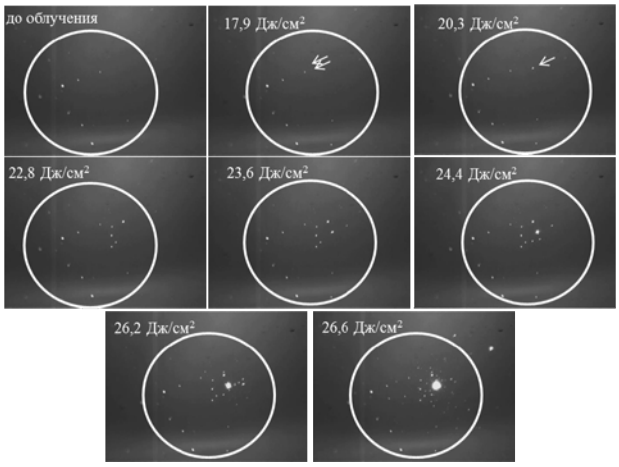


Рис. 11. Разрушение образца при измерении порога по методике «N-на-1»

Заключение

Отработано несколько методик определения порога разрушения под действием лазерного излучения. Первая методика, методика двоичного поиска, применяется для предварительной оценки значения порога разрушения. Вторая отработанная методика – методика «1-на-1». Она использует вероятностный подход и аналогична методике «1-on-1» описанной в международном стандарте ISO 21254 [2]. С помощью этой методики измеряется зависимость вероятности разрушения образца от плотности энергии лазерного излучения. Результатом является максимальное значение плотности энергии, при которой вероятность разрушения оптического элемента равна нулю. Экспериментально получено, что значение, полученное по методике двоичного поиска выше, чем значение, полученное по методике «1-на-1», и лежит в пределах от 30 до 50 % вероятности разрушений. Третья отработанная методика – методика «N-на-1» [3]. С помощью данной методики измеряется порог разрушения оптического элемента при лазерном «упрочнении» этого элемента. Результаты отработки этой методики показали увеличение порога разрушения оптического элемента при лазерном «упрочнении» в несколько раз.

Литература

1. Алексеев В. П., Бессараб А. В., Гаранин С. Г., Дмитриев Д. И. и др. Исследование лучевой прочности поверхности экспериментального лазерного стекла // Оптический журнал. 2002. Т. 69, № 1. С. 11–15.

2. International standard ISO 21254 Test methods for laser-induced damage threshold, 2011.

3. Burnham A. K., Hawley-Fedder R. A., Combs R. L. at all. Producing KDP and DKDP Crystals for the NIF Laser // Inertial confinement fusion ICF quarterly report. 1999. P. 135–149.

4. Савкин А. В., Мочкаев С. В., Кошечкин С. В., Кузьмин И. В. и др., Стенд контроля лучевой прочности оптических элементов / XI Всероссийская школа для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2017.

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И КАЧЕСТВА ПУЧКА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ВЫХОДЕ СИЛОВОГО УСИЛИТЕЛЯ УСТАНОВКИ «ЛУЧ»

С. В. Савкин, С. В. Кошечкин, В. В. Ладейщикова, В. И. Лесков, Н. С. Мальцева, В. В. Свиридов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Исследования на лазерных установках на современном этапе подразумевают необходимость получения больших энергий одновременно с высоким качеством пучка в ближней и дальней зонах излучения. С другой стороны, при проведении опытов необходимо обеспечить соответствие экспериментальных параметров заранее заданным параметрам, т. е. необходимо управлять условиями эксперимента с высокой точностью.

Эффективность усиления лазерного импульса определяется величиной коэффициентов усиления и потерь при прохождении излучения по тракту установки. В установках на неодимовом стекле, использующих многопроходную схему усиления, ключевым условием для этого является качество оптических деталей, через которые лазерное излучение проходит многократно. В результате несовершенства оптического тракта, развития амплитудных и фазовых неоднородностей пучка неоднородность пучка и его расходимость могут существенно ухудшаться. В частности, на установке «Луч» на выходе усилительного канала модуляция распределения пучка в ближней зоне составляла до 200 % при расходимости более 10^{-4} радиан. Фактически, эти значения ограничивали возможности генерации энергии установки в 2–3 раза (с учетом порогов по безопасности) и не обеспечивали качественной фокусировки излучения на мишень. С другой стороны, энергетическая нестабильность на выходе канала составляла более ±15 %, что также негативно влияло на статистику измерений, и увеличивало погрешность измерения величин в проводимых экспериментах

В докладе представлены результаты работ, проведенных на современном этапе на установке «Луч» по решению задачи повышения стабильности и эффективности генерации лазерной энергии и получения высокого качества пучка на выходе канала.

Модернизация силового усилителя установки на основе дисковых активных элементов нового типа

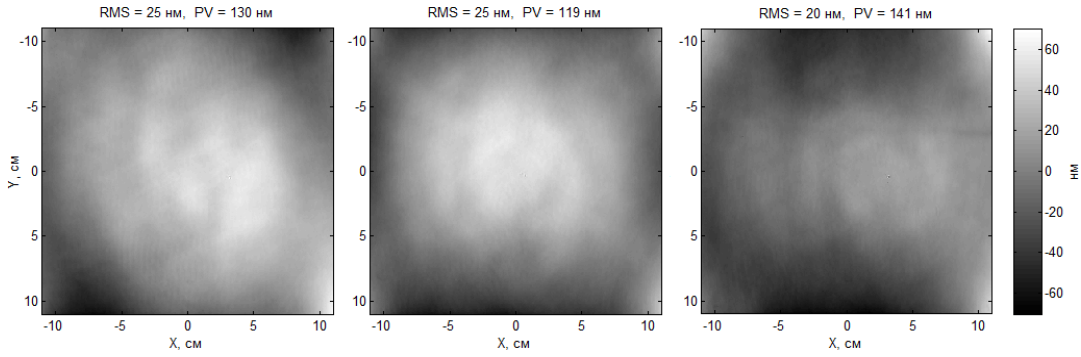
Основным оптическим элементом, определяющим качество излучения, является дисковый активный элемент (ДАЭ) из неодимового фосфатного стекла. Лазерный канал установки «Луч» [1], работающий по четырехпроходной схеме, содержит два усилительных каскада У1 и У2, в каждом из которых находятся по девять ДАЭ. По мере распространения лазерного излучения через активный элемент амплитудные неоднородности переходят в фазовые и наоборот, что приводит к постепенному ухудшению качества волнового фронта. Поэтому для повышения качества пучка лазерного излучения (ЛИ) был предложен ряд мер по модернизации элементов усилительного тракта, ключевой из которых являлось оснащение усилителей новыми ДАЭ, отвечающими высоким требованиям, как к материалу, так и к качеству финишной обработки рабочих поверхностей.

Для этих целей были разработаны усовершенствованные технические требования на ДАЭ – их оптические и лазерные характеристики. Основным изменением с точки зрения оптических требований являлось введение функции [2] разложения спектра индуцируемых оптическим элементом искажений волнового фронта (ВФ) и ограничение его в разных пространственных частотах, одновременно с появлением средств контроля, обеспечивающих высокую точность ВФ.

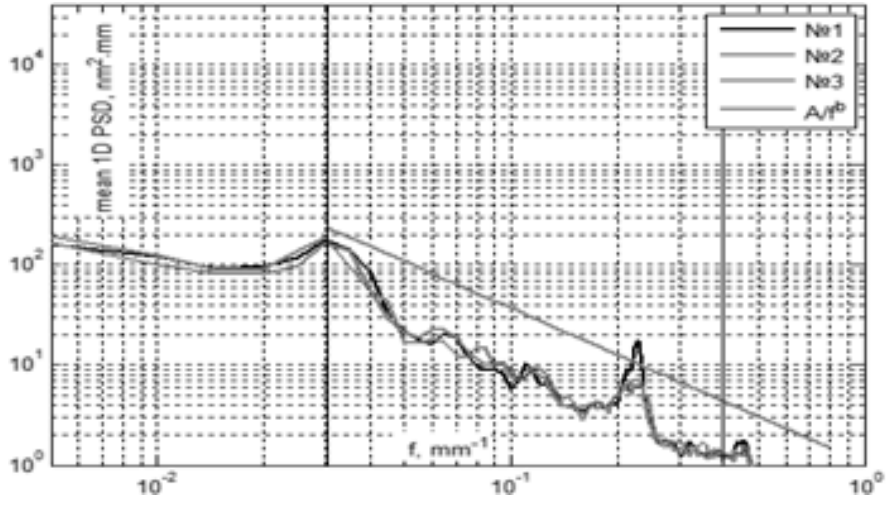
Такой подход к контролю рабочих поверхностей ДАЭ позволил снизить нежелательные мелкомасштабные неоднородности оптических элементов до приемлемого уровня и в целом проконтролировать неоднородности различного пространственного масштаба.

На основе разработанных технических требований для установки «Луч» была изготовлена партия из 18 ДАЭ (производства Шанхайского Института Оптики и Точной Механики – SIOM) из неодимового фосфатного стекла марки N31 для оснащения одного лазерного канала. Аттестация полученных ДАЭ на интерферометрическом стенде [3] с точностью $\lambda/1000$, показала соответствие изготовленных ДАЭ чертежам для двух вариантов их ориентации относительно излучения. Помимо этого, проведены исследования ДАЭ на наличие пузырей и свилей в объеме стекла. В качестве иллюстрации, на рис. 1 представлены изображения ВФ и амплитудно-частотные характеристики пучка, прошедшего через образец ДАЭ (для трех различных образцов).

Из рис. 1а и рис. 1б видно, что ДАЭ имеют примерно одинаковое качество и все аттестованные элементы удовлетворяют условию «not to exceed». Проведен анализ возможных вариантов взаимного расположения ДАЭ в усилителях с использованием их фазовых портретов, получено, что существенного влияния на эксплуатационные параметры расстановка элементов не оказывает.



а



б

Рис.1. Изображения ВФ и амплитудно-частотные характеристики пучка, прошедшего через образец ДАЭ (для трех различных образцов): а – искажения ВФ излучения, индуцированные аберрациями ДАЭ, расположенного под углом Брюстера; б – амплитудно-частотные характеристики фронтов (кривые линии) и предельное требование к ним (прямая линия)

Также, проведены расчетные и экспериментальные исследования по определению величины амплитудной модуляции пучка в зависимости от расстояния от плоскости перестроения оптимального изображения (ППОИ), ретранслируемой через систему, - она определяет фактическую энергию, которая может быть получена на выходе усилительной системы и требования к оптическим элементам, расположенным в тракте установки, и их покрытиям.

Измерения проводились после оснащения усилителей ДАЭ «нового» типа с использованием излучения штатного юстировочного лазера в трех вариантах: с двумя ДАЭ в тракте, затем при полном комплектовании усилителя У1 (9 ДАЭ), и при полном оснащении лазерного канала (18 ДАЭ), рис. 2. Диапазон расстояний варьировался в пределах ±15 м, что соответствует максимальному удалению от ППОИ для установки «Луч». Одновременно проводились измерения по распространению излучения на расстояния до ±50 м от ППОИ, что соответствует характерным масштабам перестроения в оптической схеме установки мегаджоульного уровня и позволяет моделировать ситуацию развития возмущений в ее системе. Среднеквадратические значения модуляции плотности энергии ЛИ (RMS, в процентах) в канале, составленном из усилительных элементов «старого» типа (кривые 1’,2’,3’) и «нового» типа (кривые 1, 2, 3), в зависимости от комплектации канала и удаления от плоскости перестроения, представлены на рис. 2.

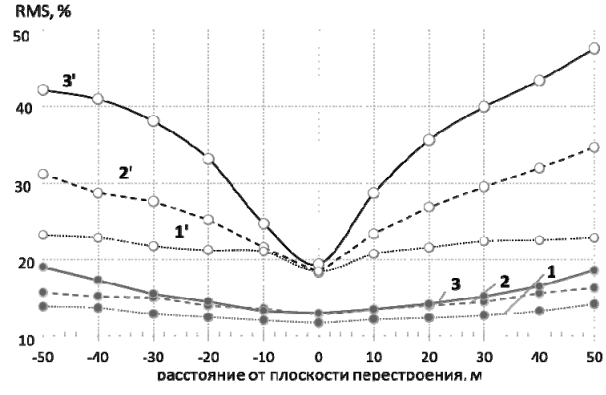


Рис. 2. Среднеквадратические значения модуляции плотности энергии ЛИ в канале: 1,1’ – тракт +2 АЭ, 2,2’ – усилитель У1, 3,3’ – усилитель У1+У2

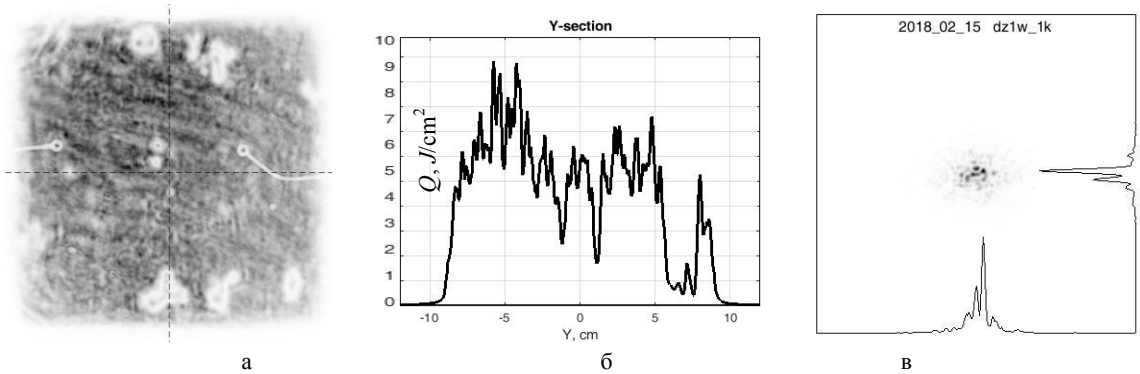
Из рис. 2 видно, что с использованием «новых» ДАЭ амплитудные осцилляции интенсивности на всем протяжении тракта установки «Луч» не превышают 14 % по среднеквадратическому показателю (<50 % по пиковым показателям), что более чем вдвое лучше аналогичных цифр для канала до его модернизации. Важно, что регистрируемые значения RMS характеризуют комплексно влияние и активных элементов, и элементов системы транспортировки лазерного тракта (поэтому с использованием «новой» аттестованной оптики значение отклонений в эквивалентной плоскости в несколько раз ниже). Для установки мегаджоульного класса наблюдается схожая картина, максимальное RMS составляет около 18 %, что в примерно в 2,5 раза лучше, чем в случае использования оптических элементов, созданных с использованием требований «старого» типа.

Одновременно с контролем ДАЭ была проведена аттестация других оптических элементов на стендах входного контроля (СВК) и в случае несоответствия требованиям они были заменены на подходящие. В частности, зеркала выбирались наиболее плоскими (RMS < 100 нм), линзы пространственных фильтров – с одинаковыми фокальными отрезками.

Осуществлена геодезическая съемка монтажных конструкций усилителей, пространственных фильтров и блоков зеркал. На основании данных съемки произведены работы по переориентации и перемещению составных частей канала. Проведена монтажная сборка канала на основе аттестованного набора оптических элементов, и их расчетных и измеренных положений. Пространственное положение линз выбрано для наилучшей угловой фильтрации излучения в плоскости установки диафрагм с учетом работы торцевого адаптивного зеркала. В процессе монтажа в штатную систему юстировки тракта, внесены изменения, заключающиеся во внесении дополнительных контрольных точек прохождения излучения по тракту: на входе и в реверсоре канала.

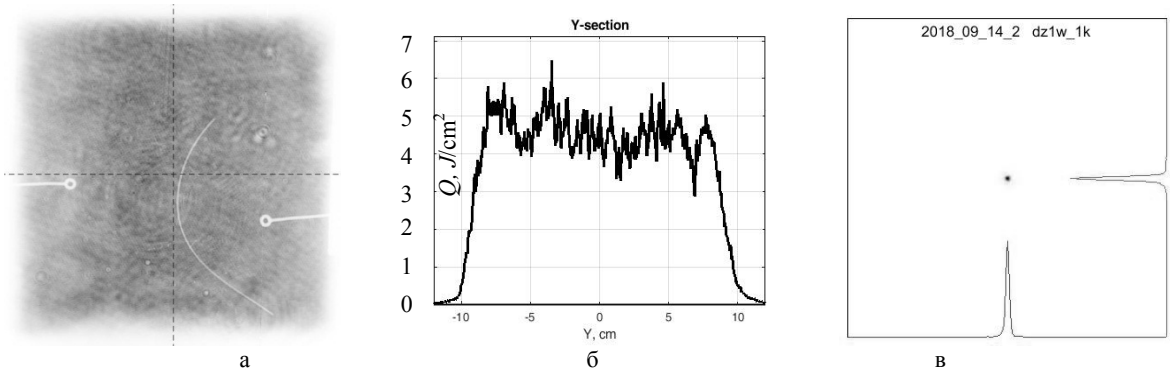
Проведена серия экспериментальных исследований усиления импульса ЛИ в «новом» канале и представлено сравнение с данными, полученными в экспериментах в «старом» канале. На рис. 3 приведены изображения пучка излучения в ближней, рис. 3а, и дальней зонах, рис. 3в, и распределения плотности энергии излучения в пучке на выходе силового усилителя, рис. 3б, зарегистрированные 15.02.2018 г. в эксперименте со «старым» каналом.

На рис. 4 приведены изображения пучка излучения в ближней, рис. 4а, и дальней зонах, рис. 4в, и распределения плотности энергии излучения в пучке на выходе силового усилителя, рис. 4б, зарегистрированные в одном из экспериментов после модернизации лазерного канала.



а б в

Рис.3. Регистрации пучка излучения в эксперименте до переоснащения канала: а – изображение пучка излучения в ближней зоне, б – распределение плотности энергии излучения по вертикальной координате, в – изображение пятна излучения в дальней зоне



а б в

Рис. 4. Регистрации пучка излучения в эксперименте после переоснащения канала: а – изображение пучка излучения в ближней зоне, б – распределение плотности энергии излучения по вертикальной координате, в – изображение пятна излучения в дальней зоне

Из приведенных результатов видно, что следы мелкомасштабного инструмента, заметные в изображении на рис. 3а, отсутствуют на рис. 4а. Модуляция плотности энергии лазерного пучка в ближней зоне уменьшилась с PV ≈ 150 % и RMS ≈ 40 % до PV ≈ 70 % и RMS ≈20 %. Значение средней плотности энергии в пучке в обоих случаях ≈4,5 Дж/см^2, при этом пиковая плотность составляет ≈10 и 6 Дж/см^2, соответственно.

В эксперименте со «старым» каналом на выходе зарегистрирована расходимость излучения $\theta_{0,8E} \approx 1{,}4 \cdot 10^{-4}$ рад, пятно излучения в дальней зоне (рис. 3в) имеет спеклованную асимметричную структуру, отмечается отсутствие выраженного центрального керна.

Регистрация излучения в дальней зоне, полученная в канале «нового» типа (рис. 4в), демонстрирует выраженный дифракционный характер пятна, расходимость излучения в данном опыте составила $\theta_{0,8E} = 4{,}8 \cdot 10^{-5}$ рад, число Штреля ≈0,4 (в среднем в серии опытов с «новым» каналом $\theta_{0,8E} \approx 5 \cdot 10^{-5}$ радиан).

Эффективность генерации энергии

Как отмечалось выше, к «новым» ДАЭ, изготовленным из стекла N31, также предъявлялись высокие требования к лазерным параметрам материала активной части. Отличительными характеристиками стекла являлись:

– повышенное сечение усиления $\sigma = 3{,}8 \cdot 10^{-20}$ см^2;

– длительность затухания люминесценции $\tau \geq 310$ мкс при концентрации ионов Nd^{3+} $3{,}5 \cdot 10^{20}$ см$^{-3}$.

У образцов ДАЭ «старого» типа, произведенных из стекла марки КНФС, данные показатели составляли $3{,}6 \cdot 10^{-20}$ см^2 и 295 мкс [4] при той же концентрации активатора. Вместе, такое изменение позволяло прогнозировать прирост величины линейного коэффициента усиления слабого сигнала g_0 до ≈10 %.

Более строгие требования были предъявлены также и к показателю поглощения ДАЭ на рабочей длине волны, значения которого (по натуральному основанию логарифма) составили $\alpha_{\lambda=1053нм} \approx 0{,}0014$ см$^{-1}$ (для стекла КНФС около 0,002 см$^{-1}$). Как следствие, коэффициент пропускания усилительного тракта за два прохода возрос $c \approx 0{,}28$ до 0,36.

В результате, в экспериментах получено повышение линейного коэффициента усиления слабого сигнала g_0 на ≈10 %: $c \approx 4{,}0 \cdot 10^{-2}$ см$^{-1}$ [4] до $4{,}40 \cdot 10^{-2}$ см$^{-1}$ при зарядном напряжении $U_{зар} = 18$ кВ и $c \approx 4{,}25 \cdot 10^{-2}$ см$^{-1}$ до $4{,}7 \cdot 10^{-2}$ см$^{-1}$ при $U_{зар} = 19$ кВ.

Вместе с увеличением пропускания это позволило снизить величину энергии на входе лазерного канала, требуемую для обеспечения рабочего диапазона выходной энергии излучения (0,5–1,5) кДж, примерно на порядок – с ≈ (20–50) мДж до ≈(1–4) мДж.

Обеспечение стабильности энергетических характеристик силового усилителя

Опыт работы на установке «Луч» показал, что существует нестабильность выходной энергии излучения от опыта к опыту ≥±15 % [5]. Такая нестабильность обусловлена главным образом, высокой нестабильностью величины суммарной электрической энергии, запасаемой в накопителе к моменту ее разряда на лампы накачки (≈3 %) [5].

Для понимания работы системы электропитания установки «Луч» и возможных причин нестабильности ее параметров, рассмотрим кратко ее структуру и процесс заряда. Система электропитания, аналогично усилителям установки, организована по модульному принципу: питание ламп 18-ти усилительных модулей осуществляется 18-ю модулями конденсаторной батареи (МКБ). Заряд МКБ выполняется шестью зарядными устройствами (ЗУ), каждое из которых заряжает по три сопряженных с ним МКБ. Электрическая схема заряда трех МКБ от сопряженного с ними ЗУ показана на рис. 5.

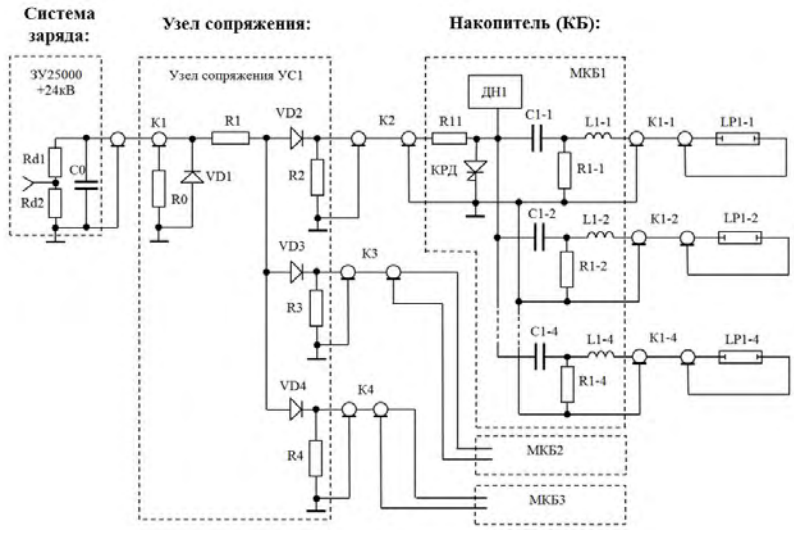


Рис. 5. Схема заряда трех МКБ: R0 – ТВО60 24 Ом; R1 – 300 Ом; R2-R4 – КЭВ5 100М; Rd1 – КЭВ20 100М; Rd2 – С2-23-0,5 22к; C0 – К75-48 0,1мкФ 25кВ; VD1-VD4 – 3HV50K; K1-K4 – РК50-11-13; K1-1 – K1-4 – 3 параллельно соединенных кабеля РК50-11-13; ДН1 – высоковольтный делитель; R11 – 2 последовательно соединенных ТВО60 24 Ом; КРД – коммутатор КРД25-100; C1-1 – C1-4 – конденсаторы типа 99ECX011 150мкФ фирмы TPC (Франция); R1-1 – R1-4 – зарядные резисторы 1кОм; L1-1 – L1-4 – формирующие индуктивности 95 мкГ; LP1-1 – LP1-4 – ламповая нагрузка

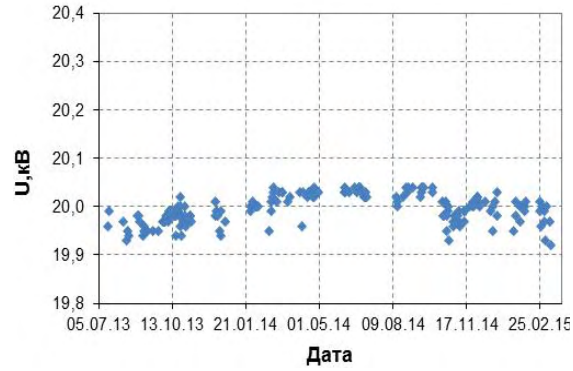
Набор заряда на накопителе, рис. 5, и его последующий разряд на импульсные лампы накачки лазерных усилителей происходит следующим образом. Устанавливается значение зарядного напряжения, требуемого при проведении эксперимента. ЗУ производят набор высокого напряжения на накопителе. Управление работой ЗУ осуществляется с помощью датчика обратной связи, использующего омический делитель для измерения выходного зарядного напряжения на емкости C_0. При заряде батареи напряжение на данной емкости равно напряжению на конденсаторах МКБ. В момент времени, когда величина измеряемого напряжения достигает установленного значения, непрерывный заряд МКБ от ЗУ прекращается. ЗУ переходит в режим стабилизации заряда на МКБ, ожидая зарядки всех МКБ до установленного значения напряжения. В режиме стабилизации ЗУ дозаряжает МКБ небольшими дозами для компенсации тока утечки. Когда на последнем МКБ достигается установленное значение зарядного напряжения, проходит команда «Стоп заряд», и происходит автоматический разряд электрической энергии, запасенной в МКБ, на лампы.

Однако недостатком является то, что в режиме подзарядки контрольная емкость ЗУ разряжается быстрее, чем емкости заряжаемых им МКБ, а диоды VD2-4 (рис. 5) препятствуют выравниванию потенциалов в этих точках схемы. Следствием является перезарядка сверх нормы уже заряженных МКБ, ожидающих окончания процесса заряда на последнем МКБ.

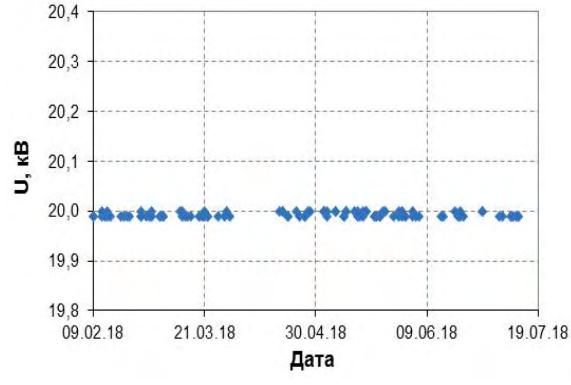
Выявлена причина недостаточной стабильности работы делителя на ЗУ, связанная с термостабильностью верхнего плеча на основе сопротивления КЭВ-50-100 МОм ± 5 %, характеризуемого высоким значением ТКС $\pm 1600 \cdot 10^{-6}$ К$^{-1}$. Это приводило к некорректной регистрации напряжений на ЗУ и характеризовалось явной «сезонной» зависимостью.

По результатам исследований была выполнена модернизация системы электропитания. Модернизация включала в себя доработку платы сопряжения модулей конденсаторной батареи с зарядными устройствами, замену делителей обратной связи в ЗУ и внесение изменения в алгоритм работы автоматизированной программы управления зарядом. На плату сопряжения параллельно диодам были добавлены резисторы (5 кОм), обеспечившие постоянную электрическую связь ЗУ с МКБ. Делители верхнего плеча в ЗУ были заменены на сборку из 2 резисторов HPR 968.7 AB 50M ±1 % TC25 с низким значением ТКС ($\pm 40 \cdot 10^{-6}$ К$^{-1}$). Изменение в алгоритме работы автоматизированной программы управления зарядом заключалось в добавлении задержки ≈5 сек. формирования команды «Стоп заряд» с целью «дотягивания» напряжения до установленного значения.

В результате проведенных работ по исследованию и модернизации системы электропитания, достигнута требуемая стабильность ее выходных параметров, получено повышение стабильности величины суммарной энергии на накопителе в (7–8) раз. На рис. 6, представлены результаты работы ЗУ1 до и после модернизации системы электропитания при $U_{зар} = 20$ кВ.



а



б

Рис. 6. Напряжения на делителях ЗУ1: а – до модернизации системы электропитания, б – после модернизации

Итоги модернизации

Итоги проведенных работ по повышению энергетических характеристик силового усилителя и стабильности его работы наглядно иллюстрируют экспериментальные зависимости энергии излучения на выходе лазерного канала от величины входного сигнала, изображенные на рис. 7.

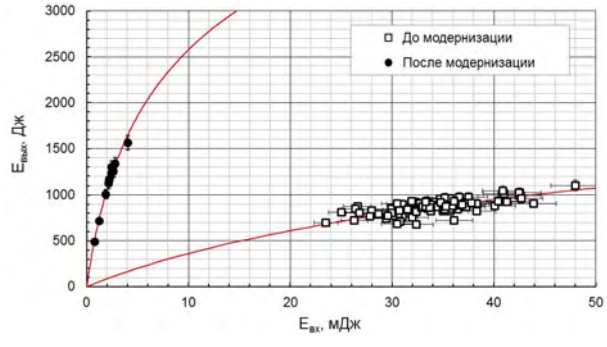


Рис. 7. Энергия излучения на выходе лазерного канала до и после модернизации лазерного канала и системы электропитания

Белыми квадратами на рис. 7 обозначены значения, полученные в опытах до модернизации при зарядном напряжении на накопителе $U_{зар}$ = 20 кВ, черными точками – после модернизации при $U_{зар}$ = 19 кВ.

Диапазон значений входного сигнала во втором случае на порядок ниже – от 1 до 4 мДж вместо ≈(20–50) мДж из-за увеличения коэффициента усиления силового усилителя и повышения коэффициента пропускания лазерного канала.

Сравнение графиков на рис. 7 показывает существенное увеличение энергетических возможностей канала одновременно со стабилизацией работы силового усилителя – разброс значений энергии излучения на выходе канала снижен с ±15 до ±5 %, с учетом погрешности измерения энергии излучения штатными калориметрами, экспериментальные значения новой серии экспериментов лежат на расчетной кривой.

Достигнутая стабильность работы силового усилителя позволяет осуществлять управление выходной энергией лазерного излучения, определив для заданного значения $E_{вых}$ величину входного сигнала в соответствии с зависимостью $E_{вых}(E_{вх})$, и реализовав данный сигнал на входе усилительного канала.

Заключение

Проведены комплексные исследования в обоснование возможности повышения и стабилизации энергетических характеристик и качества пучка лазерного излучения на выходе силового усилителя установки «Луч».

Осуществлена модернизация, включающая в себя переоснащение элементной базы силового усилителя установки «Луч» и усовершенствование штатной системы электропитания установки. Оснащение силового усилителя проведено на базе новых дисковых активных элементов, изготовленных по усовершенствованным техническим требованиям к параметрам материала и качеству обработки рабочих поверхностей ДАЭ.

Улучшено пространственное качество пучка в ближней зоне излучения по показателям PV, RMS более чем в два раза. В дальней зоне излучения получено стабильное пятно излучения дифракционного характера с четким центральным керном и выраженной угловой симметрией. Расходимость излучения снижена с $1{,}4\cdot10^{-4}$ до $0{,}48\cdot10^{-4}$ рад, число Штреля составляет ≈0,4.

Увеличен коэффициент линейного усиления слабого сигнала на ≈10 %, и повышено пропускание лазерного тракта за два прохода с 0,28 до 0,36. Как результат, в экспериментах на установке достигнуто снижение величины входного сигнала, требуемого для получения на выходе канала энергии лазерного излучения в диапазоне от ≈0,5 до 1,5 кДж, примерно на порядок – с (20–50) мДж до уровня (1–4) мДж.

По результатам проведенных работ по модернизации системы электропитания, достигнута требуемая стабильность ее выходных параметров, получено повышение стабильности величины суммарной энергии на накопителе в (7–8) раз. В экспериментах на установке зарегистрирован разброс значений энергии на выходе силового усилителя ±5 %, при этом отмечено, что разброс за счет стабильности работы силового усилителя, исключая стабильность входного сигнала и пропускания реверсора, составляет ≈2 %.

Литература

1. Гаранин С. Г., Зарецкий А. И., Илькаев Р. И. и др. Канал мощной установки «Луч» для ЛТС с энергией импульса 3,3кДж и длительностью 4 нс // Квантовая электроника. 2005. Т. 35. С. 299–301.

2. ISO 10110: Optics and Optical Instruments – Preparation of drawings for optical elements and systems: User's Guide, Second Edition. OSA, 2010.

3. Sergeev A. M., Khazanov E. A., Kozhevatov I. E., Silin D.E. Subnanometer characterization of large aperture optical components using broad-band interferometry. Proc. SPIE. 2008. Vol. 7022. P. 70220I-1 – 70220I-11.

4. Бельков С. А., Воронич И. Н., Гаранин С. Г. и др. Исследования энергетических характеристик силового усилителя установки «Луч» с активными элементами из неодимового фосфатного стекла КНФС и отражателями из фольги Miro Silver / Международная конференция «XIII Забабахинские научные чтения» // Сборник тезисов. Снежинск, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ», 2017. С. 119.

5. Бельков С. А., Воронич И. Н., Гаранин С. Г. и др. Лазерная установка на Nd стекле с предельными характеристиками по концентрации энергии излучения для проведения исследований экстремальных состояний вещества и в интересах ЛТС / Международная конференция «XIII Забабахинские научные чтения» // Сборник тезисов. Снежинск: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ», 2017. С. 122.

РАДИАЦИОННО СТОЙКИЕ ФОТОДИОДЫ ДЛЯ РАБОТЫ В ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

Д. А. Санжаревский, А. Н. Труфанов, Ю. А. Кабальнов, С. В. Оболенский

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В технике широко применяются фотодиоды в различных приложениях. Однако важным недостатком классических фотодиодов является низкий уровень их радиационной стойкости [1], что значительно ограничивает возможности их использования в космических аппаратах и других приборах, предназначенных для работы в условиях воздействия ионизирующих излучений.

Для обеспечения радиационной стойкости фотодиодов применяются различные методы, как схемотехнические, так и технологические.

В данной работе представлен результат исследований возможности создания стойких к воздействию ионизирующих излучений фотодиодов на основе хорошо зарекомендовавших себя в радиационностойкой микроэлектронике материалов: кремнии на сапфире (КНС) и арсениде галлия.

В первой части работы представлены результаты исследования стойкости фотодиодов изготовленных на основе КНС и приведено сравнение их характеристик с фотодиодами на основе традиционной кремниевой технологии.

Во второй части работы представлены результаты исследований стойкости фотодиодов (фотопреобразователей) на основе гетеропереходов GaAs-InGaAs.

Фотодиоды на основе кремния на сапфире и кремния

Ниже представлены результаты разработки фотодиодов на КНС структурах и исследований их стойкости к воздействию ионизирующих излучений.

Фотодиоды разрабатывались для применения как преобразователи постоянного и импульсно-периодического оптического излучения с длиной волны 0,63 мкм в электрический сигнал [2]. Были разработаны и исследованы два типа фотодиодов: одноэлементные (ФД1), содержащие один фоточувствительный элемент (ФЧЭ), и двухэлементные (ФД2), содержащие два идентичных ФЧЭ с межэлементным зазором 60 мкм. Конструктивно области анода и катода фотодиодов выполнялись в виде встречно-штыревой структуры с размером фоточувствительной области $1{,}4\times1{,}4$ мм^2 для одноэлементных диодов и $0{,}4\times1{,}4$ мм^2 для каждого элемента двухэлементных диодов (рис. 1).

В качестве материала подложки использовались гетероэпитаксиальные структуры КНС. Схематично на рис. 2 в разрезе приведена структура элементарного фотодиода. Показана активная область p-n перехода, сформированная слоем p^+ анода в эпитаксиальной пленке кремния, металлизированные контакты к p^+ аноду и к n^+ катоду, межслойный диэлектрик из слоев нитрида кремния и двуокиси кремния, пассивация пленкой фосфоро-силикатного стекла (ФСС). Фоточувствительную область можно рассматривать как диод большой площади, который с целью увеличения токовой чувствительности был сформирован из 20 параллельно соединенных элементарных фотодиодов малой площади.

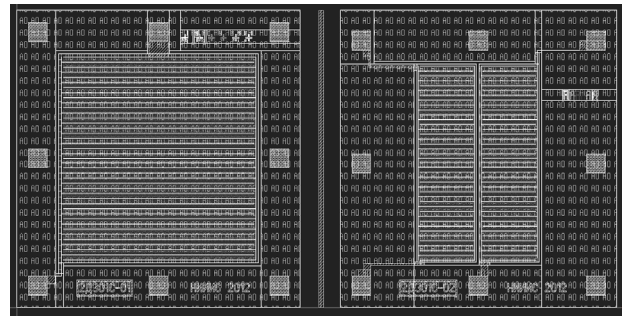


Рис. 1. Топология фотодиодов с одним и двумя ФЧЭ

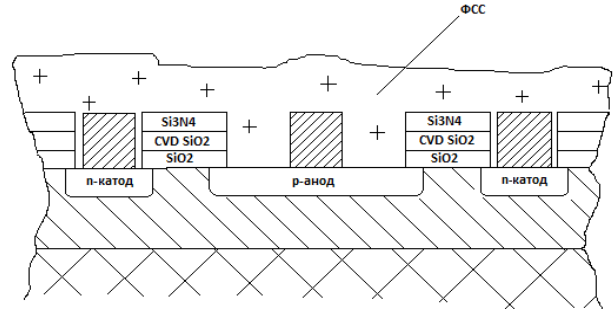


Рис. 2. Разрез структуры элементарного фотодиода

Параллельно с фотодиодами на КНС структурах были изготовлены по аналогичной технологии фотодиоды на объемном кремнии. В таблице представлены результаты измерений темнового тока и токовой чувствительности фотодиодов в зависимости от типа и параметров подложек.

Фотодиоды, созданные по кремниевой технологии, имели характеристики лучше, что обусловлено более совершенной структурой монокристаллического кремния. Гетероэпитаксиальные структуры КНС по сравнению с объемным кремнием имеют повышенную дефектность, связанную с влиянием внутренних механических напряжений. Однако характеристики фотодиодов на КНС структурах удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям.

Средние значения темнового тока и токовой чувствительности для различных типов фотодиодов

Тип фотодиода	Темновой ток (15В), мкА	Мощность излучателя, мВт	Величина фототока, мкА	Токовая чувств., А/Вт
ФД1-Si	0,02	2,1	90,2	0,622
ФД1-КНС	0,81	2,1	59,2	0,408
ФД2-Si	0,02	2,1	32,45	0,78
ФД2-КНС	0,36	2,1	19,95	0,48

Структуры фотодиодов были промаркированы следующим образом:

– фотодиоды с одним ФЧЭ, изготовленные на структурах КНС– ФД1-КНС;

– фотодиоды с одним ФЧЭ, изготовленные на подложках объемного кремния – ФД1-Si;

– фотодиоды с двумя ФЧЭ, изготовленные на структурах КНС – ФД2-КНС;

– фотодиоды с двумя ФЧЭ, изготовленные на подложках объемного кремния – ФД2-Si.

Далее представлены результаты исследований радиационной стойкости фотодиодов.

Сначала проводились исследования влияния на работоспособность фотодиодов воздействия мощности экспозиционной дозы гамма-излучения. Длительность такого воздействия составляла 2,5–16 нс. Уровень этого воздействия в условных единицах менялся от 1 до 5 Ус.

Типичная осциллограмма сигналов с фотодиодов после воздействия мощности экспозиционной дозы гамма-излучения показана на рис. 3. Стрелкой снизу на рис. 3 показан момент импульса излучения, при этом видно, что длительность ионизационной реакции фотодиодов значительно превышает длительность наводки системы запуска установки.

Выходные сигналы фотодиодов на основе КНС восстанавливались после воздействия мощности экспозиционной дозы гамма-излучения за время менее 10 мкс независимо от уровня воздействия, а у фотодиодов на основе Si – значительно дольше – до 40 мкс.

Деградации образцов фотодиодов на основе КНС при таком воздействии обнаружено не было, а у образцов на основе Si деградация незначительна: снижение выходного напряжения после воздействия не превышало 5 %.

На втором этапе проводились исследования влияния на работоспособность фотодиодов комбинированного воздействия потока быстрых нейтронов и гамма-излучения. В процессе такого воздействия образцы фотодиодов размещали в непосредственной близости от выхода излучения. На рис. 4 показаны типичные осциллограммы сигналов на нагрузках фотодиодов. Уровень этого воздействия по нейтронам составил более 3 Ус.

Из приведенных результатов, рис. 4, видно, что такое воздействие оказывает значительное влияние на параметры фотодиодов, как во время, так и после воздействия.

Во время этого воздействия выходное напряжение с фотодиодов возрастает в 2–4 раза. Форма импульса напряжения повторяет форму импульса излучения.

Фотодиоды на основе КНС деградируют после комбинированного воздействия потока быстрых нейтронов и гамма-излучения в гораздо меньшей степени, чем на основе Si. Деградация образцов фотодиодов на основе Si составила более 80 %, на основе КНС - не превышала 4 %.

На третьем этапе проводилось исследование влияния на работоспособность фотодиодов воздействия экспозиционной дозы гамма-излучения. Как и на предыдущих этапах, образцы фотодиодов располагали в поле излучения. Воздействие экспозиционной дозы гамма-излучения продолжалось в течение 33 мин.

Изменение параметров выходных сигналов контролировали с помощью осциллографов с интервалом около 10 мин. На рис. 5 приведены графики изменения выходного напряжения фотодиодов в процессе воздействия экспозиционной дозы гамма-излучения.

Проведенные исследования показали, что деградация напряжения образцов фотодиодов на основе Si после такого воздействия составила 20–35 %, а у образцов фотодиодов на основе КНС – отсутствовала. При этом у образцов фотодиодов на основе КНС наблюдалось восстановление (увеличение) напряжения на 15–25 % по сравнению с уровнем до воздействия экспозиционной дозы гамма-излучения.

Фотопреобразователи на основе гетероструктур

Фотопреобразователи (ФП) на основе гетеропереходов с использованием GaAs обычно рассчитаны на длину волны лазерного излучения (ЛИ) менее 870 нм, что связано с шириной запрещенной зоны GaAs. Такого рода структуры хорошо зарекомендовали себя, как с точки зрения удобства работы с ними, достаточной проработанностью конструкций, так и высокой радиационной стойкостью.

Ниже рассмотрены ФП на основе гетеропереходов GaAs-InGaAs, изготовленные в ФТИ им. А. Ф. Иоффе и рассчитанные на длину волны ЛИ, равную 970±30 нм.

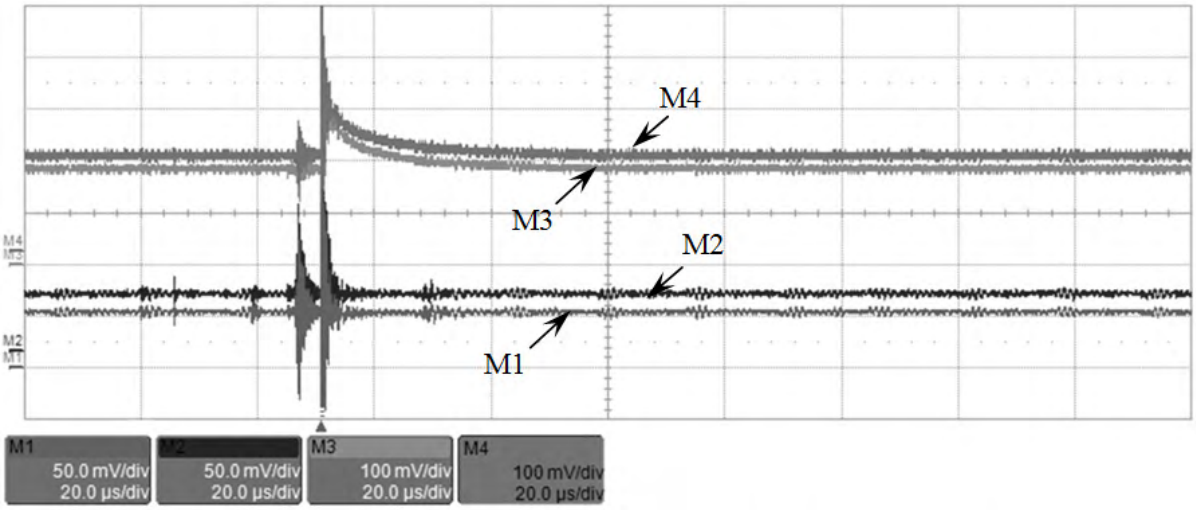


Рис. 3. Осциллограмма сигналов с фотодиодов при воздействии мощности экспозиционной дозы гамма-излучения: М1, М2 – сигналы с ФД2-КНС; М3, М4 – сигналы с ФД2-Si

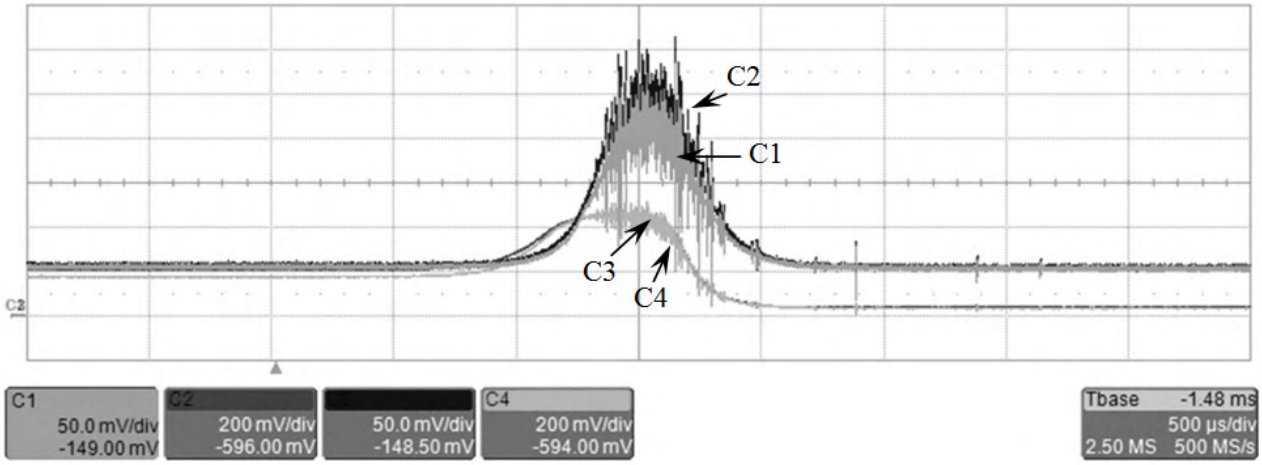


Рис. 4. Осциллограмма сигналов на фотодиодах при комбинированном воздействии потока быстрых нейтронов и гамма-излучения: С1, С2 – сигналы с ФД1-КНС; С3, С4 – сигналы с ФД1-Si

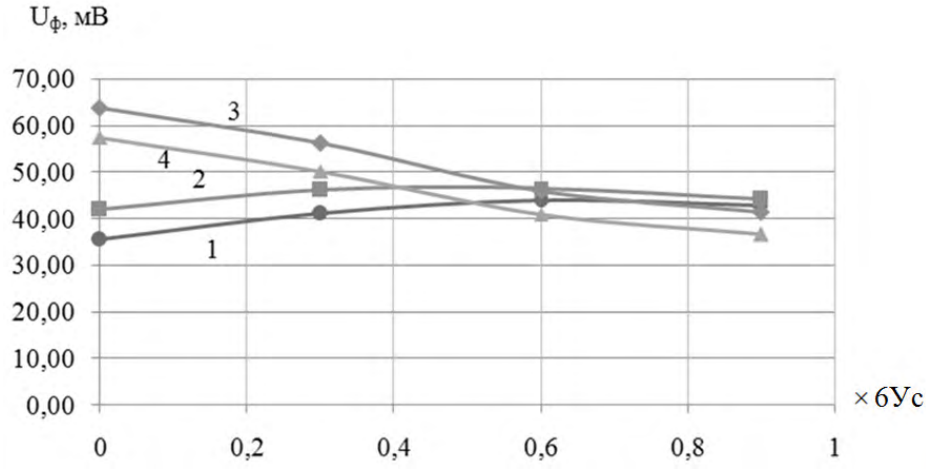


Рис. 5. Изменение выходного напряжения в процессе воздействия экспозиционной дозы гамма-излучения: 1, 2 – ФД1-КНС, 3,4 – ФД1-Si

Конструкция гетероструктуры ФП была выбрана, исходя из общих принципов конструкций гетероструктур для приборов такого класса, - с широкозонным окном и тыльным потенциальным барьером. Подобный тип гетероструктур широко применяется и при создании ФП солнечного излучения, поэтому принцип работы таких ФП хорошо изучен.

На основе структур GaInAs с содержанием индия 24 % были изготовлены ФП для исследования потенциальных возможностей по преобразованию мощного ЛИ в диапазоне длин волн 970±30 нм.

Спектральная зависимость фоточувствительности GaInAs ФП, представленная на рис. 6, демонстрирует значения 0,605–0,615 А/Вт в диапазоне длин волн 940–1000 нм.

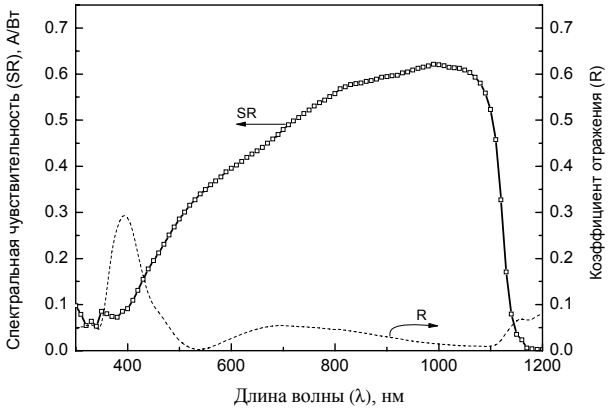


Рис. 6. Спектральная зависимость фоточувствительности GaInAs ФП с содержанием индия 24 %

Измерения вольтамперных характеристик (ВАХ) ФП в диапазоне мощностей ЛИ вплоть до 4 Вт показали, что для созданных на основе GaInAs метаморфных структур ФП ЛИ возможно достижение эффективности преобразования на уровне 40 % при оптимальном режиме работы ФП (рис. 7).

Возможно дальнейшее повышение КПД, которое будет определяться точностью согласования длины волны и мощности ЛИ с параметрами структуры и конструкции ФП.

Представленные структуры были исследованы для определения их радиационной стойкости.

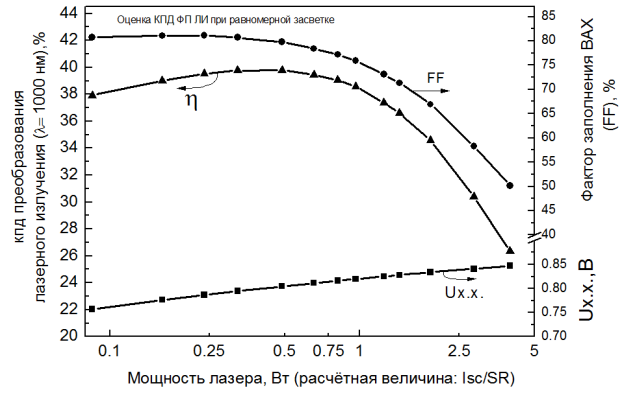


Рис. 7. Зависимость КПД, напряжения холостого хода ($U_{x.x.}$) и фактора заполнения ВАХ (FF) ФП ЛИ от мощности ЛИ (SR = 0.62 А/Вт, λ = 1000 нм)

С целью оценки деградации параметров ФП исследования осуществляли по схеме, приведенной на рис. 8. Конструктивно два соединенных последовательно образца ФП1 и ФП2 с подключенным нагрузочным сопротивлением R1 располагали в экранирующем кожухе. Длина соединительных кабелей от экранирующего кожуха до измерительных приборов составляла 20 м.

Для проверки работоспособности ФП ЛИ на него с ЛД (см. рис. 8) подавали импульсно-периодический световой сигнал мощностью 1 Вт, длительностью импульса 100 мкс и периодом следования 1 мс. Длина волны излучения составляла 976 нм.

На первом этапе проводили исследование влияния на работоспособность ФП воздействия мощности экспозиционной дозы гамма-излучения. Уровень этого воздействия менялся от 1,5 до·5Ус. Типичная осциллограмма сигнала на нагрузке ФП при воздействии мощности экспозиционной дозы гамма-излучения показана на рис. 9.

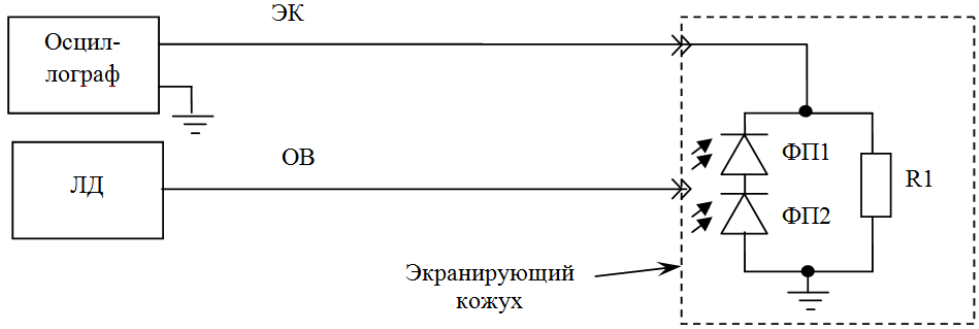
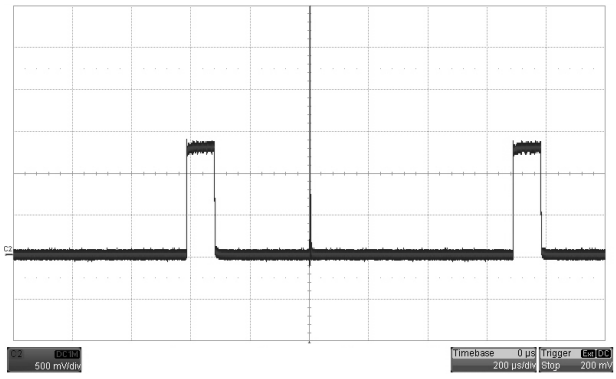
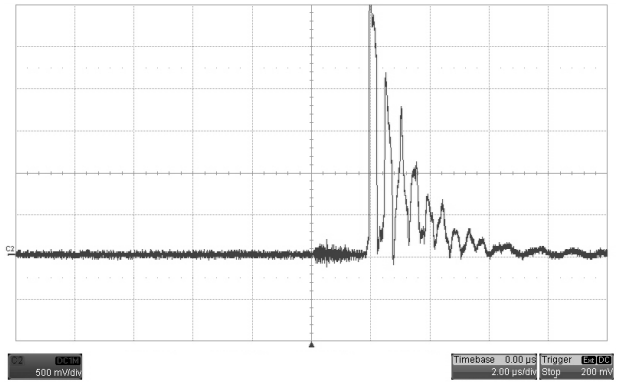


Рис. 8. Схема включения ФП при исследованиях: ЛД – лазерный диод; ФП1 и ФП2 – последовательно соединенные фотопреобразователи; R1 = 91 Ом – нагрузочное сопротивление ФП; ЭК – электрический кабель; ОВ – оптоволоконный кабель



а



б

Рис. 9. Типичная осциллограмма сигнала на нагрузке ФП в разных масштабах времени, при воздействии мощности экспозиционной дозы гамма-излучения: а – 200 мкс/дел, б – 2 мкс/дел

Стрелкой снизу на рис. 9 показан момент прихода импульса излучения. Деградация ФП при таком воздействии отсутствовала. Время спада паразитного сигнала - менее 5 мкс. По уровню и полярности сигнала можно утверждать, что происходит ионизация полупроводниковых кристаллов ФП, разделение носителей встроенным полем перехода и, соответственно, появление напряжения на нагрузке. После воздействия мощности экспозиционной дозы гамма-излучения ФП сохранил работоспособность.

На втором этапе проводили исследования влияния на работоспособность ФП флюенса нейтронов и экспозиционной дозы гамма-излучения. Уровень этого воздействия менялся от 1,3 до·5 Ус.

Осциллограмма сигнала на нагрузке ФП при этом воздействии показана на рис. 10.

Стрелкой снизу на рис. 10 показан момент начала импульса излучения. Сигнал с выхода ФП по форме практически повторял форму импульса излучения. После такого воздействия уровень полезного сигнала снизился приблизительно на 11 %. При дальнейших измерениях уровень сигнала не восстановился.

Таким образом, исследования радиационной стойкости образцов ФП на основе гетеропереходов GaAs-InGaAs, рассчитанных на длину волны ЛИ 970±30 нм, показали высокую стойкость образцов ФП:

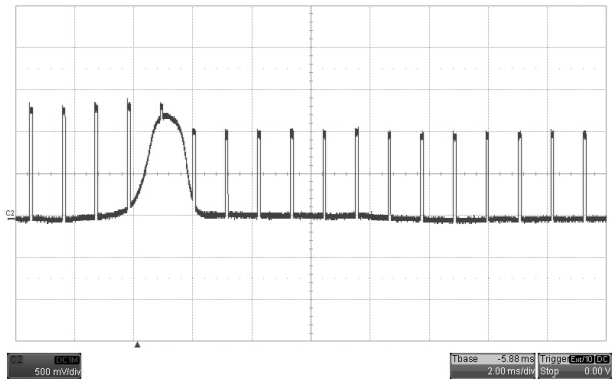


Рис. 10. Осциллограмма сигнала на нагрузке ФП при воздействии флюенса нейтронов и экспозиционной дозы гамма-излучения

– деградация образцов ФП отсутствует, как при воздействии мощности экспозиционной дозы гамма-излучения, так и экспозиционной дозы гамма-излучения;

– время восстановления работоспособности ФП при воздействии мощности экспозиционной дозы гамма-излучения не превышает 5 мкс;

– после воздействия флюенса нейтронов и экспозиционной дозы гамма-излучения уровень полезного сигнала с ФП ЛИ снизился лишь на 11 %.

Выводы

Приведенные в данной работе результаты показали перспективность использования в качестве материалов фотодиодов структур КНС и на основе арсенида галлия. Применение указанных материалов позволяет обеспечить высокую стойкость фотодиодов к воздействию ионизирующих излучений.

Результаты проведенных исследований показали, что фотодиоды на основе КНС структур обладают электрическими характеристиками, сопоставимыми с кремниевыми диодами, а уровень их радиационной стойкости существенно превосходит уровень стойкости кремниевых диодов.

Исследования ФП на основе гетеропереходов GaAs-InGaAs, изготовленных в ФТИ им. А. Ф. Иоффе и рассчитанных на длину волны лазерного излучения 970±30 нм, показали высокую стойкость образцов к воздействию ионизирующих излучений.

Литература

1. Филачев А. М., Таубкин И. И., Тришенков М. А. Твердотельная фотоэлектроника. Фотодиоды. М.: Физматкнига, 2011.

2. Пат. 2611552, РФ. Фотоприемное устройство (варианты) и способ его изготовления / Кабальнов Ю. А., Киселев В. К., Труфанов А. Н. // Бюллетень изобретений .2017.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОТРАБОТКИ МЕТОДА ТРАССЕРНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ ПУЛЬСАЦИЙ СКОРОСТИ В ЗОНЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ЖИДКИХ И ГАЗОВЫХ СРЕД

Н. В. Невмержицкий, Е. А. Сотсков, Е. Д. Сеньковский, Е. В. Бодров, С. В. Фролов, К. В. Анисифоров, О. Л. Кривонос, А. Р. Гавриш, А. С. Соколова

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

В зонах турбулентного перемешивания (ЗТП) веществ, развивающихся при неустойчивостях Кельвина – Гельмгольца, Релея – Тейлора и Рихтмайера – Мешкова [1–4], параметры течения (плотности, скорости, энергия) не постоянные во времени несколько изменяются, т. е. пульсируют. Течение в ЗТП рассматривают как результат наложения на усредненный поток движений (турбулентных пульсаций) различных масштабов [5]. Под масштабом движения понимают порядок величины расстояния, на протяжении которого существенно меняется скорость движения. Для анализа турбулентных течений вводят число Рейнольдса турбулентных пульсаций [5]:

$$\mathrm{Re}_\lambda \sim \frac{U_\lambda \lambda}{\upsilon}, \qquad (1)$$

где λ – масштаб пульсаций, U_λ – порядок величины скорости пульсаций, υ – коэффициент кинематической вязкости.

С ростом Re_λ в развитом турбулентном потоке появляются все более крупномасштабные пульсации, энергия от крупномасштабных пульсаций передается мелкомасштабным, где и происходит ее диссипация.

Для анализа турбулентности часто применяется разложение пульсаций гидродинамических величин (плотности, скорости) в ЗТП в ряд Фурье. Для точек внутри ЗТП строят, например, среднюю спектральную плотность $E(k)$ в зависимости от модуля волнового вектора $k = 2\pi/\lambda$ в логарифмическом масштабе и сравнивают ее с колмогоровским спектром и экспериментальными данными (если таковые имеются). Как правило, полученный спектр пульсаций должен быть близок к колмогоровскому спектру, при котором $E(k) \sim k^{-5/3}$.

На рис. 1а для примера представлен спектр пульсаций компонент скоростей [5] по трем направлениям (x, y, z), полученный численным методом в расчетах ЗТП на границе *воздух*-SF_6 при числах Маха УВ M = 10,6. По графику видно, что скорости в ЗТП по трем направлениям различны.

Для тестирования современных численных методик требуются экспериментальные данные о пульсациях скоростей. Эти данные исследователи пытаются получить с применением метода лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА) [6]. Этим методом регистрируют пульсации скорости в одной точке ЗТП. При этом, для получения полной картины течения, наряду с методом ЛДА необходимо применение другого метода для определения границ зоны, что достаточно дорого. На рис. 1б представлены профили скорости в ЗТП на границе *гелий*-CO_2, полученные методом ЛДА в экспериментах работы [7]. По графику видно, что при средней скорости течения в ЗТП ≈ 240 м/с пульсации скорости составляют ≈ 50 м/с. На границе *воздух*-CO_2 в этой работе пульсации составили ≈ 20 м/с при средней скорости течения в зоне ТП ≈ 200 м/с.

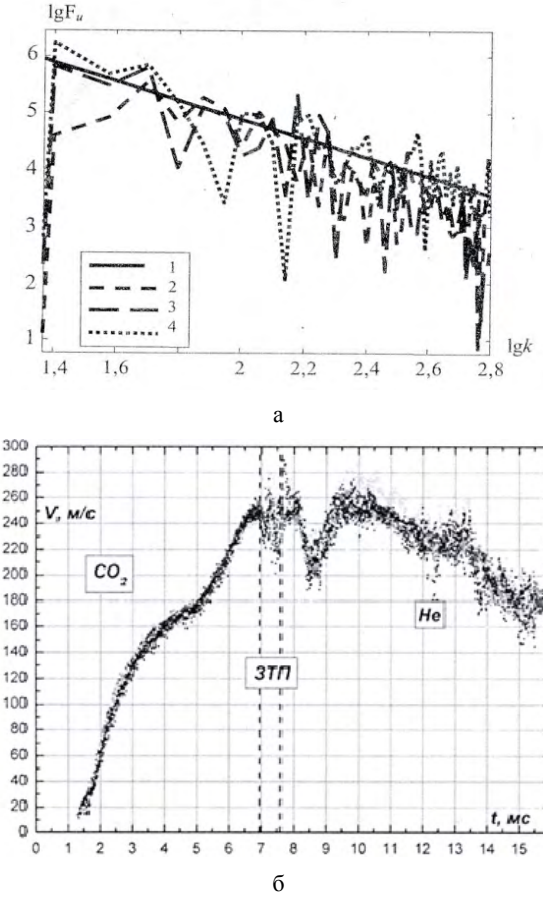


Рис. 1. Расчетный спектр пульсаций компонент скорости в ЗТП: а – на границе *воздух*-SF_6: 1 – колмогоровский спектр; 2, 3, 4 - вариант расчета; k – волновое число; F_u – относительная скорость; u_i – компоненты скорости; б – профили скорости в экспериментах с системой *гелий*-CO_2

Альтернативным методом определения пульсаций скорости в ЗТП может быть PIV-метод (Particle Image Velocimetry – цифровая трассерная визуализация) [8]. Метод часто применяется для исследования пульсаций скорости в однофазных течениях. Авторы в экспериментах отработали этот метод для определения пульсации скорости в двухфазных течениях, которыми являются ЗТП жидких и газовых сред. Суть PIV-метода заключается в том, что в одно из перемешивающихся веществ, как и в методе ЛДА, добавляются твердые взвешенные частицы (трассеры), которые регистрируются в ЗТП видеокамерой при подсветке течения импульсами плоского тонкого лазерного луча (1–2 мм), разнесенными во времени. По величине смещения частиц и времени между лазерными импульсами определяются скорости частиц, а затем – пульсации скоростей. Принимается, как и в методе ЛДА, что скорость частицы равна массовой скорости течения в ЗТП. Результаты отработки этого метода представлены в данном докладе.

Применяемое для PIV-метода оборудование

Практический интерес представляют пульсации в ЗТП в диапазоне величин ускорений течения от $10^2 g_0$ до $10^5 g_0$ (g_0 = 9,8 м/с^2) и числах Маха ударной волны в газах от M = 1,1 до M = 10. Для измерений пульсаций скорости в указанных интервалах величин мы применяли оборудование, обеспечивающее пространственное разрешение на уровне 0,05 мм, временное – 7 нс. Блок-схема соединения аппаратуры и схема видеорегистрации представлены на рис. 2 и 3.

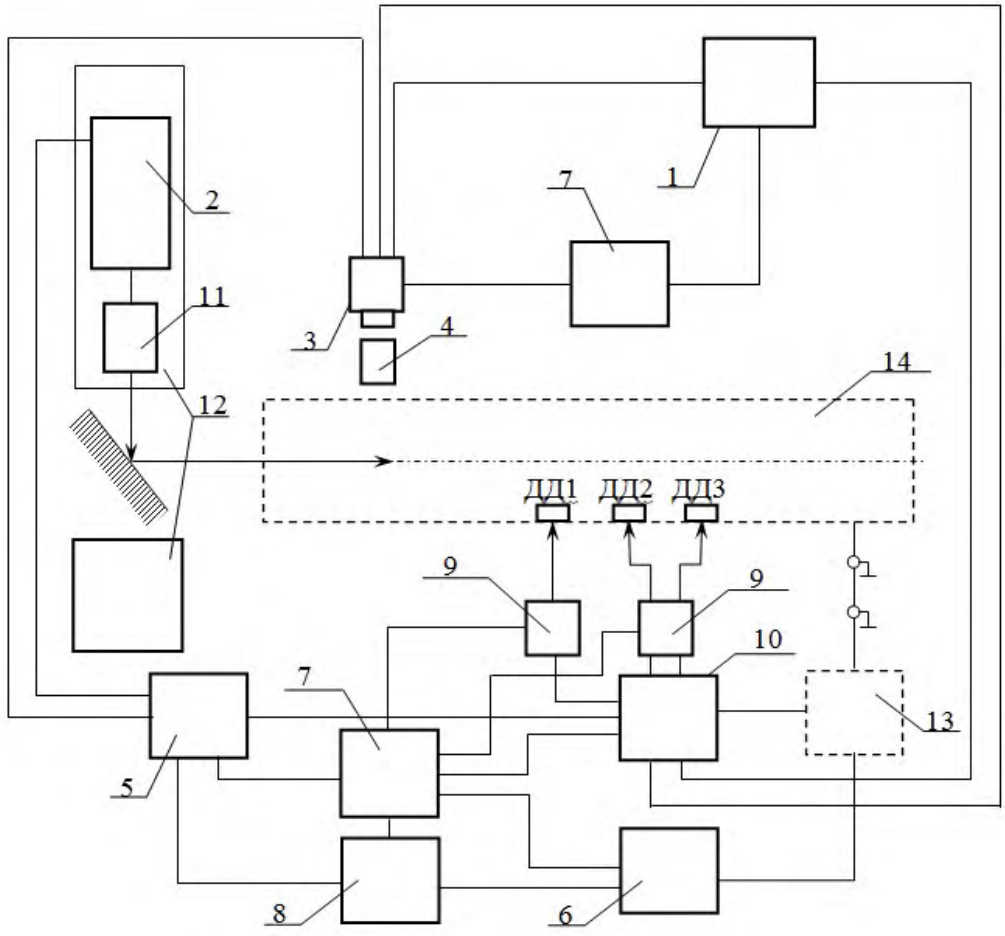


Рис. 2. Блок-схема оборудования PIV-метода: 1 – персональный компьютер; 2 – лазерная установка (532 нм, длительность импульса 7 нс); 3 – видеокамераCCD (ПЗС-матрица 2000×2000 пикселей, размер пикселя – 7 мкм); 4 – оптический телескоп; 5 – генератор задержек и импульсов (разрешение – 10 пс); 6 – блок формирования высоковольтного импульса; 7 – источник бесперебойного питания; 8 – генератор испытательных импульсов; 9 – усилитель заряда; 10 – осциллограф; 11 – телескоп для создания лазерного ножа; 12 – теневая установка ИАБ-451; 13 –установка запуска ударной трубы; 14 – ударная труба (легкогазовая пушка); ДДi – датчики давления

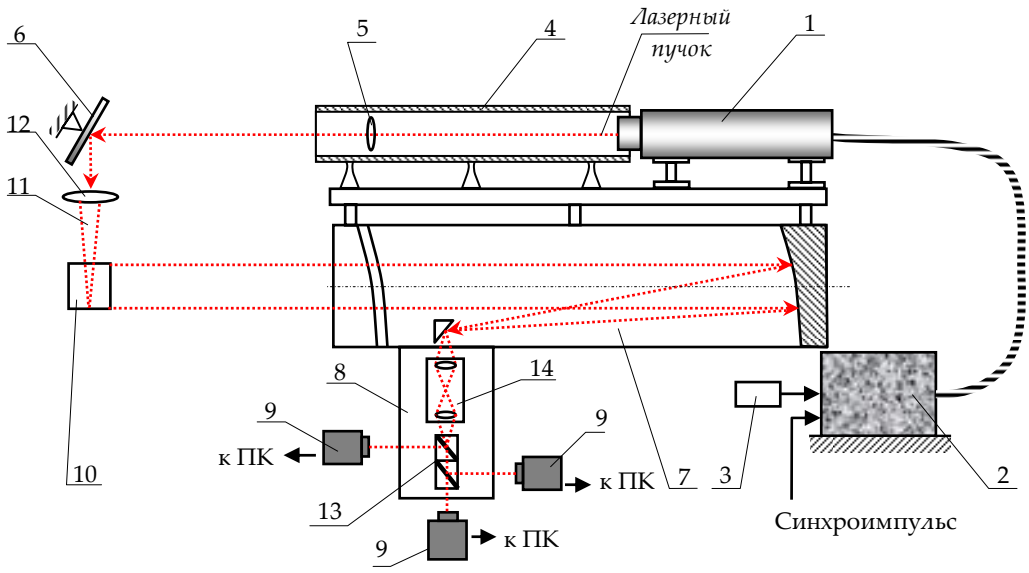


Рис. 3. Схема видеорегистрации течения PIV-методом: 1 – лазерная головка; 2 – блок питания лазера; 3 – пульт управления; 4 – труба защитная; 5 – короткофокусная цилиндрическая линза; 6 – поворотное зеркало; 7 – оптическая система ИАБ-451; 8 – трехканальный оптический модуль; 9 – видеокамера CCD; 10 – экспериментальная сборка; 11 – лазерный нож; 12 – длиннофокусная цилиндрическая линза; 13 – светоделительные кубики; 14 – телескоп

Отработка PIV-метода на экспериментах по исследованию ТП при неустойчивости Кельвина – Гельмгольца на границе газ-жидкость

Эксперименты проводились на ударной трубе (УТ), схема которой приведена на рис. 4.

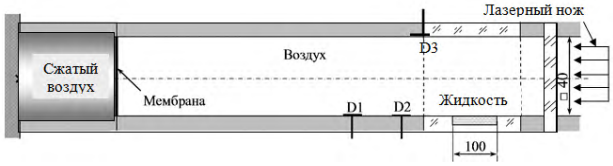
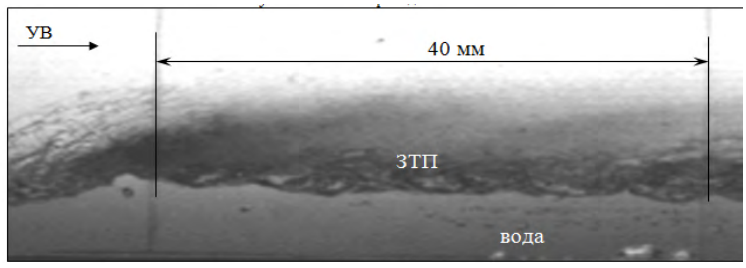


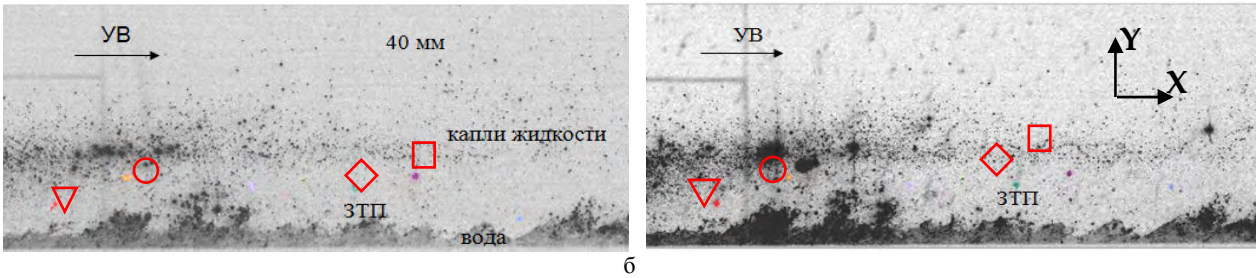
Рис. 4. Схема проведения опытов: D1, D2, D3 – отметчики времени (датчики давления) для определения скорости ударной волны

Камера высокого давления УТ заполнялась сжатым воздухом с начальным давлением 5,5 ати. В камере низкого давления и в измерительной секции находился воздух при атмосферных условиях. После разрушения мембраны в канале трубы формировалась ударная волна с числом Маха M ≈ 1,3. Со временем она скользила по поверхности жидкости, находящейся в кювете. Это приводило к развитию на контактной границе воздуха и жидкости неустойчивости Кельвина – Гельмгольца и последующему турбулентному перемешиванию веществ. В качестве жидкости применялась вода (опыт № 1502) и водный раствор этилового спирта (опыт № 1626) плотностью ≈ 0,92 г/см^3. В раствор спирта добавлялись мелкие (менее 0,5 мм) частицы (трассеры) из полипропилена аналогичной плотности, т. е., частицы находились во взвешенном состоянии в растворе. В воду трассеры не добавлялись. На рис. 5 и 6 представлены полученные видеокадры течения. На рис. 6а (для сравнения) представлена кинограмма эксперимента с водой при регистрации течения в проходящем свете. На рис. 6а разрешается лишь интегральная ширина зоны турбулентного перемешивания, структура зоны не просматривается. В опытах № 1502 и 1626, хорошо разрешаются капли воды и твердые частицы (трассеры), по которым можно определить пульсации скорости в ЗТП. Сравнивая видеокадры рис. 5а с рис. 5б и рис. 5в, можно заключить, что ЗТП состоит из зоны капельного облака и, собственно, ЗТП.

На рис. 5 одни и те же частички показаны одинаковыми символами (между кадрами Δt = 0,05 мс, число Маха M = 1,3, опыт № 1502).

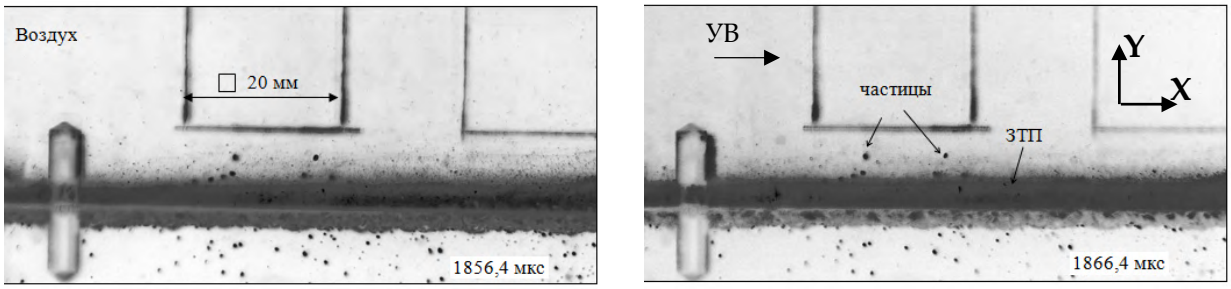


а



б

Рис. 5. Видеокадры регистрации турбулентного перемешивания на границе газ-вода:
а - регистрация в проходящем свете, б - регистрация PIV-методом, УВ – направление ударной волны



а б

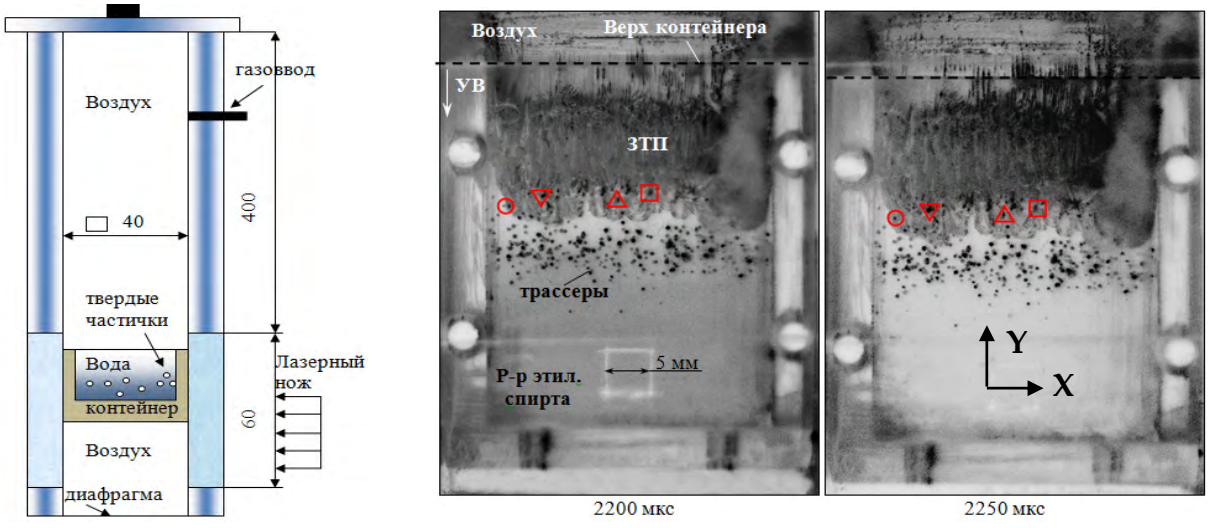
Рис. 6. Развитие турбулентного перемешивания под действием скользящей УВ на границе раствора этилового спирта и воздуха: а – регистрация PIV-методом, б – опыт № 1626

Отработка PIV-метода на экспериментах по исследованию ТП при неустойчивости Релея–Тейлора на границе газ-жидкость

Эксперименты проводились на легкогазовой пушке (см. рис. 7). В качестве жидкости применялся водный раствор этилового спирта. В раствор добавлялись мелкие белые частицы из полипропилена. Слой жидкости массой ≈50 г наливался в прозрачный контейнер, который помещался в канал легкогазовой пушки. Объемы пушки над и под слоем заполнялись сжатым воздухом равного давления. После разрыва диафрагмы газ из-под слоя вытекал в атмосферную среду, под действием давления над слоем слой ускорялся. На границе воздух-жидкость развивалась неустойчивость Релея – Тейлора, которая со временем приводила к турбулентному перемешиванию веществ.

На рис. 7б символами ▽ ○ □ △ ◇ обозначены одни и те же частицы.

На видеокадрах и в жидкости и в ЗТП хорошо разрешаются трассеры. Зная их пролетное расстояние и время между видеокадрами, можно определить скорость трассеров.



а б

Рис.7. Постановка эксперимента, опыт № 1611 (размеры в мм): а – схема постановки эксперимента, б – видеокадры течения

Отработка PIV-метода на экспериментах по исследованию ТП газов при неустойчивости Рихтмайера–Мешкова

Эксперименты проводились на воздушной ударной трубе (см. рис. 9) при числе Маха ударной волны M = 1,5. Исследовалось развитие турбулентного перемешивания (ТП) на контактных границах воздух-SF_6, воздух-CO_2.

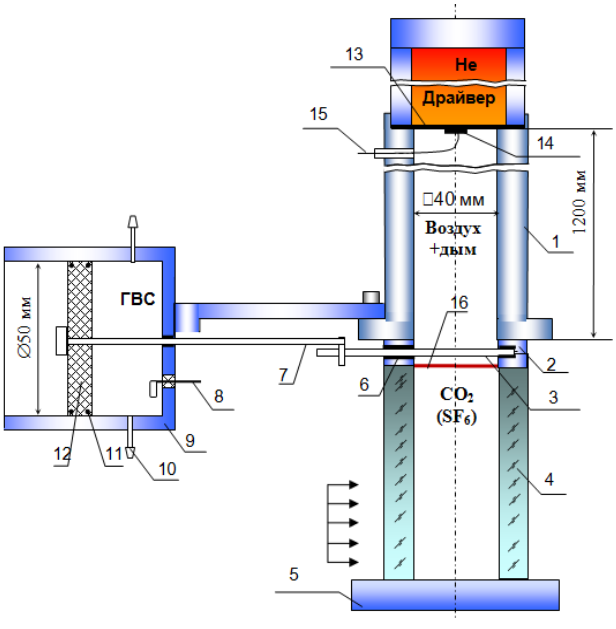


Рис. 8. Схема ударной трубы с устройством выдвижной заслонки: 1 – ударная труба; 2 – корпус заслонки; 3 – заслонка; 4 – измерительная секция ударной трубы;5 – жесткая стенка (прозрачное оргстекло); 6 – прокладки; 7 – шток; 8 – электроввод; 9 – цилиндр; 10 – газоввод; 11 – уплотнительное кольцо; 12 – поршень; 13 – мембрана; 14 – нихромовая проволочка; 15 – электропровод; 16 – узкая полимерная пленка

Газы в трубе изначально разделялись быстроходной выдвижной заслонкой *3*. В легкий газ (воздух) для визуализации границ ЗТП добавлялся сигаретный дым. На расстоянии примерно 5 мм под заслонкой (в тяжелом газе) располагалась узкая (2 мм) черная полимерная пленка толщиной 1–2 мкм. Заслонка выдергивалась из трубы поршнем 12, который ускорялся продуктами взрыва смеси ацетилена и кислорода. После разрыва мембраны ударная волна приходила на границу газов, затем разрушала полимерную пленку на мелкие фрагменты. Со временем фрагменты пленки попадали в ЗТП и служили в ней трассерами. По скоростям фрагментов пленки определялись величины пульсаций скорости. На рис. 9 представлены видеокадры ТП на границе воздух-CO_2, символами ▽ ○ □ △ ◇ обозначены одни и те же частицы.

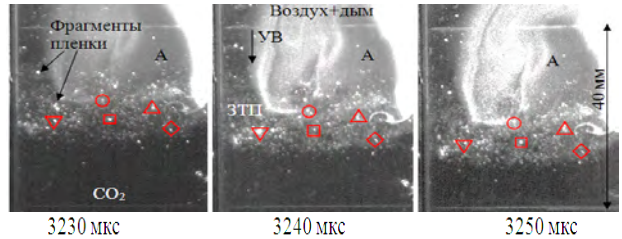


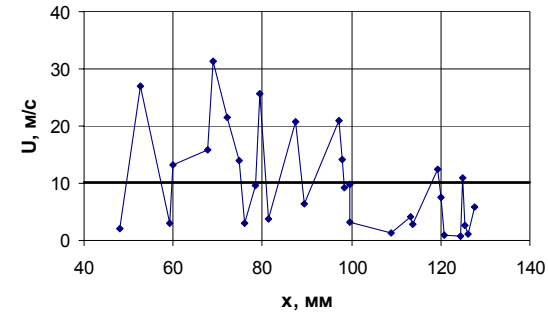
Рис. 9. Видеокадры ТП на границе воздух-CO_2, опыт № 1633: А – область дыма

Результаты обработки экспериментов

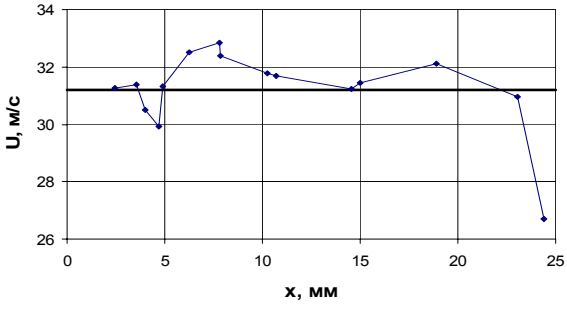
Обработка результатов экспериментов производилась по специальной математической программе ИФВ «QTSearcher». Программа определяла центр частиц и расстояние между этими центрами на разных видеокадрах. По этому расстоянию и времени между видеокадрами определялась скорость трассеров с погрешностью ≤ 15 %.

Подчеркнем, в представленных экспериментах минимальный масштаб пульсаций λ не может быть меньше размера используемых трассеров (твердых частиц или фрагментов пленки).

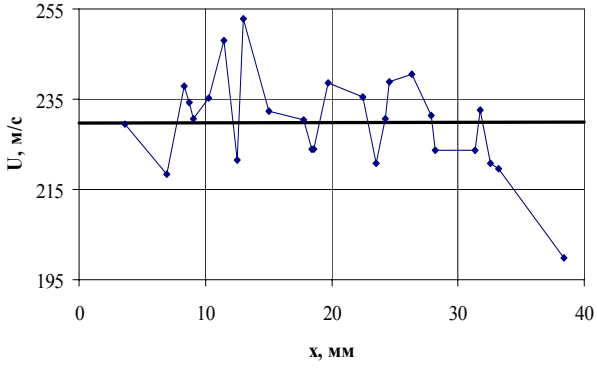
На рис. 10 представлены графики значения скоростей **U** на длине **x** ЗТП, где **x** отсчитывается от вертикальной стенки контейнера (измерительной секции или кюветы с жидкостью).



а



б



в

Рис. 10. Значения скоростей в ЗТП при неустойчивостях: а – Кельвина–Гельмгольца в опыте № 1626, где M = 1,3; б – Релея–Тейлора в опыте № 1611, где $g = 2{,}2\times10^3\ g_0$; в – Рихтмайера–Мешкова в опыте № 1633, где M = 1,5

По графикам, рис. 10, видно, что:

- относительные пульсации скорости в зоне ТП при неустойчивости Кельвина – Гельмгольца из-за сильного вихревого течения значительно выше, чем при неустойчивостях Релея – Тейлора и Рихтмайера – Мешкова;
- максимальные пульсации скорости в зоне ТП на границе *воздух*-CO_2 составляют ≈ 30 м/с, что коррелирует с пульсациями скорости, полученными методом ЛДА в работе [7].

Заключение

Показана возможность применения PIV-метода для исследования пульсаций скорости в ЗТП жидких и газовых сред. Его преимущества: относительная простота, наглядность, дешевизна, получение пульсаций по всей ширине ЗТП в одном опыте. Недостаток – трудность идентификации некоторых частиц на разных видеокадрах.

В ходе отработки метода получены новые результаты:

– зона турбулентного перемешивания, развивающаяся на контактной границе газ-жидкость, под действием скользящей воздушной ударной волны состоит из двух областей: собственно, из зоны перемешивания и капельного облака;

– относительные значения пульсаций скорости в ЗТП при неустойчивости Кельвина – Гельмгольца из-за сильного вихревого течения значительно выше, чем при неустойчивостях Релея – Тейлора и Рихтмайера – Мешкова.

Требуется дальнейшая экспериментальная и расчетная отработка метода с целью получения большого количества точек для разложения пульсаций скоростей в ряд Фурье, определения спектра пульсаций скорости.

Литература

1. Helmholtz H. L. F. Uber discontinuirlish Flussigkeits-Bewegungen. Monatsberichte Konigl. Preus. Akad. Wiss. // Berlin, 1868. P. 215.

2. Taylor G. I. The instability of liquid surfaces when accelerated in a direction perpendicular to their planes. // I. Proc. Roy. Soc. 1950. Vol. A201. P. 192.

3. Richtmyer R. D. Taylor instability in shock acceleration of compressible fluids. // Commun.Pure Appl.Math. 1960. Vol. 13. P. 297.

4. Мешков Е. Е. Неустойчивость границы раздела двух газов, ускоряемой ударной волной. // Изв. АН СССР, МЖГ. 1969. № 5. С. 151–158.

5. Янилкин Ю. В., Стаценко В. П., Козлов В. И. Математическое моделирование турбулентного перемешивания в сжимаемых средах // Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2009. С. 507.

6. Коронкевич В. П., Соболев В. С., Дубнищев Ю. Н. Лазерная интерферометрия // Новосибирск: Наука, 1983. С. 214.

7. Тяктев А. А., Павленко А. В., Аринкин Н. Б. и др. Экспериментальное исследование характеристик зоны турбулентного перемешивания газовых сред, вызванной действием неустойчивости Релея–Тейлора, при числах Атвуда 0,2 и 0,8 / Международная конференция. XVII Харитоновские тематические научные чтения // Сборник трудов. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2015. С. 645–656.

8. Brucker C. Structure and dynamics of the wake of bubbles and its relevance for bubble interaction. // Phys. Fluids. 1999. Vol. 11. C. 1781.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИОННОЙ БОМБАРДИРОВКИ ФОТОКАТОДА ХРОНОГРАФИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

А. Ю. Соколов, А. В. Спахов, П. И. Коновалов

ФГУП «ВНИИА им. Н. Л. Духова», Москва

Хронографические электронно-оптические преобразователи (ЭОП) предназначены для регистрации быстропротекающих процессов в составе электронно-оптических регистраторов, стоимость которых, в зависимости от характеристик, производителя и страны происхождения, колеблется от пяти до нескольких десятков миллионов рублей. При этом ресурс изделия определяется ресурсом его основного элемента – хронографического ЭОП, который для металлостеклянных приборов ВНИИА составляет всего 500–600 часов работы. За это время происходит снижение чувствительности фотокатода ЭОП до 10 % от своего начального значения [1]. Одной из причин этого процесса является бомбардировка фотокатода ионами, образованными в объеме ЭОП при неупругом взаимодействии фотоэлектронов с атомами остаточного газа [2, 3].

Эксперимент по сравнительной наработке хронографического ЭОП в статическом и импульсном режимах включения [4], показывает, что в импульсном режиме, в отличие от статического, не происходит снижения чувствительности фотокатода ЭОП (рис. 1). Мы предполагаем, что данный факт обусловлен снижением ионной бомбардировки фотокатода за счет синхронизации импульсного излучения с затворным электрическим импульсом на фотокатод, в результате которого фотоэлектроны свободно проходят электронно-оптическую систему (ЭОС) прибора, а большая часть ионов задерживается ускоряющей сеткой ЭОП (рис. 2). При этом на основе экспериментальных данных не удалось установить, оптимален ли режим питания, а также, какая часть ионов, и с какой энергией бомбардировали фотокатод в ходе импульсного питания. Поэтому невозможно было использовать полученные результаты для определения оптимальных параметров импульсного включения хронографических ЭОП, рабочее напряжение питания которых отличается от напряжения ЭОП, участвующего в эксперименте.

При подготовке к данному эксперименту были определены параметры импульсного питания. Для этого методом конечных элементов в среде COMSOL были проведены расчет ЭОС прибора и моделирование движения в нем электронов e^-, эмитированных с различных точек фотокатода [5]. В результате расчета получены значения потенциалов электрического поля φ во всех узлах расчётной сетки и параметры каждого фотоэлектрона на *i*-м шаге расчета их траектории. Параметры каждого электрона выводились в виде массива данных, который состоит из *i* строк и пяти столбцов со значениями: координаты x_i, y_i, z_i электрона на *i*-ом шаге, времени его пролета от точки вылета до данной координаты t_i и энергии электрона W_i на данной координате.

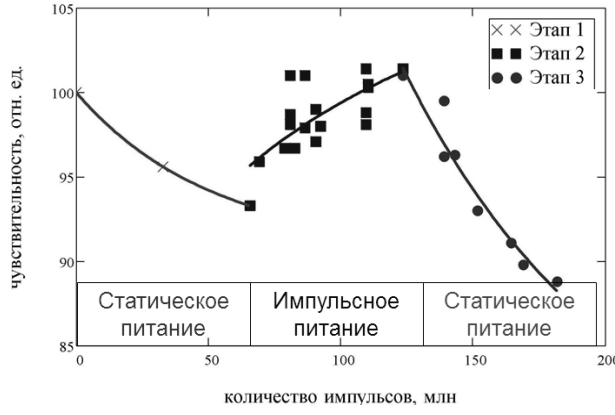


Рис. 1. Изменение чувствительности фотокатода в ходе эксперимента

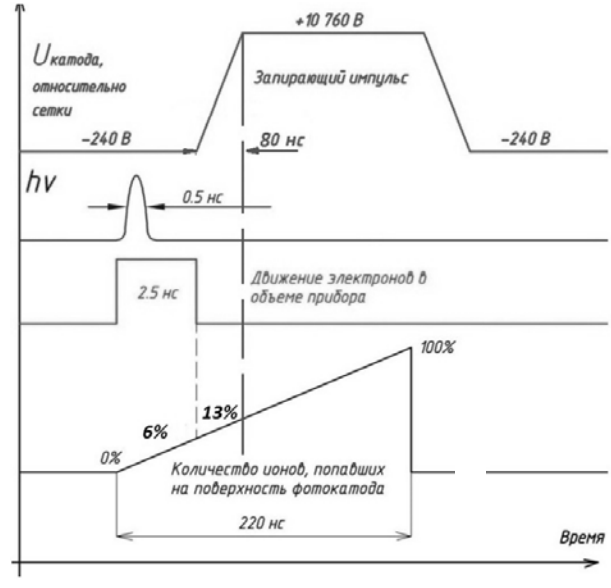


Рис. 2. Диаграмма процессов при импульсном питании прибора

В результате расчета получено, что максимальный разброс времени пролета электронов t_i составляет менее 0,12 %, а энергии W_i – менее 4 %. Следовательно, эти параметры слабо зависят от координаты

точки вылета e^- с фотокатода. Также для e^-, вылетевшего из начала системы координат O (совпадает с центром фотокатода), все значения координат y_i, z_i много меньше z_i. То есть он движется практически вдоль оптической оси прибора OZ. Поэтому в дальнейших расчетах использовались только z_i, t_i, W_i для такого фотоэлектрона и значения потенциалов φ_i в узлах расчетной сетки с координатой (0, 0, z_i).

В ходе эксперимента фотокатод ЭОП засвечивался лазерным импульсом с длительностью $t_{hv} = 0{,}5$ нс и эмитировал электроны. Для того чтобы все e^- прошли ЭОС прибора без искажения своей траектории, затворный импульс в ходе наработки ЭОП прикладывался со сдвигом относительно окончания засветки фотокатода. Сдвиг осуществлялся на время t_{op}, за которое e^- пройдет ЭОС прибора, t_{op} равно расчетному времени пролета e^- от центра фотокатода до анодной диафрагмы (t_i на координате $z_i = 80$ мм): $t_{op} = 2{,}0$ нс.

Во время пролета в объеме ЭОП e^- могут сталкиваться с нейтральными атомами остаточного газа и ионизировать их. Образованные ионы ускоряются электрическим полем ЭОС прибора в сторону фотокатода и бомбардируют его. Приложение импульса напряжения обратной полярности между фотокатодом и сеткой позволяет затормозить часть ионов в этом промежутке. В ходе эксперимента использовался такой затворный импульс, причем сетка оставалась под своим потенциалом φ_{grid}, а на фотокатод подавался импульс $\varphi_{ph}(t)$. Он имел прямоугольную форму с длительностью T более 220 нс, амплитудой $U_{\max} = 11$ кВ и фронтом нарастания $t_{front} = 80$ нс.

Длительность затворного импульса t_{pulse} определялась, исходя из следующего критерия:

$$t_{pulse} > \max(t_i), \tag{1}$$

где $\max(t_i)$ – время пролета e^- от центра фотокатода до экрана.

Амплитуда затворного импульса выбиралась равной значению максимальной энергии $W_{\max}$, которую ион может набрать в ходе пролета ЭОС прибора. Оно равно наибольшей разнице потенциалов в ЭОС прибора:

$$W_{\max} = eU_{\max} = e\left|\varphi_{ph0} - \varphi_{\text{a}}\right|, \tag{2}$$

где e – элементарный заряд; φ_{ph0} – потенциал на фотокатоде до запуска затворного импульса; φ_{a} – потенциал анода ЭОП.

Длительность фронта нарастания импульса t_{front} была выбрана, исходя из следующих рассуждений. До подачи затворного импульса e^- пройдет ЭОС и создаст N ионов в объеме ЭОП. Потенциал электрического поля φ изменяется монотонно вдоль оси OZ. Каждому расчетному шагу электрона z_i соответствует свое значение φ_i и координата z_i, в которой может образоваться ион. Определим время движения иона T_i, рожденного в точке z_i до сетки z_{grid}, исходя из допущения, что он движется в однородном электрическом поле с величиной напряженности E_i:

$$E_i = \left|\frac{\varphi_i - \varphi_{grid}}{z_i - z_{grid}}\right|. \tag{3}$$

В таком случае, решая уравнение движения иона с массой M и с нулевой начальной скоростью, получим:

$$M\frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = q\left|\vec{E}_i\right|; \tag{4}$$

$$T_i = \frac{2M\left(z_i - z_{grid}\right)}{q\left|\vec{E}_i\right|}. \tag{5}$$

В допущении движения иона в однородном электрическом поле, его энергия W_{grid_i} в момент пересечения сетки T_i будет равна разнице потенциала в точке его рождения φ_i и потенциала сетки

$$W_{grid_i} = e\left|\varphi_{grid} - \varphi_i\right|. \tag{6}$$

Предположим, что фронт импульса на фотокатоде $\varphi_{ph}(t)$ нарастает линейно, тогда скорость этого процесса $C_f = \dfrac{\varphi_{ph}(t)}{t}$. Для того чтобы затормозить ион, пересекающий сетку в момент времени T_i, необходимо приложить на промежуток фотокатод-сетка тормозящее поле, которое совершит над ним работу A_i, большую энергии иона W_{grid_i}.

$$A_i = e\left(\varphi_{ph}(T_i) - \varphi_{grid}\right) > W_{grid_i}. \tag{7}$$

Таким образом, получаем условие для значения C_f:

$$C_f > \max\left(\frac{W_{grid_i} + e\varphi_{grid}}{eT_i}\right). \tag{8}$$

Длительность фронта нарастания импульса t_{front} определяется из условия:

$$W_{\max} = t_{front}\ C_f. \tag{9}$$

Для условий эксперимента имеем $W_{\max} = 11$ кэВ; $t_{front} = 80$ нс. Последний параметр определен с учетом того, что фотокатод бомбардируется самыми «быстрыми» частицами – ионами водорода $H+$ с соответствующей массой M_{H^+}.

Используемый способ определения параметров затворного импульса не учитывал влияния неравномерности электрического поля ЭОП на движение ионов, а, следовательно, различное приращение их скорости и энергии на участках своей траектории. Такой способ оценки задавал повышенные требования к затворному импульсу, что, с одной стороны, гарантировало его эффективность, а с другой – накладывало предельно жесткие требования к аппаратуре, генерирующей такой импульс.

Проведенная оценка основана на большом количестве допущений и является слишком упрощен-

ной, из нее невозможно достоверно определить, какая именно часть ионов и с какой энергией бомбардировали фотокатод в ходе импульсного питания. Поэтому полученные результаты нельзя применять для определения оптимальных параметров импульсного включения хронографических ЭОП, рабочее напряжение питания которых отличается от напряжения ЭОП, участвующего в эксперименте. Так, если провести оценку параметров затворного импульса при увеличенном потенциале на сетке, возрастет энергия ионов, бомбардирующих фотокатод в режиме импульсного включения ЭОП, а требования к параметрам импульса станут еще жестче.

Самым грубым допущением в описанной выше оценке параметров импульсного питания является предположение о том, что ион движется в однородном электрическом поле. Оно было сделано из-за того, что полноценное моделирование процесса ионной бомбардировки стандартными средствами среды Comsol являет практически невыполнимой задачей. Для e^- мы имеем рассчитанные методом конечных элементов значения z_i, t_i и W_i. Соответственно имеется i возможных точек рождения ионов в координате z_i, и во время t_i. Затем необходимо рассчитывать пролет ионов до фотокатода от всех возможных этих точек, с учетом сдвига по времени их образования. В среде Comsol стандартными средствами невозможно выполнить одновременное моделирование такой задачи. Необходимо проводить i отдельных расчетов. Более того, пакет Comsol, в котором моделируется движение заряженной частицы, не позволяет учитывать изменение электрического поля во времени. В связи с этим, нами разработан алгоритм моделирования ионной бомбардировки фотокатода хронографических ЭОП в статическом и импульсном режимах питания прибора, позволяющий решить эти проблемы.

Данный алгоритм использует среду COMSOL для расчета ЭОС прибора и моделирования движения в нем e^-, эмитированного с центра фотокатода. То есть, как и было описано выше, решается одномерная задача движения e^-. В результате определяются параметры e^-: z_i, t_i, W_i, а также значения потенциалов φ_i в узлах расчетной сетки с координатой $(0, 0, z_i)$.

Полученный массив данных используется для решения одномерной задачи движения групп ионов, образованных на i-м шаге расчета траектории e^-. Соответствующая группа ионов обозначается индексом i. При этом время образования i-й группы ионов равно t_i, а координата – z_i. После образования, группа ионов движется в направлении к фотокатоду вдоль оси OZ. Ее траектория состоит из i отрезков, границы которых совпадают с узлами расчетной сетки. Вводится счетчик j узлов расчетной сетки, которые проходит ион, так что $j \in [0, i]$, при $j = 0$ происходит образование группы ионов, при $j = i$ ионы сталкиваются с фотокатодом.

В случае статического режима включения ЭОП ускорение ионов на j-м шаге расчета a_j является константой и определяется напряженностью поля, в котором движется ион $\left|\overrightarrow{E_i}\right|$. Методом рекурсии решается набор дифференциальных уравнений движения группы ионов на $j \in [0, i]$ отрезках своей траектории:

$$M \frac{\partial^2 z_j}{\partial t_j^2} = q\left|\overrightarrow{E_i}\right|, \tag{10}$$

где q – заряд иона.

Определенные в ходе решения времена пролета j-го отрезка группой ионов T_j и их конечные скорости на каждом отрезке V_j используются в качестве начальных условий для следующего шага расчета.

Полученные решения суммируются и, таким образом, для каждой i-группы ионов определяется время их прилета на фотокатод T_i и энергия, с которой они его бомбардируют E_{k_i} :

$$T_i = \sum_{j=0}^{j=i} T_j; \tag{11}$$

$$E_{k_i} = \frac{MV_i^2}{2}. \tag{12}$$

В случае импульсного питания ЭОП, в момент времени t_{op} на фотокатод ЭОП подается положительный потенциал $\varphi_{ph}(t)$, который описывается функцией

$$\varphi_{ph}(t) = \begin{cases} \varphi_{ph0} & \text{при } 0 \le t < t_{op} + t_{hv} \\ \varphi_{ph} C_f \left(t - t_{op} - t_{hv}\right) & \text{при } t_{op} + t_{hv} \le t < t_{front} \\ \varphi_a & \text{при } t_{front} < t \le t_{pulse} \end{cases} \tag{13}$$

За $t = 0$ принимается время начала засветки фотокатода (с учетом допущения, что все e^- эмитируются одновременно при $t = 0$).

Во временном интервале $0 < t \le t_{op} + t_{hv}$ движение ионов описывается так же, как в случае статического питания.

При $t_{op} + t_{hv} \le t < t_{front}$ в области ЭОП между фотокатодом и сеткой, будет происходить изменение электрического поля по закону:

$$\left|\vec{E}_{ph-grid}\right|(t) = \frac{U_{ph-grid}(t)}{z_{grid} - z_{ph}} = \frac{\varphi_{ph} + C_f \left(t - t_{op} - t_{hv}\right) - \varphi_{grid}}{z_{grid} - z_{ph}}. \tag{14}$$

В это время в области ЭОП между ускоряющей сеткой и анодом, электрическое поле будет оставаться постоянным. Поэтому уравнения движения ионов в ней будут решаться так же, как и для статического режима включения ЭОП.

Для того чтобы определить количество и энергию ионов, дошедших до фотокатода в интервале времени $t \ge t_{op} + t_{hv}$ методом рекурсии решается набор дифференциальных уравнений (10) с учетом того, что в тот момент, когда группа ионов пересекает

сетку $z_j < z_{grid}$, на них начинает действовать изменяющееся во времени электрическое поле (14). Из условия $V_j = 0$ определяются координаты точки остановки ионов таким полем $z_j\left(t_{stop}\right)$.

Для тех групп ионов, которые прошли до поверхности фотокатода, выполняется неравенство $z_j\left(t_{stop}\right) \le 0$. Для этих групп из условия $z_j = 0$, определяется время их движения до поверхности фотокатода T_i и энергия E_{k_i} в момент его бомбардировки.

Таким образом, для случая импульсного включения ЭОП, определяются параметры T_i, E_{k_i} всех групп ионов, дошедших до фотокатода.

Для расчета количества ионов, образованных в процессе движения e^-, вводятся следующие допущения: в процессе пролета e^- испытывает только неупругие столкновения с одинаковыми и неподвижными атомами-мишенями остаточного газа (так как скорость теплового движения ионов пренебрежимо мала по сравнению со скоростью электрона); при столкновении e^- сохраняет первичный импульс и энергию (W_i); температура (T) и давление (P) остаточного газа во всем объеме ЭОП постоянны и равномерно распределены.

Вероятность, с которой электрон ионизует атом в такой модели на i-м шаге расчета его траектории, характеризуется эффективным сечением процесса ионизации σ_i, которое рассчитывается по формуле Резерфорда [5]:

$$\sigma_i = 4\pi a^2 \left(\frac{R}{W_i}\right)^2 \frac{W_i - I}{I}, \qquad (15)$$

где R – постоянная Ридберга, a – Боровский радиус, I – потенциал ионизации атома-мишени.

На каждом i-м шаге e^- совершает неупругие столкновения с частотой v_i [5]:

$$v_i = n\sigma_i V_i = \frac{P}{kT}\sigma_i V_i = \frac{P}{kT}\sigma_i \sqrt{\frac{2W_i}{m}}, \qquad (16)$$

где n – концентрация атомов, k – постоянная Больцмана, V_i – скорость электрона, m – масса электрона.

Следовательно, количество ионов в i-й группе N_i, образованных e^- на i-ом шаге равно:

$$N_i = \frac{P}{kT}\sigma_i \sqrt{\frac{2W_i}{m}}\left(t_i - t_{i-1}\right), \qquad (17)$$

где $\left(t_i - t_{i-1}\right)$ – интервал времени, за который e^- проходит i-й шаг.

Согласно описанному выше алгоритму, рассчитываются распределения количества ионов по времени их движения до фотокатода $N_i(T_i)$ и по энергии, с которой они его бомбардируют $N_i\left(E_{k_i}\right)$. Данные распределения рассчитываются для двух случаев включения ЭОП: статического и импульсного. Распределения нормируются на общее количество ионов, образованных в объеме ЭОП. Это позволяет не учитывать реальное количество фотоэлектронов при сравнении распределений.

В среде Mathcad 13.0 был создан программный код, позволяющий реализовать описанный выше алгоритм математического моделирования ионной бомбардировки фотокатода хронографического ЭОП.

Проведен расчет движения ионов для статического и импульсного питания ЭОП.

При моделировании использовались значения констант, равные экспериментальным: время засветки фотокатода $t_{hv} = 0{,}5$ нс, время сдвига импульса напряжения относительно окончания засветки фотокатода t_{op}, время нарастания фронта затворного импульса $t_{front} = 80$ нс; амплитуда затворного импульса $\left|\varphi_{ph0} - \varphi_a\right| = 11$ кВ.

Из (10) видно, что чем меньше масса иона M, тем быстрее он движется, поэтому при расчетах использовалась масса иона водорода M_{H^+}. В [5] показано как из (15) и (17) следует, что при увеличении I количество образованных e^- ионов снижается. Поэтому при расчетах использовалось значение I для атома цезия, обладающего самым низким потенциалом ионизации, равным 3,9 эВ.

В результате расчета для двух вариантов питания ЭОП были получены следующие нормированные распределения количества ионов, пришедших на фотокатод, по времени их движения до фотокатода (рис. 3) и по энергии, с которой они его бомбардируют (рис. 4).

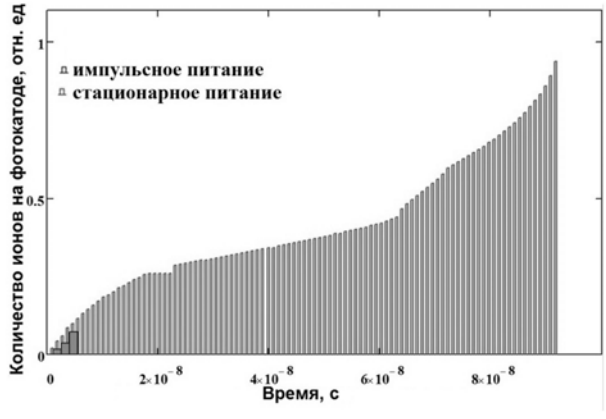


Рис. 3. Гистограмма нормированного распределения количества ионов по времени их движения до фотокатода. Несплошные прямоугольники – расчет для статического режима включения ЭОП. Сплошные прямоугольники – для импульсного

Из рисунков видно, что в случае статического питания, фотокатод ЭОП бомбардируют ионы с энергией, лежащей в диапазоне от 3,7 эВ до 11 кэВ. Среднее значение энергии ионов в этом случае равняется 3000 эВ. При таких параметрах ионов, согласно результатам эксперимента, происходит деградация фотокатода.

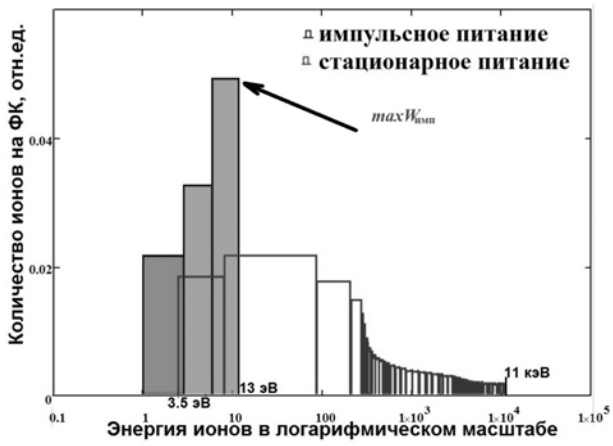


Рис. 4. Гистограмма нормированного распределения количества ионов по энергии, с которой они бомбардируют фотокатода. Значения энергии отложены в логарифмическом масштабе. Несплошные прямоугольники – расчет для статического режима включения ЭОП. Сплошные прямоугольники – для импульсного

В случае импульсного питания ЭОП, на фотокатод приходит менее 13 % ионов, родившихся в объеме прибора. При этом энергия ионов не более 13 эВ. Согласно результатам эксперимента, при таких энергиях ионов деградации фотокатода не происходит.

Используя это значение энергии в качестве критерия, и, зная потенциалы питания конкретного хронографического ЭОП (отличающиеся от ЭОП, участвующего в эксперименте), с помощью разработанной модели ионной бомбрадировки фотокатода можно решить обратную задачу – определить оптимальные параметры затворного импульса, при которых не будет происходить деградация фотокатода ЭОП.

Таким образом, в результате данной работы построена модель, которая позволяет, зная потенциалы питания конкретного хронографического ЭОП, определить режим его импульсного включения, исключающий деградацию фотокатода ЭОП. В дальнейшем нами планируется разработка програмного алгоритма, автоматизирующего такой расчет.

Литература

1. Соколов А. Ю. , Коновалов П. И. Разработка методики ускоренных испытаний хронографических электронно-оптических преобразователей: базовые положения // Приборы и техника эксперимента. 2016. № 4. С. 1–4.

2. Sen P., Pickard D. S., Schneider J. E., and all Lifetime and reliability results for a negative electron affinity photocathode in a demountable vacuum system // J. Vac. Sci. Technol. B. Nov/Dec 1998. P. 3380.

3. Пономаренко Н. С., Калажоков З. Х., Калажоков Х. Х., Чернявский В. А. О некоторых причинах деградации фотокатодов. Нальчик: КБГУ, 1998.

4. Соколов А. Ю., Коновалов П. И., Шлыгин А. С., Нуртдинов Р.И., Викулин М.П. Исследование вклада ионной бомбардировки в деградацию фотокатода хронографического ЭОП / Конференция «Методы и средства физических измерений» // Сборник материалов. Москва, 2019.

5. Соколов А. Ю. , Коновалов П. И., Спахов А. В., Прянишников И. Г., Шевчик А. В. Алгоритм расчета основных параметров хронографических электронно-оптических преобразователей, на основе трехмерного моделирования их электронно-оптических систем / Конференция. «Методы и средства физических измерений» // Сборник материалов. Москва, 2019.

6. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987.

О МЕХАНИЗМЕ ДЕТОНАЦИИ ВЗРЫВЧАТЫХ СМЕСЕЙ ТЭНА С ГИДРОКАРБОНАТОМ НАТРИЯ

И. А. Спирин, Д. А. Пронин, Е. С. Митин, В. Г. Симаков, В. А. Брагунец, А. В. Цветков, Е. Е. Шестаков, Ю. М. Сустаева, О. В. Шевлягин, С. А. Вахмистров

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

К настоящему времени в ИФВ «РФЯЦ-ВНИИЭФ» разработано смесевое взрывчатое вещество (ВВ), в котором используются высокодисперсный тэн (ВДТ), и гидрокарбонат натрия ($NaHCO_3$) в массовом соотношении 35 %/ 65 % соответственно [1, 2]. Это ВВ обладает уникальным свойством: при наличии большого количества инертной добавки, оно способно детонировать с малой скоростью $D \approx 2$ км/с ($\rho \approx 0{,}7$ г/см^3) в слое толщиной ≈2 мм, что может не укладываться в рамки классической модели детонации Зельдовича-Неймана-Деринга, согласно которой передача детонации от слоя к слою ВВ обусловлена распространением ударной волны.

Для малоплотных ВВ широкое распространение получили представления о том, что разложение ВВ инициируется на поверхности частиц горячими продуктами реакции и нагретым при сжатии воздухом, заполняющими поры. Такой механизм был качественно описан и назван А. Я. Апиным «взрывным горением» или «струйно-пробойным» [3].

Выяснение механизма детонации малоплотных смесевых ВВ ВДТ/$NaHCO_3$, представляет актуальную научную и научно-практическую задачу, поскольку назначения их в настоящее время – использование для прецизионной сварки взрывом тонких (≤2 мм) слоев металлов.

В литературе известно существование квазистационарных низкоскоростных режимов детонации (НСД) в индивидуальных бризантных ВВ насыпной плотности [4]. В таких системах на поддержку НСД тратится малая часть химической энергии ВВ (до 20 %), – остальное ВВ «инертно», и в зависимости от физико-химических свойств может существовать два механизма передачи детонации от слоя к слою: газовой фазой (концепция взрывного горения), твердой фазой (ударно-волновое сжатие).

По сути, исследуемые нами смеси ВДТ/$NaHCO_3$, являются низкоскоростными. С тем отличием, что окружение ВВ является действительно инертным, что делает возникающие режимы детонации более устойчивыми, чем в индивидуальных ВВ.

В работах [5], [6], посвященных исследованию детонации сильноразбавленных ВВ, обнаружены режимы детонации, распространяющиеся посредством ударно-волнового сжатия, в профилях которых, в большинстве случаев авторы регистрировали химпик.

Отметим, что в работе [7] при исследовании взрывчатого состава тэн/SiC, получены данные, указывающие на возможность существования различных режимов детонации смеси в зависимости от содержания добавки. При малом содержании ВВ (до 15 %), частицы добавки контактируют между собой и защищают ВВ от воздействия ударной волны (УВ); детонация передается конвективно, струями продуктов взрыва (ПВ). При большем содержании ВВ процесс ведется ударной волной.

В данной работе с помощью радиоинтерферометрического [8–10], электронно-оптического (NANOGATE-22) [11] методов и метода ПВДФ-датчика давления [12, 13] исследована детонация взрывчатых смесей тэна с гидрокарбонатом натрия (пищевой содой) с массовой долей последнего от 0 до 90 %.

Авторы выражают благодарность ведущему научному сотруднику ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» В. М. Бельскому за обсуждение результатов работы и ценные указания.

Объект исследований

Объектом исследований являлись малоплотные взрывчатые смеси высокодисперсного тэна с гидрокарбонатом натрия ($NaHCO_3$) с различными массовыми долями (α, %) последнего.

Основные характеристики исследуемых ВВ представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики исследуемых ВВ

α, %	Удельная поверхность ($S_{уд}$), см^2/г		ρ, г/см^3	D, м/с
	тэн	$NaHCO_3$		
0	≈4500	–	0,37	3300
65		≈660	0,7	2060
75			0,82	1720
85			0,92	1410
90			0,99	1130

Распространение детонации в смесях ВДТ/$NaHCO_3$

Постановка опытов

Исследования проводились с использованием электронно-оптического комплекса NANOGATE 2000, основой которого является высокоскоростная восьмиканальная камера НАНОГЕЙТ-22 с частотой съемки до 10^9 кадр/с [9], позволяющая получать фотоснимки с временем экспозиции от 5 нс и с пространственным разрешением 30 пар лин/мм.

Исследовали:

– смеси ВДТ/$NaHCO_3$, α, равная 0, 65, 85, 90 % насыпной плотности;

– прессованные ВВ ВДТ/$NaHCO_3$, α = 65 %, ρ ≈ 1,82 г/см^3 и ВДТ ρ ≈ 1,7 г/см^3.

С помощью ЭОК NANOGATE 2000 осуществлялось фотографирование процесса распространения детонации по схеме, представленной на рис. 1.

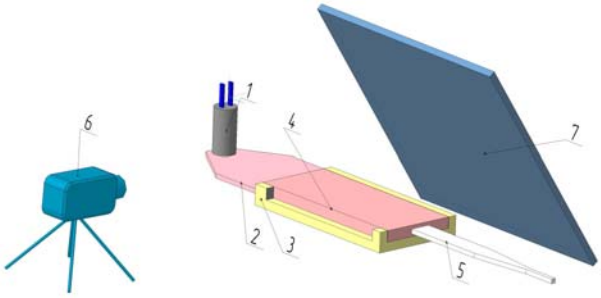


Рис. 1. Схема постановки опытов: 1 – ЭД; 2 – ПВВ; 3 – планка из пенопласта; 4 – исследуемое ВВ; 5 – плоский облучатель радиоинтерферометра; 6 – НАНОГЕЙТ-22; 7 – зеркало

Фотографирование осуществлялось либо верхней поверхности заряда с помощью зеркала, либо боковой поверхности (напрямую). В одном из опытов, вместе с фоторегистрацией применялся радиоинтерферометрический метод, с помощью которого велась регистрация движения детонационной волны по заряду из ВВ. Для этого использовали радиоинтерферометр ПРИ-03 с длинной волны 3,2 мм производства филиала РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю. Е. Седакова» г. Нижний Новгород.

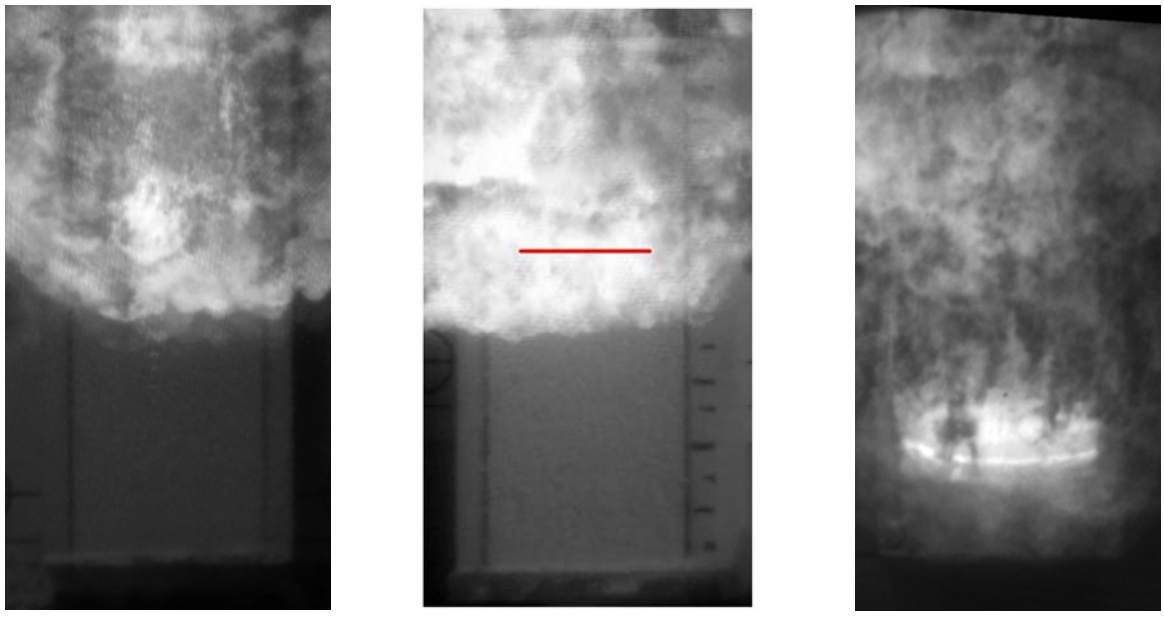
ВВ насыпной плотности размещали в планки из пенопласта (ρ = 0,4 г/см^3) с полостью шириной 30 мм, высотой L мм, длиной 110 мм, толщина стенок планки – 4 мм. Инициирование исследуемых ВВ осуществляли путем подвода детонации пластическим ВВ на основе тэна (ПВВ).

Результаты

Первые результаты были получены при регистрации детонации на верхней поверхности заряда. Некоторые из полученных фотоснимков представлены на рис. 2.

Как видно из рис. 2 на снимке, полученном для индивидуального ВВ (2в, α=0%), зафиксировано опережение продуктами взрыва детонационного фронта. По всей видимости, из-за подобного опережения не удалось идентифицировать фронт детонационной волны (ДВ) в опытах с α = 85 и 65 %.

Опережение ПВ может осуществляться двумя способами:



а б в

Рис. 2. Фотоснимки области детонационного фронта в экспериментальных сборках (горизонтальной линией указано положение детонационного фронта, согласно записи РИФ методом): а – α = 85 %, L = 12 мм; б – α = 65 %, L = 15 мм; в – α = 0 %, L = 10 мм

– путем конвекции ПВ из зоны повышенных давлений в поры впереди лежащего вещества;

– путем истекания ПВ в окружающую атмосферу под углом к поверхности ВВ.

Второй способ схематично изображен на рис. 3.

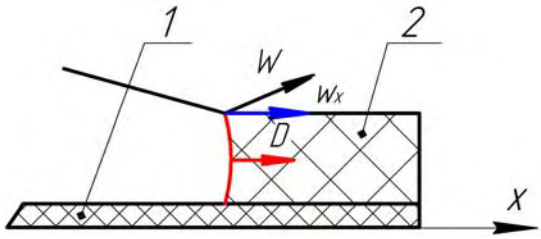


Рис. 3. Возможный путь опережения ПВ детонационного фронта: 1 – планка; 2 – ВВ; *D* – направление распространения ДВ; *W* – направление распространения ПВ

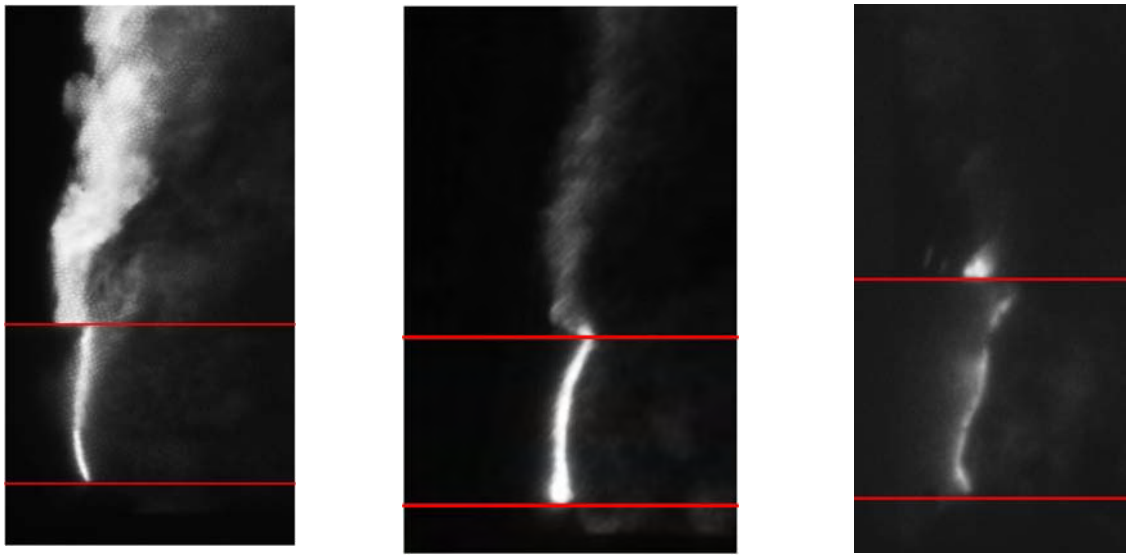
Одним из основных положений о «взрывном горении» является экспериментальный факт истекания со свободной поверхности ВВ ПВ, имеющих скорость большую, чем скорость детонации. Поэтому эффект опережения ПВ фронта вблизи боковой поверхности слоя ВВ вполне реализуем.

Для проверки этого предположения проведен опыт по схеме, приведенной на рис. 1, при этом вместе с электронно-оптическим методом был применен радиоинтерферометрический метод, позволяющий регистрировать *x-t* диаграммы положения фронта ДВ. Исследовали ВВ ВДТ/$NaHCO_3$, α = 65 %, *L* = 15 мм. Опыт показал, что отражение сигнала от детонационного фронта происходит за опережающим ПВ, и отстает от них на 10–12 мм (см. рис. 2б), а пересжатый режим детонации, реализующийся из-за использования в качестве инициатора ПВВ, затухает на расстоянии ~10 мм от места инициирования.

Вторая серия опытов проводилась при регистрации боковой поверхности заряда. Исследовали ВВ ВДТ/$NaHCO_3$, α, равной 0, 65, 85, 90 %, насыпной плотности. Некоторые из полученных фотоснимков представлены на рис. 4.

Как видно из рис. 4, ПВ действительно опережают детонационный фронт над поверхностью заряда для всех исследованных ВВ. Данный эффект не исчезает, если поставить на пути ПВ преграду (пенопласт, сталь), при подпрессовки заряда до ≈1,25 $\rho_{насып}$, или при использовании вместо планок из пенопласта бумажные. Исследование прессованных составов ($\rho > 1{,}8$ г/см^3, $\alpha = 65$ %, $\alpha = 0$ %) показало отсутствие опережения ПВ детонационного фронта. Как и ожидали авторы, уменьшение газопроницаемости при прессовании зарядов из ВВ препятствует фильтрации ПВ из зоны повышенных давлений вглубь ВВ. При детонации прессованных ВВ наблюдаются классические изображения разлета продуктов взрыва.

При детонации смеси с α = 85 % зарегистрирован сильно искривленный фронт (см. рис. 4в). При фотографировании смеси с α = 90 % не было зарегистрировано детонационного фронта, на снимках видны слабосветящиеся продукты взрыва. По всей видимости, по мере увеличения массовой доли $NaHCO_3$ режим распространения детонации посредством ударного сжатия становится менее устойчивым, а при α = 90 % на смену ему приходит режим, распространение которого, обусловлено проникающими в глубь ВВ продуктами взрыва.



а б в

Рис. 4. Фотоснимки детонационного фронта на боковой поверхности заряда (распространение детонации справа налево; горизонтальными прямыми отмечены границы заряда ВВ): а – α = 0 %, *L* = 16 мм; б – α = 65 %, *L* = 16 мм; в – α = 85 %, *L* = 20 мм

Измерение профилей давления детонационной волны ВВ ВДТ/$NaHCO_3$

Качественно по виду профиля давления или массовой скорости ДВ можно судить о реализующихся режимах детонации ВВ. Необходимым атрибутом реализации модели ЗНД является выраженный спад параметров за фронтом ударной волны и классический «треугольный» профиль. Признаками «неклассического» детонационного режима являются плавное нарастание параметров во фронте волны, наличие «предвестника» и отсутствие химпика [14].

Постановка опытов

Для регистрации профилей давления детонационной волны применен метод пьезоэлектрического ПВДФ-датчик давления [12, 13]. Временное разрешение датчика в зависимости от величины воздействующего на него давления составляет от 1 до 15 нс [13, 15].

Датчик позволяет регистрировать амплитуду динамического давления от $7{,}2 \cdot 10^{-6}$ до 36 ГПа, при этом относительная погрешность ее определения оценивается как 10 % [13].

Исследовались ВВ ВДТ/$NaHCO_3$, $\alpha = 65$ %, 75 %, 85 %, 90 % плотности близкой к насыпной.

Схема экспериментальной сборки приведена на рис. 5.

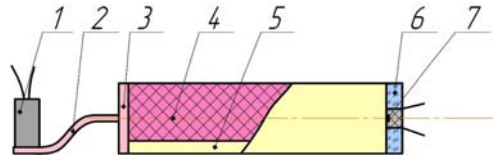


Рис. 5. Схема экспериментальной сборки по определению профилей давления детонационной волны: 1 – ЭД; 2, 3 – пластина из ПВВ; 4 – исследуемое ВВ; 5 – планка из пенопласта; 6 – оргстекло; 7 – ПВДФ-датчик

ВВ размещали в планки из пенопласта *5* с полостью шириной 33 мм, длиной 80 мм, и высотой 33 мм. Толщина стенок планки – 4 мм. Инициирование исследуемых ВВ *4* осуществляли путем подвода детонации пластиной из ПВВ 30×2×50 мм *2*. Для измерения профиля давления на границе ПВ-фторопласт использовался торцевой ПВДФ-датчик *7*.

Непосредственно в опытах при приложении к ПВДФ-датчику механического давления, вызванного воздействием ударного сжатия и/или ПВ, регистрируется генерируемый ПВДФ-датчиком электрический сигнал (сила тока).

Путем интегрирования осциллограмм тока получают зависимости давления от времени.

Результаты

Некоторые из полученных профилей давления на границе ПВ-ПВДФ-датчик представлены на рис. 6.

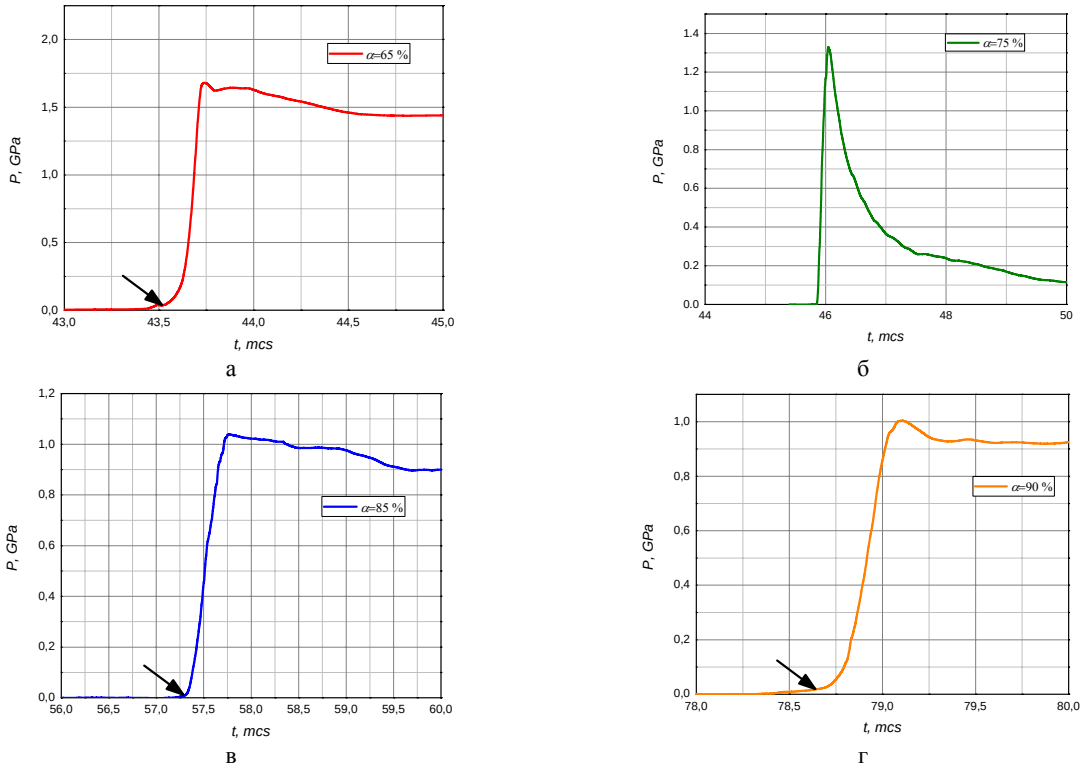


Рис. 6. Профили давления на границе ПВ-ПВДФ-датчик: а – ВВ ВДТ/$NaHCO_3$, $\alpha = 65$ %; б – $\alpha = 75$ %; в – $\alpha = 85$ %; г – $\alpha = 90$ %

Как видно из рис. 6, только один профиль имеет треугольный вид (см. рис. 6б). В остальных наблюдается немонотонное поведение давления за фронтом детонационной волны, а также ярко выраженный «предвестник» (показан на рис. 6а, 6б и 6в черной стрелкой). Наличие «предвестника», по всей видимости, связано с записью датчиком давления от струй ПВ, распространяющихся впереди фронта ударного сжатия.

Полученные результаты указывают в данном случае на реализацию двухфазного «неклассического» режима детонации [16].

Следует отметить, что результаты опытов оказались не всегда воспроизводимыми и, по всей видимости, регистрация в данной поставке классического треугольного профиля или признаков «неклассического» режима носит случайный характер и определяется флуктуациями засыпки ВВ. Именно этим объясняется полученный треугольный профиль для ВВ с $\alpha = 75$ %.

В таб. 2 представлены времена нарастания фронта ($\Delta\tau$, нс) профилей давления, приведенных на рис. 6. За время нарастания фронта принималась разность между значением времени при давлении в 90 и 10 % от максимального значения давления (P_{max}, ГПа).

Таблица 2

Времена нарастания фронта ударного сжатия

α, %	P_{max}, ГПа	Δτ, нс
65	1,68	100
75	1,33	140
85	1,05	270
90	1,02	280

Из табл. 2, видно, что с увеличением массовой доли $NaHCO_3$ в смеси время нарастания фронта ударного сжатия увеличивается и доходит до значения 280 нс. Данный экспериментальный факт указывает на ослабление роли ударного сжатия в передаче детонации при увеличении массовой доли $NaHCO_3$.

Представленные результаты по определению профилей ДВ отражают сильную неоднородность и сложность процессов, происходящих при детонации ВВ ВДТ/$NaHCO_3$, 65 % $\leq \alpha \leq$ 90 % и не могут дать однозначного ответа о ведущей роли процесса в механизме распространения детонации.

Передача детонации ВВ ВДТ/$NaHCO_3$ через преграды

Для определения роли в процессе передачи детонации, проникающих в глубь ВВ продуктов взрыва, проведены опыты по передачи детонации через преграды.

Постановка экспериментов

Объектом исследований являлись ВВ ВДТ/$NaHCO_3$, α, равной 65, 75, 85, 90 %. Схема экспериментальной сборки представлена на рис. 7.

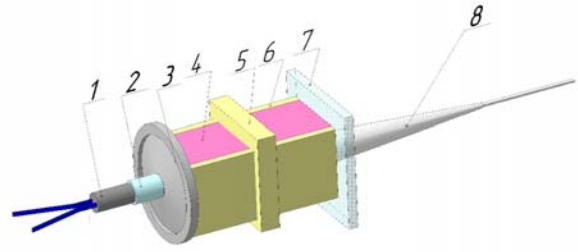


Рис. 7. Схема экспериментальной сборки передачи детонации ВВ через преграду: 1 – ЭД; 2 – промежуточный инициатор ВВ; 3 – генератор плоской УВ; 4 – активный заряд ВВ; 5 – преграда; 6 – пассивный (исследуемый) заряд ВВ; 7 – диэлектрический волновод

ВВ размещали в планки из пенопласта с полостью шириной 33 мм, длинной 40 мм, и высотой 33 мм. Толщина стенок планки – 4 мм.

Инициирование исследуемого ВВ *6*, рис. 7, осуществлялось генератором плоской ударной волны *3*. Пенопластовые преграды *5*, ρ = 0,4 г/см^3, представляющие собой параллелепипеды с размерами 50×50×*R* мм использовались в двух вариантах: сплошные преграды и преграды с просверленными сквозными отверстиями по всей поверхности контакта преграды с ВВ. Сплошные преграды служили для формирования инициирующей УВ. Преграды с перфорациями позволяли проникать ПВ активного заряда *4* в пассивный *6* и тем самым инициировать его.

Все стадии распространения волновых процессов регистрировали с помощью радиоинтерферометра.

Типичная интерферомграмма, зарегистрированная в одном из опытов, представлена на рис. 8.

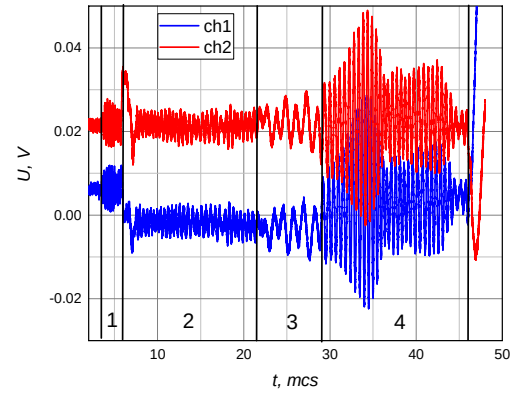


Рис. 8. Интерферограмма передачи детонации ВВ ВДТ/$NaHCO_3$, α = 65 % через сплошную преграду: 1 – детонация генератора плоской УВ; 2, 4 – детонация ВВ; 3 – движение УВ в преграде и в ВВ

Путем обработки экспериментальных интерферограмм, получены *x-t* диаграммы возбуждения детонации. По их характерному излому определяли глубину возбуждения детонации ВВ (*H*, мм). Пример

выбора значения глубины возбуждения детонации в ВВ ВДТ/$NaHCO_3$, α = 65 % приведен на рис. 9.

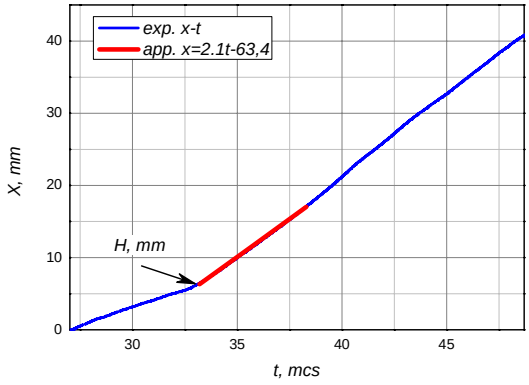


Рис. 9. *X-t* диаграмма возбуждения детонации ВВ ВДТ/$NaHCO_3$, α = 65 % через сплошную преграду

Результаты

Результаты опытов представлены в таб. 3.

Таблица 3

Результаты опытов по передаче детонации через преграды

№ опыта	α, %	Преграда	Глубина возбуждения детонации, мм
1	65	Сплошная, *R* = 8 мм	4,4±0,5
2			4±0,4
3		С перфорациями, *R* = 8 мм, 25 отв. ∅1,8 мм	7,1±0,6
4			6,6±0,6
5	75	Сплошная, *R* = 7 мм	5,2±0,6
6			4,6±0,6
7	75	С перфорациями *R* = 7 мм, 25 отв. ∅1,8 мм	6,2±0,7
8			5,9±0,6
9	85	Сплошная, *R* = 6 мм	5,3±0,4
10			5,1±0,5
11		С перфорациями *R* = 6 мм, 25 отверстий ∅1,8 мм	8,9±0,8
12			8,2±0,8
13	90	Сплошная, *R* = 4 мм	Нет возбуждения детонации
14			
15		С перфорациями, *R* = 4 мм, 16 отв. ∅2 мм	Есть передача детонации
16			

Как видно из табл. 3, глубина возбуждения детонации для ВВ ВДТ/$NaHCO_3$, α, равной 65, 75, 85 % несколько больше (2–4 мм) при использовании перфорированных преград, что может быть связанно либо с ослабляющим влиянием отверстий на инициирующую УВ, либо инициированием ПВ. В данном случае, детонация передается, в основном, посредством ударного сжатия.

Из-за слабого сигнала, зарегистрированного в опытах для ВВ ВДТ/$NaHCO_3$, α = 90 % не удалось определить глубину возбуждения. Однако, сигнал достаточный для того, чтобы судить о стационарности переданной детонации. Детонация не передается при использовании сплошных преград, при замене преграды на перфорированные детонация передается инициирующими ВВ продуктами взрыва.

Заключение

С помощью электронно-оптической комплекса НАНОГЕЙТ-22 обнаружен эффект опережения детонационного фронта продуктами взрыва, истекающими под углом к поверхности заряда индивидуальных насыпных ВВ (тэн, ВДТ) и смесевых ВДТ/$NaHCO_3$ в интервале 65 % ≤ α ≤ 90 %. При фотографировании ВВ ВДТ/$NaHCO_3$, α = 85 % зарегистрирован сильно искривленный фронт ДВ, с уменьшением массовой доли $NaHCO_3$ детонационный фронт не наблюдается, видны слабосветящиеся ПВ.

С применением ПВДФ-датчика давления получены профили давления на границе ПВ-датчик. В большинстве опытов наблюдаются «неклассические» (отличные от треугольных) профили давления с немонотонным изменением давления за фронтом. Зарегистрированы «предвестники», связанные с действием на датчик струй продуктов взрыва. Показано, что с увеличением массовой доли $NaHCO_3$ возрастает время нарастания фронта ударного сжатия.

С помощью радиоинтерферометрического метода установлено, что в интервале 65 % ≤ α ≤ 85 % детонация передается, в основном, посредством ударного сжатия, а при α = 90 % детонация передается преимущественно продуктами взрыва.

Таким образом, с помощью трех различных методов исследования показано, что по мере увеличения массовой доли $NaHCO_3$ режим распространения детонации посредством ударного сжатия становится менее устойчивым, а при α = 90 % на смену ему приходит режим, распространение которого обусловлено проникающими в глубь ВВ продуктами взрыва. По всей видимости, массовая доля ВВ $NaHCO_3$, α = 85 % близка к критической для распространения детонации посредством ударного сжатия (при дальнейшем увеличении массовой доли $NaHCO_3$ детонация передается, в основном, струями продуктов взрыва).

Литература

1. Андреевских Л. А., Дерибас А. А. и др. Перспективное ВВ для сварки взрывом тонких металлических фольг // Международная конференция «XIII Харитоновские научные тематические чтения». Сборник тезисов. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2011. С. 89–92.

2. Андреевских Л. А., Дроздов А. А., Михайлов А. Л., Самароков Ю. М., Скачков О. А., Дери-

бас А. А. Исследование возможности создания сваркой взрывом биметаллических композиционных материалов высокожаростойкая порошковая сталь-медь // Сталь. 2015. № 1. С. 84–87.

3. Апин А. Я. О детонации и взрывном горении взрывчатых веществ // ДАН СССР. 1945. Т. L, № 9. С. 285–287.

4. Ермолаев Б. С., Сулимов А. А. Конвективное горение и низкоскоростная детонация пористых энергетических материалов. М.: ТОРУС ПРЕСС, 2017.

5. Шведов К. К., Анискин А. И., Ильин А. Н., Дремин А. Н. Исследование детонации сильноразбавленных пористых ВВ. I. Влияние инертной добавки на параметры детонации // ФГВ. 1979. № 3. С. 92–101.

6. Шведов К. К., Анискин А. И., Ильин А. Н., Дремин А. Н. Исследование детонации сильноразбавленных пористых ВВ. II. Влияние инертной добавки на структуру фронта, параметры и время реакции // ФГВ. 1981. № 1. С. 79–90.

7. Ершов А. П., Иванов П. И., Андреев В. В. Детонация сильноразбавленного ВВ // ФГВ. 1993. № 3. С. 124–130.

8. Невозмущающие методы диагностики быстропротекающих процессов. Монография под редакцией А. Л. Михайлова. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2015. С. 218–254.

9. Баталов С. В., Филин В. П., Шапошников В. В. Радиоволновой метод исследования физических явлений и химических превращений в гетерогенных ВВ под действием УВ // ФГВ. 1991. Т 27, № 6. С. 107.

10. Бельский В. М., Михайлов А. Л., Родионов А. В., Седов А. А. Микроволновая диагностика ударноволновых и детонационных процессов // ФГВ. 2011. № 6. С. 29–41.

11. Электронно-оптическая восьмиканальная камера НАНОГЕЙТ-22. Руководство по эксплуатации. М., 2012.

12. Борисенок В. А., Симаков В. Г., Брагунец В. А., Куропаткин В. Г. и др. ПВДФ-датчик динамического давления: физическая модель и результаты экспериментов // ФГВ. 2003. № 5. С. 109–115.

13. Борисенок В. А., Симаков В. Г., Куропаткин В. Г., Брагунец В. А. и др. ПВДФ-датчик динамического давления // Приборы и техника эксперимента. 2008. № 4. С. 113–121.

14. Ершов А. П., Рубцов И. А. О детонации низкоплотных взрывчатых веществ // ФГВ. 2019. № 1. С. 128–135.

15. Bauer F. PVDF shock compression sensors in shock wave physics. Proc. Of Shock Compression in Condensed Matter. 2003. P. 1121–1124.

16. Андреев В. В., Ершов А. П., Лукьянчиков Л. А. Двухфазная низкоскоростная детонация пористого ВВ // ФГВ. 1983. № 3. С. 89–93.

ЛАЗЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШИТЕЛЬНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ НА РАЗЛИЧНЫЕ АСТЕРОИДЫ

Е. Ю. Аристова, И. А. Белов, А. Ю. Воронин, В. Н. Деркач, А. В. Золотовский, А. А. Краюхин, М. Г. Кузин, В. А. Мазанов, Н. С. Мальцева, В. Г. Рогачёв, А. В. Сиренко, Ю. В. Скорочкин, П. В. Стародубцев, С. Н. Стёпушкин, Н. А. Суслов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Угроза пересечения орбит крупных тел с траекторией движения Земли вполне предсказуема, и потенциально опасные объекты в настоящее время активно регистрируются [1].

Перспективным способом защиты является разрушение астероида за счет действия мощных ударных волн. Для его реализации предлагается использовать энергию ядерного взрыва (ЯВ) на поверхности астероида. Эта идея высказывалась ранее Эдуардом Теллером и другими разработчиками ядерного оружия, как в США, так и в СССР [2].

Данная работа посвящена экспериментальному моделированию процессов взрывного разрушения астероидов на основе принципа физического подобия [3]. Воздействие ЯВ на астероид имеет характер точечного (заряд диаметром ≈1 м к астероиду диаметром 200 м) и кратковременного удара (время воздействия много меньше времени прохождения ударной волны через него).

Многочисленная статистика падений метеоритов на Землю позволила определить, размер объектов, не наносящих критического урона. Например, каменный астероид хондритного типа Челябинск имел начальные размеры около 17 метров и скорость около 19 км/с, но при прохождении атмосферы он распался и поверхности Земли достигла лишь небольшая часть осколков с существенно меньшей скоростью, которые уже не представляли критической угрозы.

Одним из способов моделирования воздействия ЯВ на астероид является облучение импульсом лазерного излучения (ЛИ) миниатюрного макета астероида. Короткая длительность (≈2–4 нс), возможность фокусировки ЛИ в малое пятно (≈100–150 мкм), приемлемая энергия импульса и отсутствие дополнительной привносимой массы делают такой способ моделирования наиболее конкурентоспособным.

Если изготовить из определенного вещества миниатюрный макет с характерным элементным составом, плотностью, прочностью (на сжатие и растяжение) и соответствующей астероиду структурой [4], и осуществить на его поверхности точечный короткий удар большой интенсивности (импульс ЛИ), то процессы распространения ударной волны в таком макете и процессы разрушения будут подобны тем, что имеют место при ЯВ на поверхности натурального астероида [5].

Важно соблюдать структурное подобие в спектре крупных осколков: если астероид имеет диаметр 200 м, а его мини-макет – диаметр 4 мм, то после разрушения фрагментам астероида размером в 20 м натурной ситуации будут соответствовать осколки макета размером в 400 мкм. То есть, необходимо, чтобы в макете отсутствовали вкрапления, имеющие размеры больше 400 мкм и прочность большую, чем у самого макета.

Вторым важным условием подобия является обеспечение равенства характерных давлений в модельном и натурном эксперименте на начало ударноволновой стадии процесса. Это приближенно соответствует равенству отношения энергии ЯВ к массе астероида и отношения энергии ЛИ к массе моделирующего микро-макета [5]. В случае камуфлетного взрыва данное требование является точным. Однако, в случае взрыва на поверхности оно имеет приближенный характер. Это обусловлено отсутствием подобия процессов переноса энергии на начальной высокотемпературной стадии и требует введения соответствующего поправочного коэффициента.

Цель данной работы состояла в:

- проведении сопоставительных расчетов воздействия ЯВ на астероид и воздействия импульса ЛИ на макет; определении поправочного коэффициента k в соотношении энергетического баланса, компенсирующего разницу в процессах переноса энергии;
- разработке технологии изготовления мини-макетов различных астероидов с определёнными характеристиками, контроле их параметров;
- проведении экспериментов с целью определения зависимости характера разрушения мини-макетов астероидов от свойств материала, формы макетов и условий выделения энергии.

Теоретические расчеты

Для обоснования применения ЛИ для моделирования ЯВ на поверхности астероида в ИТМФ РФЯЦ-ВНИИЭФ проведена серия сравнительных расчетов при различных условиях энерговыделения как на астероиде, так и на мини-макете.

Произведены расчеты воздействия импульса лазерного излучения с энергией $q_1 = 200$ Дж на поверхность шарообразного макета каменного астероида диаметром $d_1 = 4$ мм и контактного ЯВ мощностью $q_2 = 6$ Мт на шарообразный каменный астероид диаметром $d_2 = 200$ м [6]. Значения энергии воздействия и размер нагружаемых тел выбирались из соотношения энергетического подобия $d_1/q_1^{1/3} = d_2/q_2^{1/3}$.

В расчётах учитывался широкий круг физических процессов. Одновременно с численным решением уравнений газовой динамики проводился расчет электронной и ионной теплопроводности, электрон-ионной температурной релаксации, расчет лучистой теплопроводности и ряда других процессов [3].

Расчётные значения массовой скорости и давления в ударной волне при ЯВ на астероиде оказались примерно в два раза выше, чем при облучении импульсом ЛИ макета. То есть при заданных уровнях энергии и химическом составе объектов энергия ЯВ эффективней преобразуется в ударную волну. Таким образом, поправочный коэффициент k был принят равным 1/2 и в дальнейшие расчеты введено соответствующее изменение в значения энергии ЯВ ($q_2^* = 1/2\ q_2$).

Необходимо отметить, что величина поправки определяется достаточно точно, несмотря на то, что макет от астероида по объёму и массе отличается на четырнадцать-пятнадцать порядков. Например, для воздействия контактного ЯВ мощностью $q_2^* = 7{,}45$ Мт на железно-никелевый астероид диаметром $d_2 = 150$ м и воздействия импульса ЛИ мощностью $q_1 = 500$ Дж на шарообразный макет диаметром $d_1 = 3$ мм разница в амплитудах массовой скорости и приведенного давления не превышала 10 %.

В дальнейшем, для изучения влияния формы астероида и его макета на подобие в протекающих процессах проведены следующие численные расчеты:

– воздействия импульса ЛИ мощностью $q_1 = 600$ Дж на эллипсовидный (вытянутый сфероид) макет астероида с размером осей $a_1 = 6$ мм и $b_1 = 3$ мм при фокусировке излучения на полюсе макета и воздействия контактного ЯВ мощностью $q_2^* = 7{,}45$ Мт на эллипсовидный хондритный астероид с размером осей $a_2 = 300$ м и $b_2 = 150$ м при воздействии ЯВ на полюсе астероида;

– воздействия импульса ЛИ мощностью $q_1 = 200$ Дж на имитатор астероида в виде конуса с диаметром основания $d_1 = 5$ мм и высотой $h_1 = 5$ мм (на основание и вершину конуса) и воздействия контактного ЯВ мощностью $q_2^* = 3$ Мт на полномасштабный астероид в виде конуса с диаметром основания $d_2 = 250$ м и высотой $h_2 = 250$ м (на основание и вершину конуса).

Для всех исследованных форм астероидов (шар, эллипсоид, конус), получены зависимости массовой скорости U и давления P от приведенного времени ($t \cdot C/d$, где C – скорость звука в материале, а d – диаметр объекта) в точках наблюдения в системе приведенных координат (x/d, y/d). Они близки как по амплитуде, так и по форме волны сжатия во всем объеме нагружаемого тела.

Например, на рис. 1 приведены полученные зависимости давления в центре шаровидного каменного астероида и его макета.

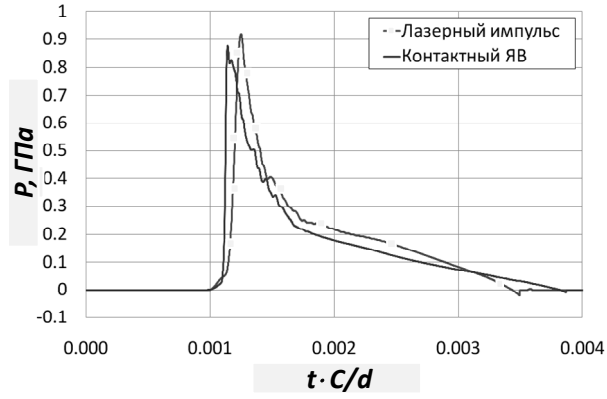


Рис. 1. Зависимости давления от безразмерного времени в центре шаровидных объектов

Таким образом, расчетно подтверждена возможность воспроизведения в лазерных экспериментах качественных и количественных особенностей течения среды, возникающего при контактном ядерном взрыве.

Расчёты также позволяют выбрать наиболее оптимальное место воздействия на макет и астероид при усложнении их формы. На рис. 2 приведены зависимости давлений в центре конусовидного макета (на полувысоте перпендикуляра, опущенного из вершины конуса на основание) при фокусировке импульса ЛИ на вершине и на основании конуса.

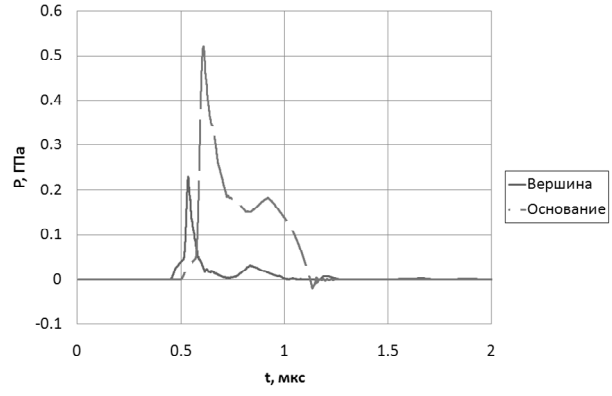


Рис. 2. Зависимости давления в центре конуса от времени при разном положении источника энерговыделения

Эксперименты по разрушению конусовидных и эллипсовидных макетов, а также эксперименты по имитации «заглубленных» взрывов подтвердили этот вывод.

Создание макетов

Каменные (хондритные) астероиды, составляющие подавляющее большинство космических объектов (92,5 %), падающих на поверхность Земли. За исходные данные при изготовлении материала для их мини-макетов взяты характеристики Челябинского метеорита [7].

Путём смешивания порошков определенной дисперсности, химического состава и плотности, их прессования и нагрева при разных давлениях и температурах имитирован естественный процесс долговременного формирования реальных каменных астероидов.

Таким способом получены несколько партий образцов материала с прочностью на сжатие от 6,5 до 134,1 МПа [3]. Результат испытания на прочность на сжатие одного из образцов представлен на рис. 3. Данные образцы имели прочность 22,5 МПа, что наиболее соответствует натуральному астероиду.

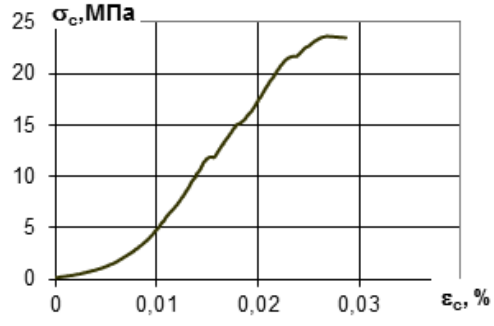


Рис. 3. Результаты испытания на сжатие образцов, изготовленных при давлении 3,5 МПа и температуре 1000 °С

Размеры прочных частиц в этой партии составляли от 10 до 125 мкм. В ходе испытаний на растяжение разрушение образца произошло при нагрузке ≈0,95 МПа. Плотность образцов варьировалась от 2,3 до 2,5 г/см^3, что несколько ниже плотностей, характерных для натуральных хондритных астероидов.

Различные теории образования ядер комет подразумевают, что структура ядра варьируется от относительно разреженного «снежного кома» до плотного «конгломерата льдов и камней». Соответствующая им плотность может составить от 0,1 г/см^3 до 1,5 г/см^3 (с учетом вкрапления других материалов) [1]. Для моделирования комет использовался обычный водяной лед плотностью 0,9 г/см^3.

Макет представлял собой сплошной шаровидный кусок льда, формируемый на конце медного стержня в вакуумной камере. Другой конец медного стержня помещался в термостат, как показано на рис. 4. Равновесные значения температуры и давления, а также сохранность конфигурации льда поддерживались балансом скорости испарения льда, скоростью откачки паров, охлаждением поверхности льда при испарении и притоком тепла за счет теплопроводности. Давление насыщенных паров воды в вакуумной камере составило 0,04 Торр, что соответствует температуре льда минус 20 °С, с прочностью на сжатие ≈ 4,0–5,0 МПа [8].

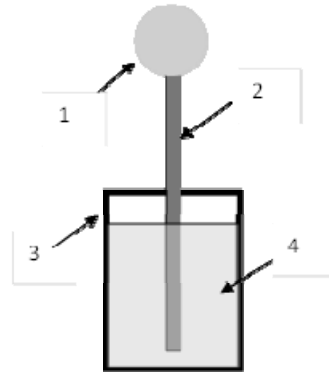


Рис. 4. Схема крепления ледяного макета: 1 – макет диаметром 10 мм; 2 – медный стержень; 3 – сосуд из фторопласта; 4 – термостат со льдом

Для моделирования вещества железокаменного астероида использовался белый чугун с плотностью 4,2 г/см^3. Его прочность на сжатие составляет от 280 до 320 МПа. Это почти на порядок превосходит прочность каменных хондритов и занимает промежуточное место между материалами каменных и железных астероидов [4].

Наиболее прочными телами, падающими на поверхность планеты из космоса, являются железоникелевые астероиды. Так как некоторые из них не имеют четко выраженных крупных вкраплений (хондр, как в каменных астероидах), для проведения экспериментов по определению критерия их разрушения использовался непосредственно материал астероида Чинге (тип атаксит, т. е. «лишенный порядка»). Он представлял собой сплав железа с никелем (~17 % никеля), имел плотность 7,8 г/см^3, с высокой прочностью на растяжение 855 МПа, т. е. примерно на три порядка больше, чем прочность на растяжение материалов, имитирующих каменные астероиды.

Экспериментальный стенд, методики измерений и результаты

Исследования по разрушению макетов, имитирующих реальные астероиды проводились на лазерной импульсной установке «Луч» [9]. Их облучение осуществлялось на длине волны λ = 527 нм (вторая гармоника неодимового лазера) импульсом длительностью от 2 до 5 нс по уровню полувысоты интенсивности. Макет закреплялся на вертикально ориентированном держателе в вакуумной камере в специальном, индивидуально юстируемом боксе для сбора осколков, имеющим прозрачные стенки. Таким образом, обеспечивалась возможность боковой и тыльной подсветки для регистрации динамики разлета макета. Как полностью разрушенные классифицированы

макеты, не образовавшие в результате воздействия на них ЛИ фрагментов крупного размера (больше 10 % от первоначального линейного размера макета). Принципиальная схема проведения экспериментов изображена на рис. 5.

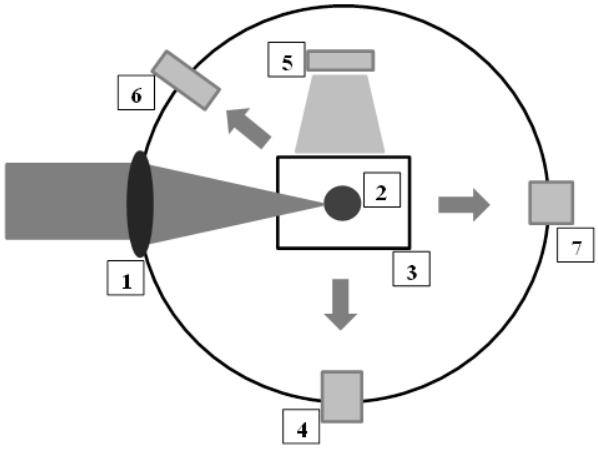
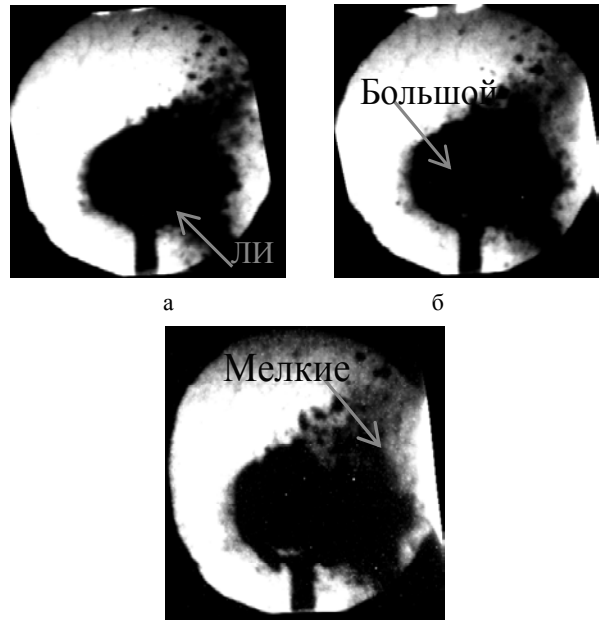


Рис. 5. Схема экспериментального стенда: 1 – объектив; 2 – микро-макета; 3 – бокс, улавливающий осколки; 4 – электронно-оптический преобразователь; 5 – лампа-вспышка теневой регистрации; 6 – камера-обскура; 7 – регистратор оптогетеродинной методики PDV

Размер пятна облучения в экспериментах определялся по его изображению в рентгеновском излучении, зарегистрированном с помощью камеры-обскуры [3].

Для наблюдения процесса разрушения макетов использовался теневой метод. Подсветка организована с использованием лампы-вспышки с длительностью импульса до 1 мс. Регистрация изображений осуществлялась при помощи СЭР-7 [3] в девятикадровом режиме с экспозицией кадра 1–2 мкс и промежутками между кадрами 80 мкс. На рис. 6 представлена характерная регистрация разлета осколков хондритного шаровидного макета, который не был разрушен полностью в ходе эксперимента. Указано время кадра после прихода ЛИ на макет. Стрелками на рис. 6 показаны: направление прихода ЛИ, большой неразрушенный фрагмент макета и мелкие осколки. Указано время задержки съёмки кадра после прихода излучения на макет, экспозиция кадров составляла 2 мкс.

Движение тыльной и боковой (относительно направления прихода ЛИ) поверхности макета и продуктов его распада регистрировались лазерным оптогетеродинным методом (PDV) [10]. На рис. 7 представлен пример регистрации динамики разлета тыльной стороны конусообразного каменного макета, полученной с использованием методики PDV. В эксперименте зарегистрировано полное разрушение макета. Хорошо видны два трека соответствующих группам осколков со скоростями 7 и 9 м/с.



а б в

Рис. 6. Покадровый снимок разлета шаровидного каменного макета диаметром ≈5 мм: а – 500 мкс, б – 716 мкс, в – 1006 мкс

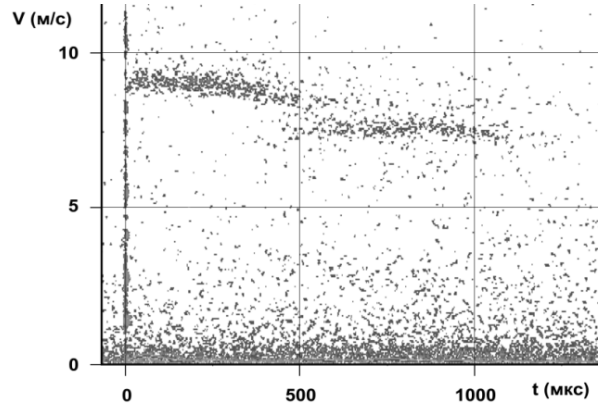


Рис. 7. PDV-регистрация движения осколков тыльной стороны макета

Важно отметить, что согласно теории подобия [5] скорости осколков, измеренные в таких экспериментах, будут соответствовать скоростям, возникающим при натурном разрушении астероида ЯВ. Таким образом, можно прогнозировать размер и форму облака осколков через определенное время после разрушения астероида.

На рис. 8 представлены результаты экспериментов по разрушению шаровидных хондритных макетов астероидов с прочностью на сжатие 22,5 МПа и размером прочных вкраплений менее 125 мкм. Данный образец материала признан наиболее соответствующим по характеристикам реальным каменным астероидам и условиям подобия.

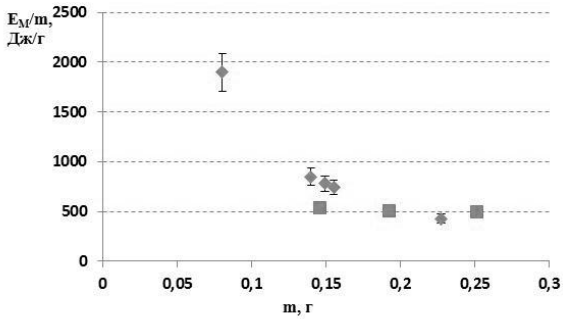


Рис. 8. Удельная энергия в экспериментах по разрушению шаровидных каменных макетов с прочностью на сжатие 22,5 Мпа

На рис. 8 ромбами отмечены эксперименты, в которых получено полное разрушение макета, квадратами – в которых макеты частично разрушены с образованием крупных осколков.

Погрешность приведена только для значений подведенной к макету энергии, оцениваемой величиной <10 %. Погрешность в измерении массы составляла 0,0005 г и на рисунке не видна. Представленные результаты свидетельствуют, что испытанный тип макета имеет порог разрушения около 650 Дж/г.

Таким образом, с учетом расчетного поправочного коэффициента k = 1/2 и возможной средней плотности реального астероида около 3 г/см^3, данный результат определяет величину необходимого ЯВ, достаточного для разрушения соответствующего каменного астероида. Так, при исходном диаметре 200 м для разрушения его до безопасного состояния необходим заряд с мощностью около 1 Мт тротилового эквивалента. При этом осколки астероида получат скорость около 10 м/с и в течение недели разлетятся на расстояния большее диаметра Земли. В результате часть из них вообще не упадёт на планету, а остальные сгорят в атмосфере.

Также приближённо смоделирован случай «заглубленного» ЯВ и проведены исследования с целью определения оптимальной точки воздействия на эллипсовидный макет с отношением осей 1:2. На рис. 9 представлены сравнительные результаты экспериментов по хондритным макетам разной прочности и формы при разных условиях облучения [3].

Для изучения влияния формы астероида и места воздействия на характер разрушения использованы конусовидные (высота и диаметр основания одинаковы и составляли 4–5 мм) макеты из материала с прочностью на сжатие 13 МПа.

Их полное разрушение для случая фокусировки ЛИ на центре основания мини-макета наступает при минимальной удельной энергии от 900 до 1100 Дж/г, а при фокусировке на полувысоте боковой поверхности – от 600 до 800 Дж/г. Наименее результативным в плане разрушения является выбор фокусировки ЛИ на вершине конуса. Например, в эксперименте с удельной энергией 2300 Дж/г от основания конуса отделился крупный осколок, составляющий 21% первоначальной массы макета. Полного разрушения макетов при таких условиях добиться не удалось.

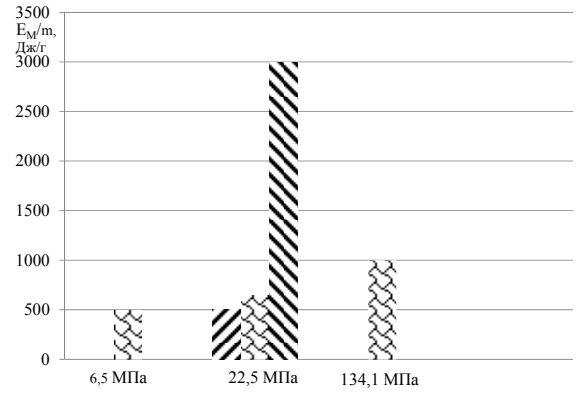


Рис. 9. Сравнительная гистограмма критериев разрушения каменных макетов разной формы и прочности на сжатие: ▒ – сфера; ▨ – сфера с каверной; ▩ – вытянутый эллипсовидный (a/b = 2/1), облучаемый на полюсе

В ходе экспериментов по имитации воздействия на астероид нескольких ЯВ двумя последовательными импульсами ЛИ облучались макеты с прочностью на сжатие 134,1 МПа. При достижении в двух экспериментах суммарной удельной энергии в 1200 Дж/г оставался крупный осколок массой 58 % от первоначальной массы макета.

Также проводились эксперименты по имитации воздействия двух ЯВ, произведенных одновременно. Макет с прочностью на сжатие 22,5 МПа и диаметром 4 мм облучался двумя пучками равной энергии, пятна фокусировки которых были разнесены друг от друга на 2 мм. Однако полного разрушения макета не произошло вплоть до величины удельной энергии 1000 Дж/г.

Таким образом, представляется предпочтительным использовать для разрушения астероида один, но мощный ЯВ.

Во всех экспериментах по моделированию ЯВ на ледяных астероидах зарегистрировано полное разрушение макета при понижении удельной энергии вплоть до значений от 20 до 40 Дж/г [11]. Необходимы дополнительные исследования для определения порогового условия разрушения подобных объектов.

Макеты, изготовленные из белого чугуна, имели порог полного разрушения в пределах удельной энергии от 3 до 4 кДж/г, что примерно в шесть раз превышает значения, для каменных образцов.

В экспериментах, проведенных с железно-никелевыми макетами, не удалось достичь разрушения на множество осколков при значениях удельной энергии вплоть до 13 кДж/г, что связано с их аномально высокой прочностью. Макеты сильно деформировались, однако дефект их массы не превышал 5 % [11].

Для уточнения масштабного фактора проведены эксперименты с гораздо более крупными макетами и другим способом нагружения. Исследовалось разрушение шаровидных каменных образцов с помощью цилиндрического заряда взрывчатого вещества (ВВ). Схема одного из таких экспериментов и его результаты приведена на рис. 10.

Рис. 10. Каменный макет диаметром 90 мм и заряд взрывчатки

Шаровидные каменные макеты диаметром 45 и 90 мм и прочностью на сжатие 15 МПа разрушались на осколки размером менее 10 % от первоначального при энерговкладе ВВ 550 Дж/г. Макеты из того же материала диаметром 5 мм разрушались импульсом ЛИ при энерговкладе от 800 до 900 Дж/г.

На рис. 11 представлены рассортированные осколки, собранные после эксперимента по разрушению макета диаметром 90 мм зарядом ВВ. Удельный энерговклад составил 44 Дж/г.

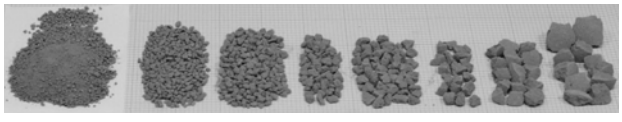


Рис. 11. Осколки каменного макета после разрушение зарядом ВВ

При изменении масштабов массы объекта и подводимой энергии более чем на три порядка в пределах погрешностей значения удельных энергий, необходимых для полного разрушения макетов, близки. Их отличие может быть объяснено дополнительной массой привносимой ВВ, и как результат - более длительным воздействием на объект.

Таким образом, продемонстрирована адекватность моделирования разрушения крупных объектов с помощью импульсного воздействия их мини-макеты.

На данный способ определения удельной энергии, необходимой для разрушения опасного астероида ядерным взрывом получен патент № 2655880 от 23.05.2018.

Литература

1. Акимов В. А., Глазачёв Д. О., Емельяненко В. В. и др. Астероидно-кометная опасность: стратегия противодействия. Москва: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2015.

2. Dillow C. Destroying an Incoming Killer Asteroid With a Nuclear Blast // ICMAR XV, Bonnier, 9 April 2012.

3. Аристова А. Ю., Аушев А. А., Баранов В. К. и др. Лазерное моделирование разрушительного воздействия ядерных взрывов на опасные астероиды // ЖЭТФ. 2018. Т. 153. Вып. 1. С. 157–172.

4. Слюта Е. Н. Особенности гравитацонной деформации малых тел Солнечной системы в зависимости от их химического и минерального состава. М.: ГЕОХИ РАН, 2014.

5. Седов И. С. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1977.

6. Белов И. А., Бельков С. А., Воронин А. Ю. и др. Исследование на лазерной установке «Луч» критериев разрушения астероидоподобных тел из хондрита при воздействии на них мощного импульсного излучения / X Всероссийская школа для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям // Сборник докладов. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2017. С. 247–256.

7.Авраменко М. И., Глазырин И. В., Ионов Г. В., Карпеев А. В. Расчеты параметров взрывной волны, вызванной Челябинским болидом / Международная конференция «XII Забабахинские научные чтения» // Сборник трудов. Снежинск: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ», 2014.

8. Лобанов В. А. Моделирование льда в задачах с конечноэлементной постановкой // Электронный журнал. Дифференциальные уравнения и процессы управления. 2008. № 4.

9. Безнасюк Н. Н., Галахов И. В., Гаранин С. Г. и др. Четырехканальная лазерная установка ЛУЧ – модуль установки ИСКРА-6 / Международная конференция «IV Харитоновские тематические научные чтения» // Сборник аннотаций. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2002. С. 82.

10. Sargis P. D, Molau N. E., Sweider D., Lowry M. E. Photonic Doppler Velocimetry.// LLNL Report UCRL-ID-133075, 1999.

11. Аристова А. Ю., Белов И. А., Кузин М. Г. и др. Исследование критериев разрушения макетов каменных, ледяных и железных астероидов при воздействии на них мощного импульсного излучения / X семинар молодых ученых и специалистов госкорпорации «Росатом» и КАИФ «Современные методы исследований и моделирования материалов» // Сборник докладов. Москва, 2018. С. 90–97.

МОДИФИКАЦИЯ ИНДИКАТОРНОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ЗВУКА В УДАРНО-СЖАТЫХ МАТЕРИАЛАХ

Ф. И. Тарасов, Е. Б. Смирнов, А. Ю. Николаев, Р. Н. Канунников, В. В. Малёв, А. С. Лобачёв, Д. В. Мухин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина», г. Снежинск Челябинской обл.

В работе представлена постановка проведенных взрывных экспериментов с использованием модифицированного фотоэлектрического метода (индикаторного метода) с применением пьезооптических датчиков на примерах по определению скорости звука в ударно-сжатых материалах. Цель работы – отработка и применение индикаторного метода.

Задача работы: проведение взрывных экспериментов по определению скорости звука за фронтом ударной волн в различных материалах: металле, керамике, пластмассах и верификация полученных данных.

Для ударно-волнового нагружения использованы взрывные нагружающие устройства метательного типа. Они обычно состоят из генератора плоской ударной волны и пластины-ударника. В экспериментах применены ударники из нержавеющей стали 12Х18Н10Т и стали 10. Диапазон скоростей ударников составил от 2,7 до 5,7 км/с. Для определения скорости звука в исследуемом нагруженном образце применялись методы догоняющей и встречной разгрузки.

В результате работы отработана постановка взрывных экспериментов по определению скорости звука в ударно-сжатых материалах индикаторным методом с использованием пьезооптических датчиков. Получены экспериментальные данные по скоростям звука в ударно-нагруженных материалах: в стали 12Х18Н10Т; в оксиде бериллия; в эпоксидном компаунде ЭК-34 и во фторопласте Ф-4; которые согласуются с данными других авторов, полученных ранее с применением других методов регистрации параметров ударного сжатия. Таким образом, метод может быть распространён и на исследования других материалов.

Введение

Скорость звука за фронтом ударной волны определяет начальное поведение сжатого вещества при разгрузке и в волне повторного сжатия. Измерение скорости звука позволяет получить информацию об упруго-пластических свойствах ударно-сжатых материалов. По резкому изменению зависимости скорости звука от давления можно судить об изменении фазового состояния вещества вдоль его ударной адиабаты [1].

Основными экспериментальными методами, предназначенными для определения скорости звука в ударно-сжатых материалах, являются: электроконтактный, манганиновый, электромагнитный, индикаторный (иначе называемый фотоэлектрическим), лазерно-интерферометрический.

Манганиновый метод. Принцип основан на изменении электросопротивления манганина пропорционально приложенному давления [2]. Схематично вид датчика и постановка эксперимента показаны на рис. 1.

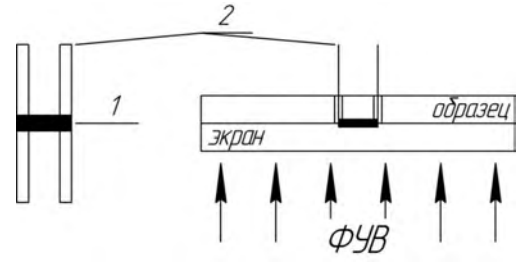


Рис. 1. Манганиновый датчик: 1 – чувствительный элемент; 2 – выводы; ФУВ – фронт ударной волны

Манганиновый датчик, как правило, покрывается слоем диэлектрического материала. Однако использование в экспериментах датчиков в изоляции предполагает более тщательный анализ полученных результатов с учётом материала и толщины изолирующего покрытия.

Лазерно-интерферометрический метод основан на эффекте Доплера. Эффект Доплера заключается в изменении частоты в данном случае лазерного излучения, отраженного от движущейся отражающей поверхности. Один из вариантов схем постановки ударно-волновых экспериментов показан на рис. 2.

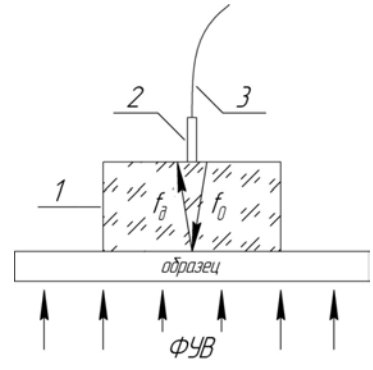


Рис. 2. Схема постановки эксперимента: 1 – оконный материал; 2 – коллиматор; 3 – оптическое волокно

В лазерном интерферометре частота опорного оптического сигнала смешивается с частотой претерпевшего доплеровский сдвиг отраженного сигнала в гетеродине и детектируется, в результате на выходе детектора возникает электрический сигнал соответствующий разностной частоте опорного и отраженного сигналов. Из полученных осциллограмм при помощи, например, быстрого преобразования Фурье получают спектрограммы, для которых по максимуму спектральной плотности получают значения профиля скорости отражающей движущей поверхности.

Индикаторный (фотоэлектрический) метод состоит в регистрации изменения интенсивности теплового излучения, вызванного сжатием вещества ударной волной с помощью фотопреобразователя оптического сигнала в электрический и его осциллографическим измерением регистрацией.

Во всем спектральном диапазоне зависимость энергии полного излучения M черного тела от температуры описывается уравнением Стефана-Больцмана $M = \sigma T^4$, где σ – постоянная величина. Интенсивность теплового излучения пропорциональна четвертой степени давления, то есть незначительное изменение давления на фронте ударной волны вызывает существенное изменение регистрируемого фотоприемником сигнала, соответствующего энергии излучения. Основное достоинство индикаторного (фотоэлектрического) метода (ФЭМ) – высокая чувствительность [3].

Классическая схема постановки эксперимента представлена на рис. 3.

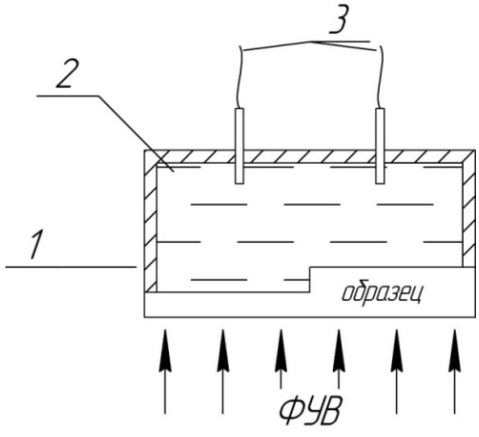


Рис. 3. Схема постановки эксперимента: 1 – корпус; 2 – индикаторное вещество; 3 – оптические датчики

Недостаток классической схемы постановки эксперимента с использованием ФЭМ заключается в конструкции приемной части, в которой крепится ступенчатый образец. Наличие общей полости в корпусе (поз. 1 на рис. 3), в которой располагается индикатор, обуславливает необходимость экранирования датчиков от свечения смежных ступеней.

Постановка взрывных экспериментов и полученные результаты

В настоящей работе предложена несколько иная конструкция экспериментального узла с использованием в качестве чувствительных элементов пьезооптических датчиков. Схема постановки эксперимента представлена на рис. 4.

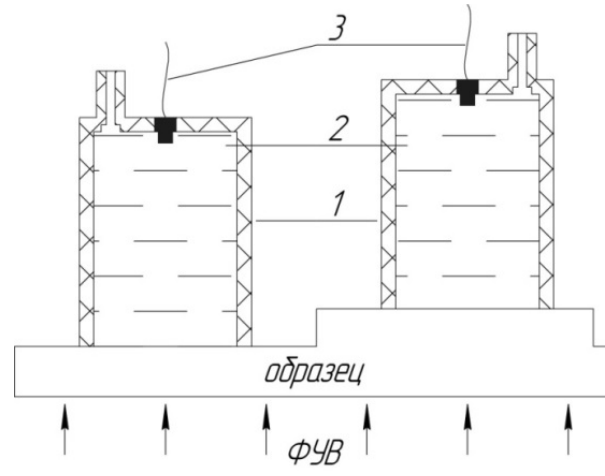


Рис. 4. Схема постановки эксперимента с использованием пьезооптических датчиков: 1 – корпус; 2 – индикаторное вещество; 3 – оптические датчики

Датчики располагаются над каждой ступенью образца в небольших светоизолированных корпусах (поз. 1 на рис. 4). Их преимуществами являются простота использования, относительная универсальность.

Проверка конструкции датчиков проводилась во взрывных экспериментах по определению скорости звука в ударно-сжатых образцах из нержавеющей стали 12Х18Н10Т в диапазоне давлений от 73 до 198 ГПа.

Пример сигнала с пьезооптического датчика и экспериментальные результаты по определению скорости звука в стали 12Х18Н10Т показаны на рис. 5 и 6, соответственно.

Для сравнения на рис. 6 приведены данные работ [4, 5], полученные, соответственно, манганиновым и индикаторным методом в классической постановке.

На рис. 6 видно, что данные настоящей работы и работ [4, 5], хорошо согласуются.

Также проводились работы по определению скорости звука в ударно-сжатой керамике (оксиде бериллия) с применением пьезооптических датчиков. В отличие от светонепроницаемых материалов, керамики способны пропускать свет от ударной волны в определенном спектральном диапазоне, вследствие чего при ударном сжатии образца на регистрируемом датчиком сигнале возникают особенности, осложняющие интерпретацию измерений.

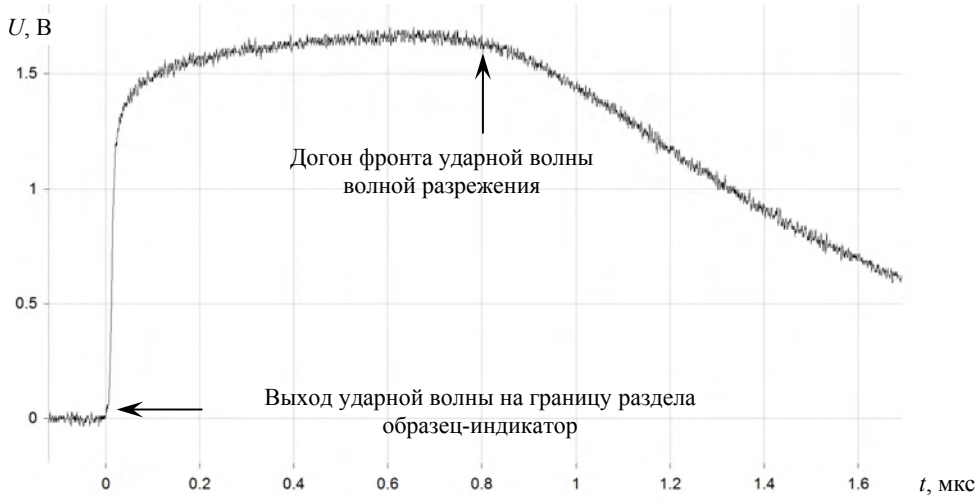


Рис. 5. Пример сигнал пьезооптического датчика

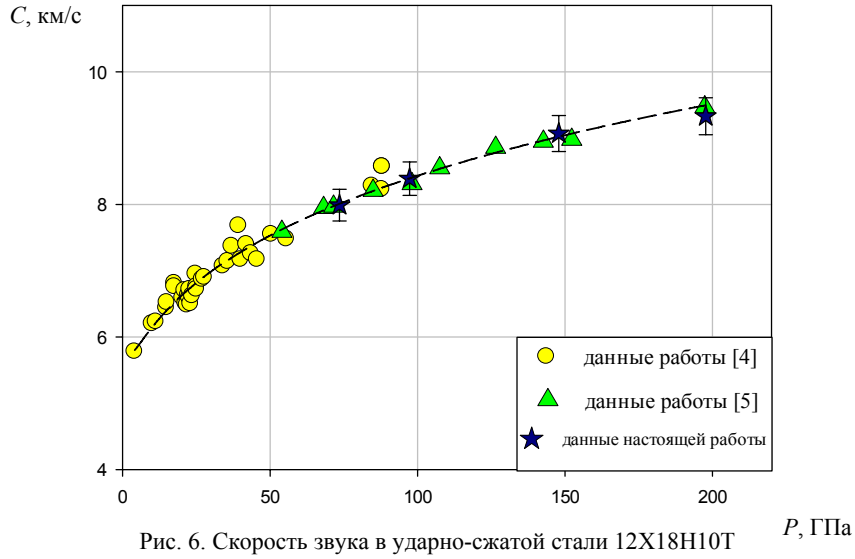


Рис. 6. Скорость звука в ударно-сжатой стали 12Х18Н10Т

В связи с этим для понимания происходящих процессов был проведен уточняющий взрывной эксперимент. В эксперименте использовался один пьезооптический и три оптических датчика. Постановка эксперимента показана на рис. 7.

Датчики располагались радиально, при этом ось каждого датчика находилась на расстоянии 10 мм от оси сборки. Оптические датчики *1* и *3* работали в режиме непрерывной регистрации. Датчик *2* был светоизолирован с торца алюминиевой фольгой толщиной 0,01 мм для определения момента времени выхода фронта ударной волны на свободную поверхность образца. Полученные в эксперименте сигналы представлены на рис. 8.

Момент времени, обозначенный стрелкой *I*, характеризует начало записи датчиками *1*, *3* и *4* распространения ударной волны (упругого предвестника) в образце. Стрелками *II-V* обозначены моменты выхода фронта ударной волны на свободную поверхность образца.

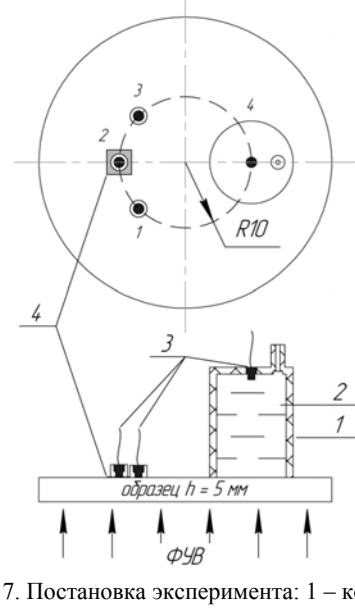


Рис. 7. Постановка эксперимента: 1 – корпус; 2 – индикаторное вещество; 3 – оптические датчики; 4 – металлическая фольга

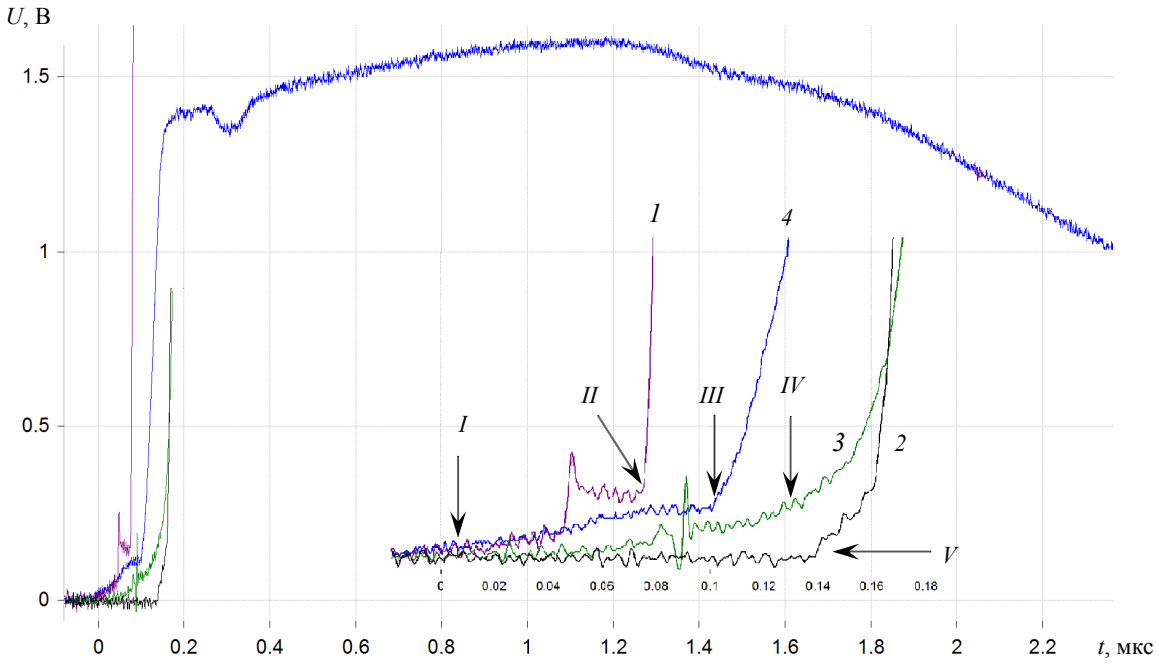


Рис. 8. Сигналы датчиков

Опираясь на справочные данные [6] по ударной сжимаемости оксида бериллия и разность времен *II* (*III*) и *I*, установлено, что начало записи датчиками соответствует глубине ~ 0,9 мм от свободной поверхности образца. Таким образом, показано, что оксид бериллия при ударном сжатии обладает частичным светопропусканием в инфракрасном спектре излучения.

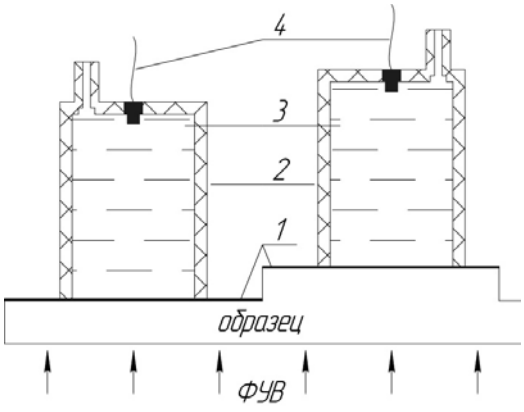


Рис. 9. Постановка эксперимента по определению скорости звука в ударно-сжатом оксиде бериллия: 1 – металлическая фольга; 2 – корпус; 3 – индикаторное вещество; 4 – оптические датчики

Схема постановки эксперимента по определению скорости звука в ударно-сжатом оксиде бериллия показана на рис. 9.

Учитывая оптическую прозрачность образца в инфракрасном спектре, на каждую ступень наклеивалась алюминиевая фольга толщиной 0,01 мм. Ударно-волновое нагружение осуществлялось взрывным нагружающим устройством с ударником из 12Х18Н10Т с подлётной скоростью 2,7 км/с. Толщина ударника составляла $h_{уд}$ = 4 мм, толщины ступеней образца – h_1 = 8 мм, h_2 = 9 мм, h_3 = 10 мм, h_4 = = 11 мм. Полученные в эксперименте сигналы представлены на рис. 10.

По результатам обработки экспериментальных данных получено значение скорости звука в оксиде бериллия C = 14,49 км/с при давлении P = 47 ГПа.

Проведены взрывные эксперименты по определению скорости звука в ударно-сжатых эпоксидном компаунде ЭК-34 и фторопласте Ф-4 в диапазоне давлений от 14 до 38 ГПа и от 24 до 44 ГПа, соответственно. Подробно результаты работ изложены в [7, 8]. Стоит отметить, что индикаторный (ФЭМ) метод ранее не применялся для определения скорости звука в данных материалах. Постановка экспериментов аналогична схеме, представленной на рис. 9. Результаты работ [7, 8] представлены на рис. 11 и 12.

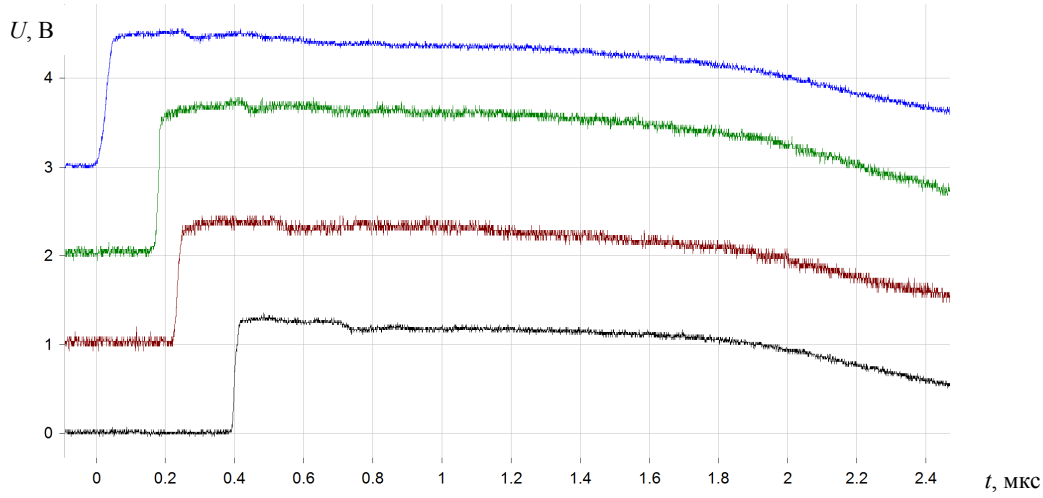


Рис. 10. Сигналы эксперимента по определению скорости звука в ударно-сжатом оксиде бериллия

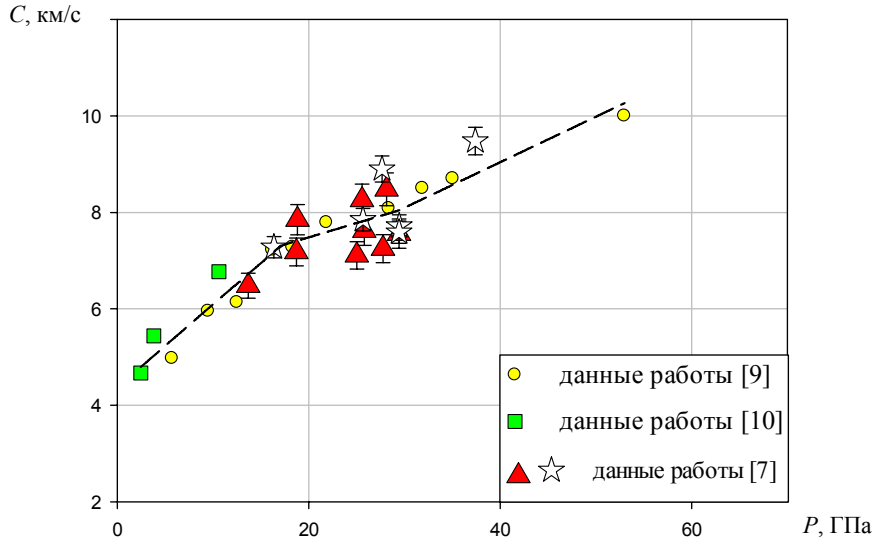


Рис. 11. Скорость звука в ударно-сжатой эпоксидной смоле

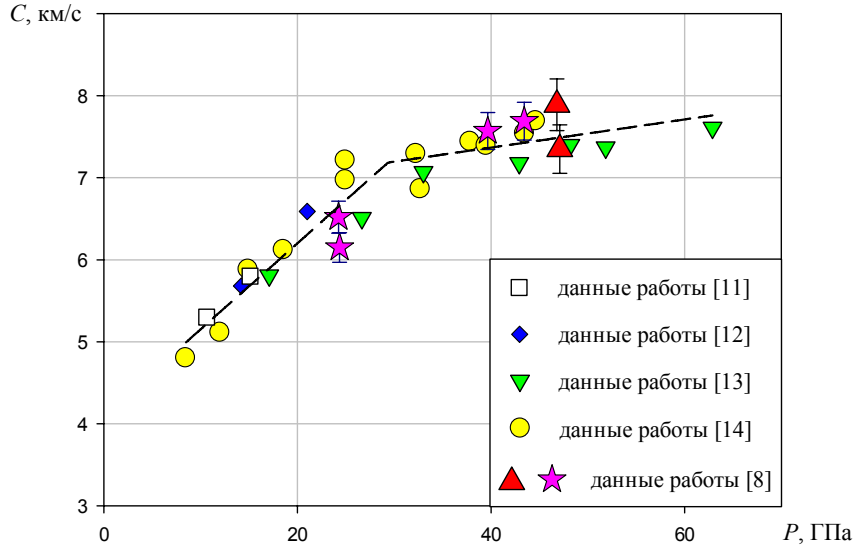


Рис. 12. Скорость звука в ударно-сжатом фторопласте

Заключение

В результате работы отработана постановка взрывных экспериментов по определению скорости звука в ударно-сжатых материалах индикаторным методом с использованием пьезооптических датчиков. Получены экспериментальные данные по скоростям звука в ударно-нагруженных материалах: в стали 12Х18Н10Т; в оксиде бериллия; в эпоксидном компаунде ЭК-34 и во фторопласте Ф-4.

Результаты настоящей работы хорошо согласуются с данными [4, 5, 9–14], полученными ранее с применением других методик регистрации параметров ударного сжатия. Таким образом, метод может быть распространён и на исследования других материалов.

Литература

1. Методы исследования свойств материалов при интенсивных динамических нагрузках. Монография / Под ред. д-ра физ.-мат. наук Жерноклетова М. В. Саров: ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003. С. 403.

2. Шапошников В. В. Электрические методы и средства регистрации процессов при исследовании характеристик взрывчатых веществ Снежинск: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ», 2011. С. 200.

3. McQueen R. G., Hopson J. W., Fritz L. N. Optical technique for determining rarefaction wave velocities at very high pressures. Los Alamos Scientific Laboratory, Los Alamos, New Mexico 87545 // Rev. Sci. Instrum. 53. 1982. N2. P. 245–250.

4. Юсупов Д. Т., Сидоров К. С., Вильданов В. Г., Слободенюков В. М., Борщевский А. О., Ткачёв О. В. Экспериментальное определение скорости звука в волне разгрузки в нержавеющей стали 12Х18Н10Т в диапазоне продольных напряжений 10–88 ГПа // Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций». Екатеринбург, ИМАШ УрО РАН, 21-25 мая 2018 г.

5. Kozlov E. A., Pankratov D. G., Tkachev O. V., Yakunin A. K. Measurements of Sound Velocities in 12Kh18N10T Austenitic Steel in the Range of Longitudinal Stress up 50 to 200 GPa for Calibration of Recent Elastic-Plastic Models // International Conference SHOCK WAVES IN CONDENSED MATTER. Kiev, Ukraine, 16-21 September 2012 // INTERPRESS LTD, ISBN 978-966-088-3, 2012. P. 158–167.

6. LASL Shock Hugoniot Data. University of California press. Berkley, Los Angeles, 1980. P. 658.

7. Тарасов Ф. И., Смирнов Е. Б., Николаев А. Ю., Канунников Р. Н., Юсупов Д. Т., Малёв В. В., Лобачёв А. С., Сидоров К. С., Мухин Д. В. Определение скорости звука в ударно-сжатой эпоксидной смоле фотоэлектрическим методом // Международная конференция «XIV Забабахинские научные чтения». Сборник трудов. Снежинск: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ», 2019.

8. Тарасов Ф. И., Смирнов Е. Б., Николаев А. Ю., Канунников Р. Н., Юсупов Д. Т., Малёв В. В., Лобачёв А. С., Сидоров К. С., Мухин Д. В. Определение скорости звука за фронтом ударных волн во фторопласте и эпоксидной смоле // Международная конференция «XXI Харитоновские тематические научные чтения» Сборник трудов. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2019.

9. Krupnikov K. K., Krupnikova V. P. Equation of state and matter transformation parameters under shock compression for epoxy resin. Shock Waves. Eds. Brun R., Dimitrescu L. Z. // Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1995.

10. Мочалова В. М., Уткин А. В., Павленко А. В., Малюгина С. Н., Мокрушин С. С. Импульсное сжатие и растяжение эпоксидной смолы при ударно-волновом воздействии // Журнал технической физики. 2019. Т. 89, № 1. С.126–131.

11. Калашников Н. Г., Кулешова Л. В., Павловский М. Н. Ударное сжатие политетрафторэтилена до давлений ~1,7 Мбар // ПМТФ, 1972. № 4. С. 187–191.

12. Павловский М. Н. Измерение скорости звука в ударно-сжатом кварците, доломите, ангидриде, хлористом натрии, парафине, плексигласе, полиэтилене и фторопласте-4 // ПМТФ, 1976. № 5. С. 136–139.

13. Morris C. E., Fritz J. N., McQueen R. G. The Equation of State of Polytetrafluoroethylene to 80 GPa // J. Chem. Phys. 1984. Vol. 80 (10). P. 5203–5218.

14. Николаев А. Ю., Вильданов В. Г., Борщевский А. О., Ткачёв О. В., Заикин В. Т., Слободенюков В. М. Измерение скорости звука в ударно-сжатом фторопласте-4 в диапазоне давлений 1,5–45 ГПа // X научно-техническая конференция «Молодежь в науке». Сборник докладов. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2011.

ЗАДАЮЩИЙ ГЕНЕРАТОР С УПРАВЛЯЕМОЙ ВРЕМЕННОЙ ФОРМОЙ ИМПУЛЬСА ДЛЯ ОБЛУЧЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ МИШЕНЕЙ НА УСТАНОВКЕ «ЛУЧ»

В. Ю. Телегина, Б. Г. Зималин, М. Г. Кузин, А. А. Маринин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Перспективы развития физики взаимодействия лазерного излучения с веществом во многом определяются научно-техническим прогрессом в области разработки и совершенствования мощных лазерных установок наносекундной длительности импульсов. Для этих целей в ряде ведущих лабораторий мира созданы и успешно применяются лазерные установки на неодимовом фосфатном стекле. В институте лазерно-физических исследований РФЯЦ-ВНИИЭФ с 2002 г. также действует лазерная установка «Луч», на которой совместно проводятся эксперименты по отработке новых технических решений для мощных неодимовых установок и облучению мишеней различных типов [1].

Установка «Луч» построена по принципу усиления лазерного импульса с энергией ≈ 1 Дж, длительностью 3–5 нс и длиной волны λ = 1054 нм в двух четырехпроходных дисковых усилителях на основе неодимового фосфатного стекла. Излучение с заданными пространственными, временными и спектральными характеристиками создается в системе формирования опорного излучения (СФОИ) и инжектируется на вход главных усилителей.

Для проведения ряда экспериментальных исследований на установке «Луч» по взаимодействию мощного лазерного излучения с веществом требуется лазерный импульс с длительностью фронта нарастания мощности излучения не более 0,5 нс. Длительность фронта лазерного импульса, формируемого с применением лазерного разрядника на установке «Луч», как правило, составляла 1 нс. Формирование более короткого фронта возможно с применением современных генераторов высоковольтных импульсов, управление которыми осуществляется посредством электрических сигналов.

Формирование заданных условий облучения мишеней и их стабилизация от опыта к опыту во многом зависит о стабильности энергии лазерного импульса непосредственно на выходе задающего генератора. С целью стабилизации параметров лазерного импульса предложено разработать новый задающий генератор СФОИ, накачка активной среды которого осуществляется посредством лазерных диодов. Применение в задающем генераторе активной модуляции добротности позволяет обеспечить согласование моментов срабатывания ячеек Поккельса системы временного профилирования и генерацией гигантского импульса. В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований по отработке и вводу в эксплуатацию нового задающего генератора системы формирования опорного излучения установки «Луч». Представлены результаты исследований временной формы импульсов, пространственного распределения энергии в пучке, а также стабильности энергии излучения.

Описание и принцип формирования импульса задающего генератора

Задающий генератор представляет собой плоскопараллельный резонатор с активным элементом Nd:YLF и диодной накачкой. На рис.1 приведена схема задающего генератора.

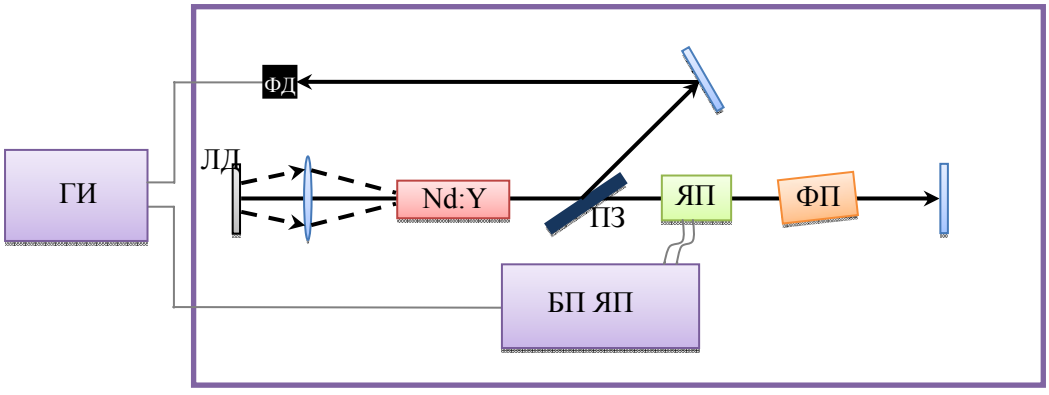
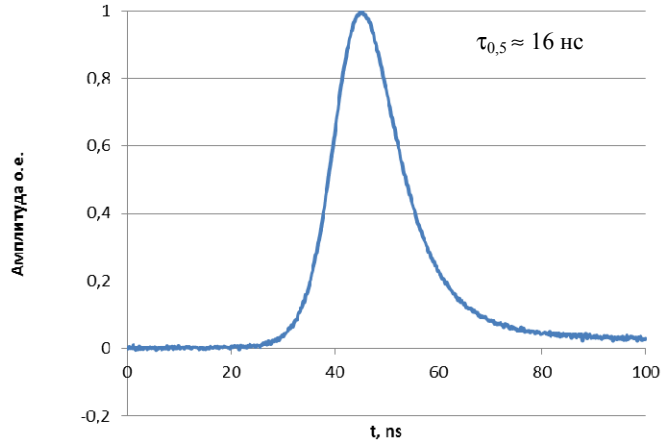


Рис. 1. Оптическая схема задающего генератора: ГИ – генератор импульсов, ЛД – лазерный диод, ФД – фотодиод, ПЗ – поляризационное зеркало, ЯП – ячейка Поккельса, БП ЯП – блок питания ячейки Поккельса, ФП – эталон Фабри–Перо

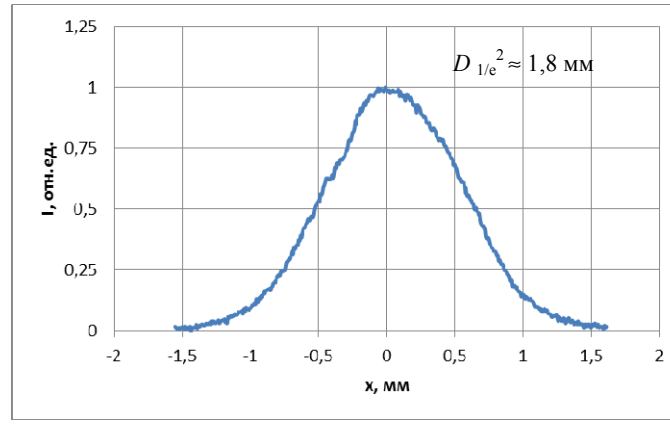
Излучение накачки (длина волны $\lambda_{нак}$ = 795 – – 799 нм) лазерного диода попадает на линзу, которая фокусирует его на активном элементе. Активный элемент представляет собой стержень из кристалла Nd:YLF с размерами (диаметр×длина) 5×10 (мм). Один из торцев активного элемента выполнен в виде зеркала и вместе с выходным зеркалом образует резонатор, где начинается развитие импульса свободной генерации. Коэффициент отражения выходного зеркала R = 0,6. Через поляризационное зеркало импульс попадает на фотодиод, который его преобразует в электрический сигнал. Существование импульса свободной генерации в резонаторе длительностью сотни наносекунд обеспечивает селекцию продольных мод в эталоне Фабри–Перо за счет большого числа проходов по резонатору. Внутрирезонаторная ячейка Поккельса в первоначальном состоянии находится под напряжением 2–2,5 кВ, которое подбирается таким образом, чтобы развитие импульса свободной генерации начиналось при максимальном коэффициенте усиления активной среды. В момент, когда интенсивность импульса свободной генерации достигает некоторой величины (подбирается экспериментально по осциллограмме), уровень сигнала с фотодиода запускает блок питания ячейки Поккельса, сбрасывая запирающее напряжение. При открытом состоянии ячейки Поккельса в резонаторе начинается генерация гигантского импульса, который за несколько проходов по резонатору сбрасывает большую часть запасенной лазерной энергии. Длительность гигантского импульса на выходе разработанного задающего генератора составляла $\tau_{0,5} \approx 16$ нс.

На рис. 2. представлены пространственные и временные характеристики лазерного импульса на выходе задающего генератора.

Временная форма лазерного импульса ассиметричная с более крутым передним и более протяженным задним фронтами, что характерно для задающих генераторов с активной и пассивной модуляцией добротности. Отсутствие периодических по времени изменений интенсивности свидетельствует о формировании одночастотного режима генерации (полоса пропускания регистрирующей аппаратуры 4 ГГц). Пространственное распределение интенсивности по форме близкое к гауссовой, что позволяет сделать вывод о формировании одной поперечной моды в резонаторе. Диаметр пучка по основанию $1/e^2$ составил ≈1,8 мм.



а



б в

Рис. 2. Пространственно-временные характеристики лазерного излучения на выходе задающего генератора: а – временная форма; б – ближняя зона; в – пространственное распределение

Исследование стабильности энергии излучения задающего генератора

Стабильность энергии лазерного импульса определялась в нескольких сериях экспериментов, отличающихся временным интервалом между срабатываниями задающего генератора.

Во всех сериях экспериментов проведены измерения стабильности энергии излучения с частотой срабатывания лазера $f = 1$ Гц. Каждая серия включала в себя 50 срабатываний. Результаты измерений энергии лазерных импульсов на выходе задающего генератора в трех сериях при срабатывании с частотой $f = 1$ Гц приведены в таблице ниже. В данной таблице представлены среднее (MEAN), минимальное (MIN), максимальное (MAX) значение энергии в серии, а также стандартное отклонение (DEV) в абсолютных единицах. Дополнительно приведено стандартное отклонение энергии в каждой серии в абсолютных и относительных величинах.

Статистика стабильности энергии на выходе задающего генератора

Номер серии	Параметр измерения энергии			
	E_{MEAN}, мДж	E_{MIN}, мДж	E_{MAX}, мДж	$E_{стд.откл}$, мкДж
1	10,53	10,28	10,83	115,6 (1,1 %)
2	10,48	10,17	10,65	111,2 (1,1 %)
3	10,42	10,06	10,61	113,2 (1,1 %)

Результаты проведенных исследований показали, что стандартное отклонение энергии излучения задающего генератора во всех сериях проведенных экспериментах составляет не более 1,1 % от среднего значения, что вполне удовлетворяет требованиям к задающему генератору установки «Луч».

Система временного профилирования

Для формирования импульса излучения с требуемой регулируемой длительностью была разработана оптоэлектронная система временного профилирования импульса.

Функциональная схема системы временного профилирования представлена на рис. 3.

Система временного профилирования состоит из двух ячеек Поккельса, расположенных между тремя, попарно скрещенными призмами Глана. Формирование высоковольтных импульсов на ячейках Поккельса осуществляется специальными генераторами импульсных напряжений производства АО «ПК «ФИД-Техника», г. Санкт-Петеребург. Синхронизация задающего генератора и блоков управления ячеек Поккельса осуществлялась генератором импульсов ТТЛ уровня. При сформированном импульсе свободной генерации, сигнал с фотодиода подается на генератор электрических импульсов, который, в свою очередь, управляет запуском блоков питания ячеек Поккельса системы временного профилирования.

Проведена серия регистраций временных форм лазерных импульсов на выходе системы временного профилирования с различными блоками питания ячеек Поккельса. Регистрация временной формы проводилась посредством осциллографа (полоса пропускания 4ГГц) и датчиком (полоса пропускания 5ГГц).

Формы профилированных импульсов излучения представлены на рис. 4.

Временные формы, представленные на рис. 4, длительностью по полувысоте ≈8 нс применяются для экспериментов по исследованию откольных явлений. Временная форма импульса, длительностью 3,3 нс, позволяет компенсировать искажения временного профиля импульса излучения в дисковых каскадах установки «Луч», возникающих вследствие насыщения, и сформировать на выходе усилительного тракта импульс с прямоугольным временным профилем интенсивности.

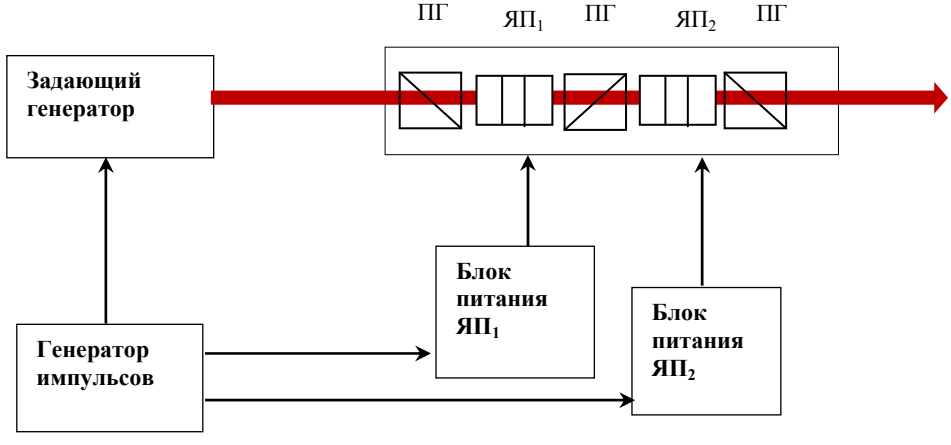


Рис. 3. Принципиальная схема системы временного профилирования:
ЯП – ячейка Поккельса, ПГ – призма Глана

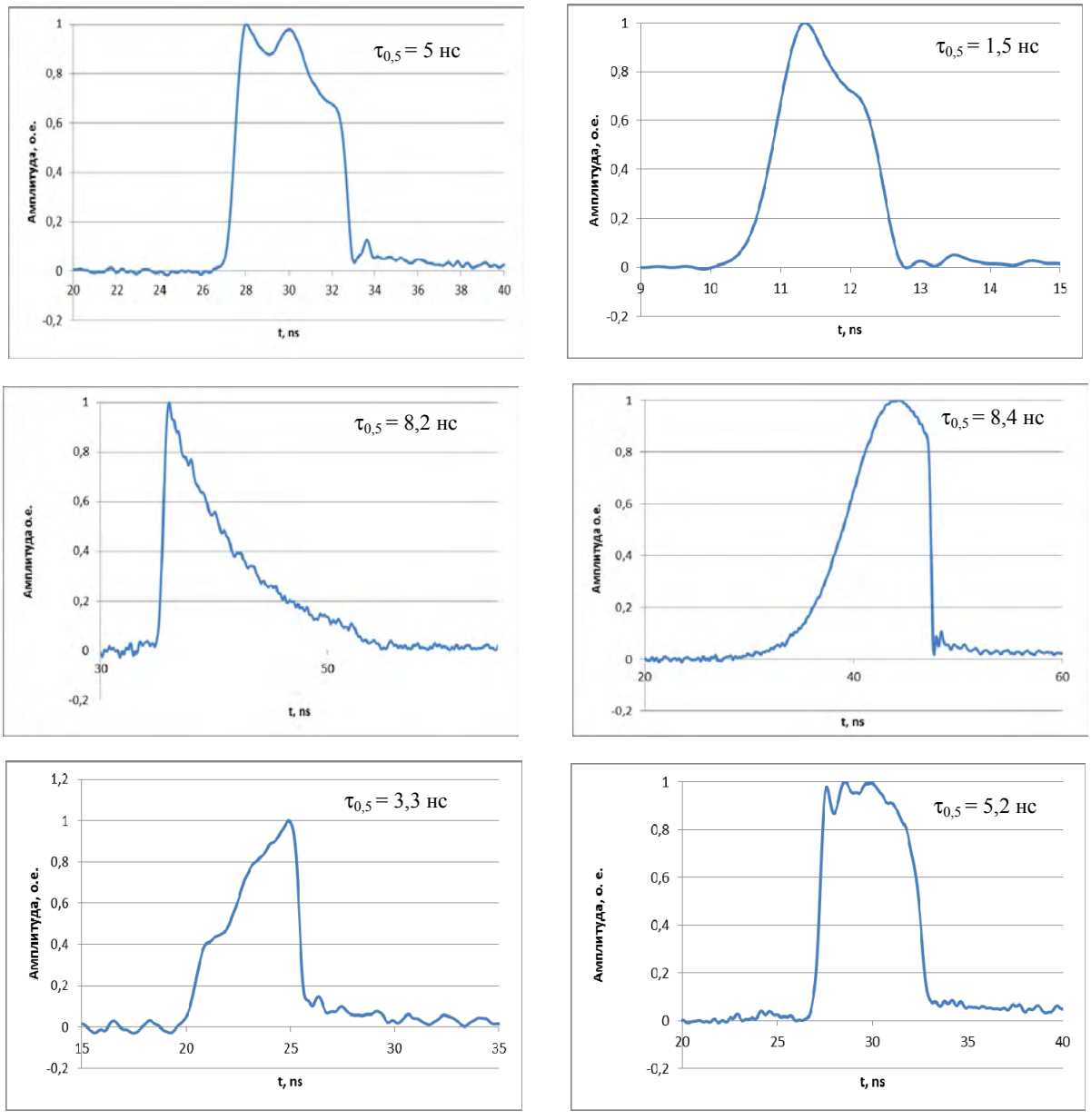


Рис. 4. Различные временные формы лазерных импульсов на выходе системы временного профилирования

Экспериментальная отработка нового задающего генератора в составе лазерной установки «Луч»

Исследование задающего генератора завершились полномасштабным экспериментом с регистрацией основных параметров излучения на выходе установки «Луч». Схема установки приведена на рис. 5. Новый задающий генератор был внедрен в штатную схему СФОИ, где, после двухпроходного предусилителя (ПУ–2), излучение впрыскивалось главный усилительный тракт. Зарегистрированы энергия излучения, распределения интенсивности в ближней и дальней зонах, временные формы импульса на входе и выходе главного усилительного тракта.

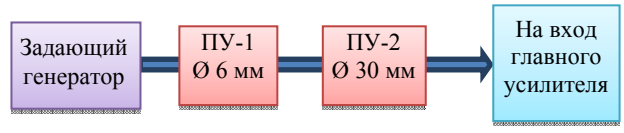
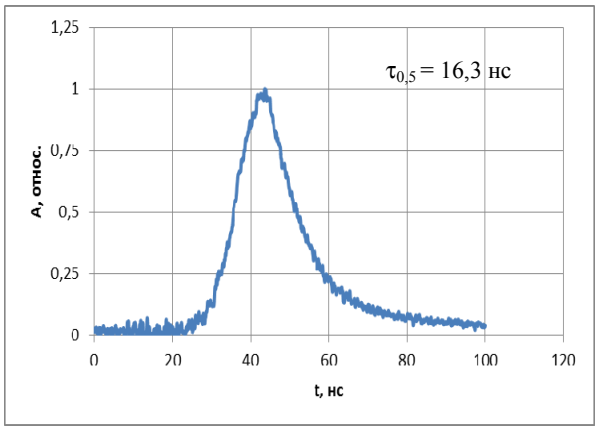


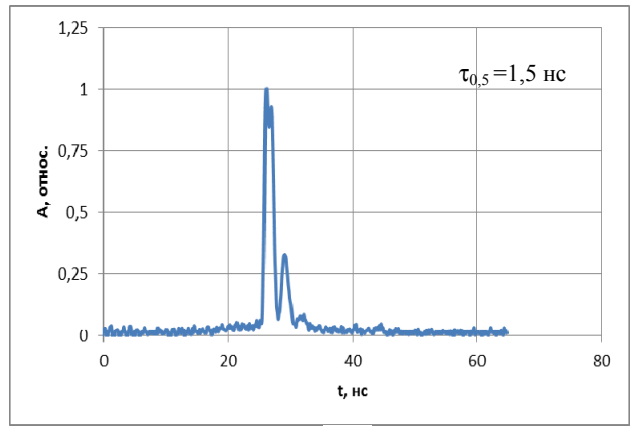
Рис. 5. Схема формирования опорного излучения

На рис. 6 представлены временные формы импульса на выходе задающего генератора и входе главного усилительного тракта.

На рис. 7 представлена ближняя зона и профиль лазерного пучка на выходе системы формирования опорного излучения.

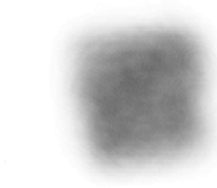


а



б

Рис. 6. Временная форма импульса: а – на выходе нового задающего генератора $\tau_{0,5}$= 16,3 нс; б – на выходе системы временного профилирования $\tau_{0,5}$ = 1,5 нс



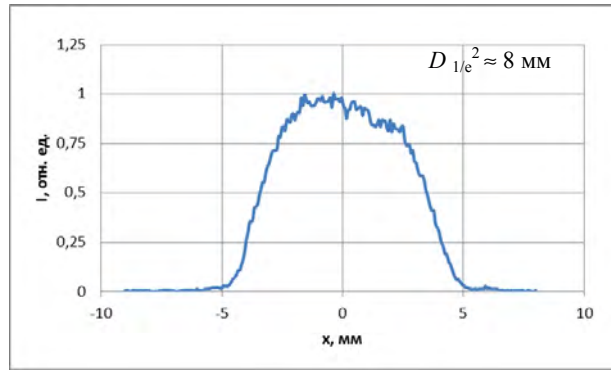


Рис. 7. Ближняя зона и пространственное распределение лазерного излучения на выходе СФОИ

Апертура пучка по основанию $1/e^2$ составляет 8×8 мм^2. Энергия на выходе СФОИ составила $E_{СФОИ}$ = 104 мДж. Расходимость излучения в первой гармонике по уровню 0,8 составила $\Theta_{0,8} = 1{,}4\times10^{-4}$ рад, что соответствует штатной расходимости излучения в проводимых ранее исследованиях.

На рис. 8 представлена временная форма лазерного импульса на выходе силового тракта в первой гармонике.

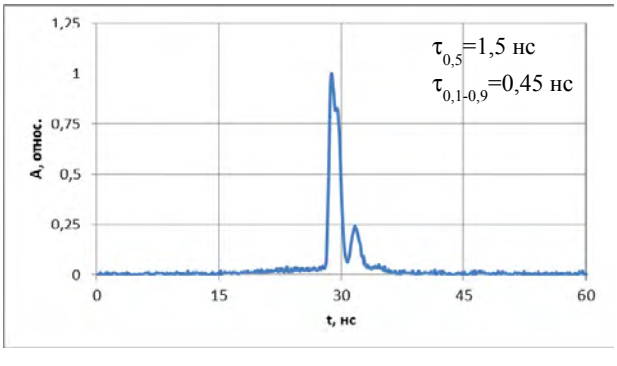


Рис. 8. Временная форма импульса на выходе силового тракта в первой гармонике

Из рис. 6б и 8 видно, что в результате насыщения усиления большую часть энергии снимает основной импульс, поэтому отношение с послеимпульсом становится 1:4 вместо 1:3. Проведенные экспериментальные исследования показали, что разработанный задающий генератор может быть применен в составе установки «Луч» для расширения спектра проводимых исследований по облучения мишеней различных конструкций, в частности, требующих специально профилированные временные формы лазерных импульсов.

Заключение

В результате проведенных исследований разработан новый задающий генератор установки «Луч», формирующий лазерный импульс в режиме активной модуляцией добротности резонатора с одной продольной и одной поперечной модой. Активная среда задающего генератора выполнена в виде кристалла YLF:Nd, накачка которого осуществляется импульсными лазерными диодами.

Проведенные исследования показали, что на выходе задающего генератора длительность гигантского импульса составляет $\tau_{0,5} \approx 16$ нс, энергия ≈ 1 мДж. Среднеквадратичное отклонение энергии импульса от выстрела к выстрелу составляет 1,1 %.

Разработана и исследована система временного профилирования лазерного импульса, выполненная на основе двух ячеек Поккельса и высоковольтных источников питания, управляемых от электрических сигналов и позволяющих формировать различные временные формы лазерных импульсов. Показана возможность формирования, как импульсов с гауссоподобной временной формой и регулируемой длительностью от $\tau_{0,5} \approx 1{,}2$ нс до $\tau_{0,5} \approx 5$ нс, так и импульсов более сложной формы, применяемых для исследований, например, откольных явлений в мишенях.

Проведена предварительная экспериментальная отработка нового задающего генератора в составе установки «Луч». При длительности лазерного импульса $\tau_{0,5} \approx 1{,}5$ нс на выходе установки получена энергия излучения 400 Дж. Пространственно-угловые параметры излучения соответствовали штатным требованиям.

Проведенные исследования показали целесообразность применения разработанного задающего генератора в составе установки «Луч» с последующим исследованием усиления лазерных импульсов с различной длительностью и формой временного профиля.

Литература

1. Гаранин С. Г., Зарецкий А. И., Илькаев Р. И., Кириллов Г. А., Кочемасов Г. Г., Курунов Р. Ф., Муругов В. М., Сухарев С. А. Канал мощной установки «Луч» для ЛТС с энергией импульса 3,3 кДж и длительностью 4 нс // Квантовая электроника. 2005. Т. 35, № 4. С. 299–301.

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ ВЗРЫВНОГО РАЗМЫКАТЕЛЯ ТОКА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЕГО РАБОТЫ

Д. А. Тепаев, С. А. Казаков, А. А. Агапов, Ю. В. Власов, В. А. Демидов, С. И. Володченков

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Взрывные размыкатели тока (ВРТ) с ребристой преградой (РП) хорошо зарекомендовали себя в ряде электрофизических экспериментов. Однако с увеличением габаритов, и прежде всего – диаметра устройств, изготовление таких ВРТ крайне затруднено, а иногда и невозможно. Поэтому в размыкателях большого диаметра взамен ребристых преград применяются проволочные соленоиды (ПС). Например, в размыкателях диаметром ~600 мм применяются ПС, изготовленные из проволоки диаметром 1,5 мм с шагом намотки соленоида 4 мм. В то же время наилучшие результаты по формированию импульса тока в нагрузке получены при испытаниях ВРТ с РП диаметром 100 мм, когда разрушаемый проводник и преграда с ребрами толщиной 1 мм и пазами шириной 1,5 мм помещались в газе SF_6, а для разрыва проводника применялся заряд взрывчатого вещества (ВВ) на основе октогена. Чтобы выяснить, как замена РП на ПС влияет на эффективность работы ВРТ, исследована работа двух размыкателей разных конструкций, находящихся в равных условиях. Сохранены материал, диаметр, толщина и длина разрушаемого проводника, плотность тока в нем, давление и состав газа в размыкателе, состав ВВ в разрывном заряде. Чтобы количество размыкающих ячеек ВРТ было также одинаковым, в размыкателе с РП применена преграда с ребрами толщиной 1,5 мм и пазами шириной 2,5 мм. В докладе приводятся результаты исследований по переключению тока ВМГ-100 в нагрузку индуктивностью ~10 нГн размыкателями с РП и ПС.

ВРТ с преградой в виде проволочного соленоида

В первом эксперименте объектом исследований являлся взрывной размыкатель тока диаметром 100 мм, выполненный в виде соленоида из танталовой проволоки диаметром 1,5 мм, намотанной с шагом 4 мм, с заполнением ВРТ элегазом и разрушением медной фольги толщиной 0,28 мм с помощью заряда ВВ из состава ОФА-6У. Общий вид устройства представлен на рис.1.

В состав устройства входят:

– спиральный ВМГ

– ВРТ с ПС

– индуктивная нагрузка

ВРТ-100 состоит из устройства инициирования (УИ) [1], промежуточного заряда ВВ, внутреннего токопровода, изолятора, разрывного заряда ВВ, разрушаемой фольги, преграды и внешнего токопровода. УИ содержит 6 электродетонаторов (ЭД) АТЭД4.000.8, соединенных электрически последовательно и расположенных вдоль оси устройства с шагом 20 мм.

В качестве промежуточного заряда применена шашка А7110-Р726.001 из состава КТГ. Промежуточный заряд формирует ударную волну, которая инициирует разрывной заряд ВВ толщиной 6 мм, выполненный из состава ОФА-6У. Разрушаемый проводник выполнен из медной фольги толщиной 0,28 мм в виде цилиндра диаметром 100 мм длиной 100 мм. Длина разрушаемого участка фольги 90_{-5} мм. Преграда ВРТ выполнена в виде соленоида из танталовой проволоки диаметром 1,5 мм, намотанной с шагом 4 мм. Ширина пазов между витками соленоида 2,5 мм. Количество размыкающих ячеек – 22. Плотность тантала $\rho = 16{,}65$ г/см^3, скорость звука $c = 3{,}35$ мм/мкс, акустическая жесткость $\tilde{R} = \rho \times c = 55{,}8$ [3]. Над преградой расположен демпфер из пенопласта плотностью ~0,2 г/см^3 толщиной 5 мм. Внутренняя полость ВРТ заполнена газом SF_6 при давлении 4,0 атм.

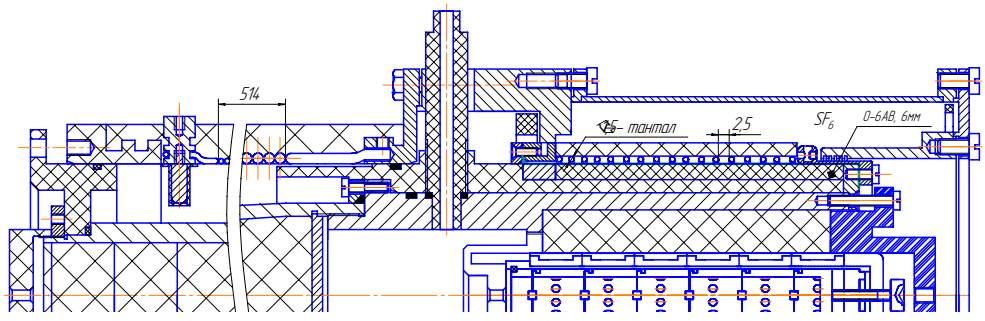


Рис. 1. Эскиз устройства

При разрываемом токе спирального ВМГ ~5,5 МА получены осциллограммы, представленные на рис. 2, 3. и 4.

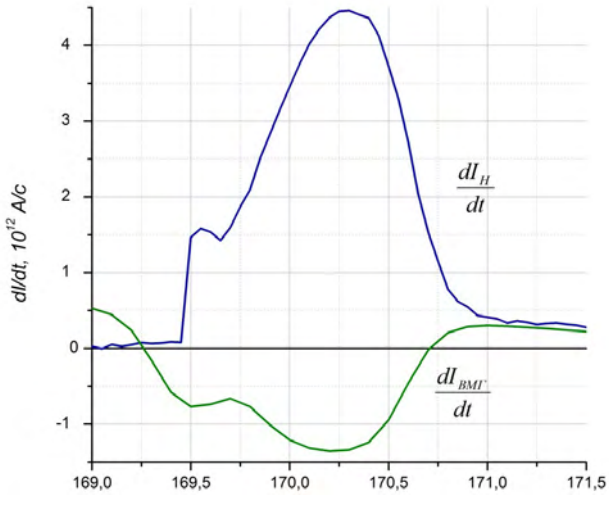


Рис. 2. Производная тока в ВМГ и в нагрузке

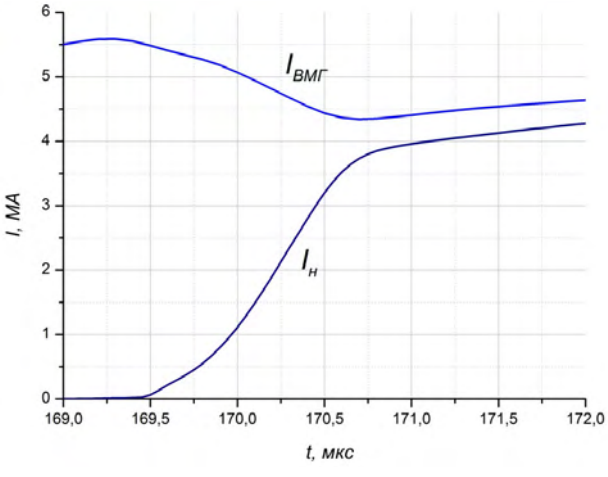


Рис. 3. Ток в ВМГ и в нагрузке

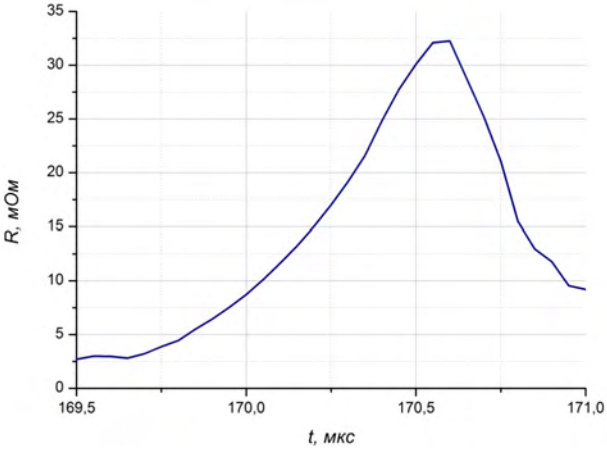


Рис. 4. Сопротивление ВРТ

В нагрузке индуктивностью 10 нГн сформирован импульс тока амплитудой ~3,8 МА с характерным временем нарастания ~ 1 мкс. Сопротивление ВРТ составило ~ 32 мОм.

ВРТ с ребристой преградой

Ребристая преграда взрывного размыкателя тока представляет собой периодическую структуру, состоящую из одинаковых размыкающих элементов в виде ребер и пазов между ними [1, 2]. Во втором сравнительной эксперименте исследовался взрывной размыкатель тока с ребристой преградой из органического стекла длиной 90 мм с ребрами шириной 1,5 мм и пазами шириной 2,5 мм. Ребра облицованы стальными кольцами толщиной 1 мм. Материал, диаметр, толщина и длина разрушаемого проводника, плотность тока в нем, давление и состав газа в размыкателе, количество размыкающих ячеек, состав ВВ в разрывном заряде сохранены по отношению к первому эксперименту.

В эксперименте получены осциллограммы, представленные на рис. 5, 6 и 7.

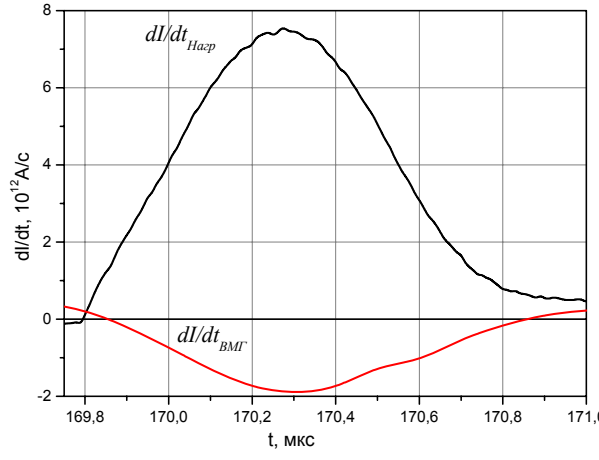


Рис. 5. Производные тока в ВМГ и в нагрузке

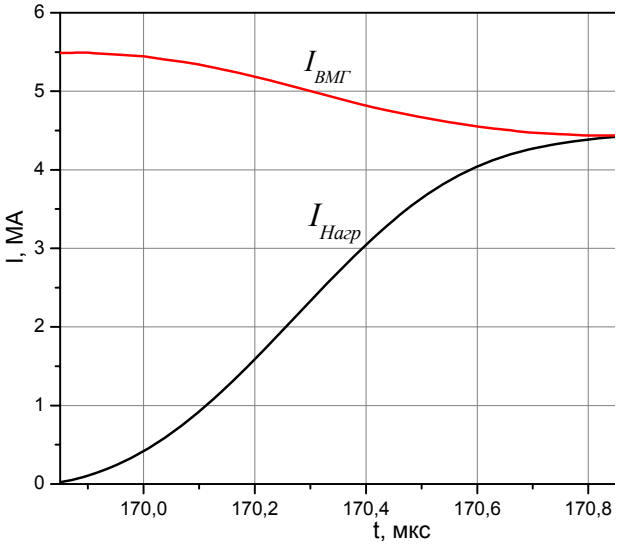


Рис. 6. Ток в ВМГ и в нагрузке

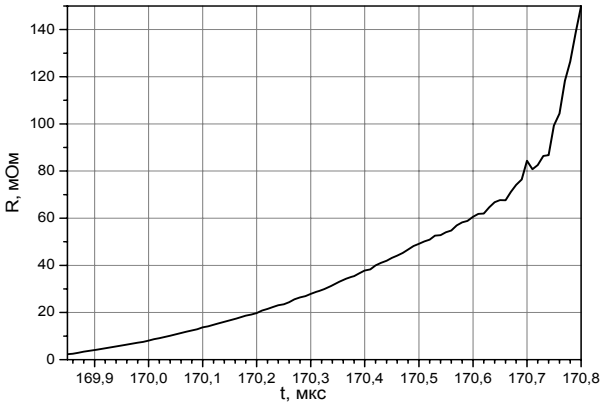


Рис. 7. Сопротивление ВРТ

В нагрузке индуктивностью 10 нГн сформирован импульс тока амплитудой ~4,4 МА с характерным временем нарастания ~ 0,7 мкс. Сопротивление ВРТ составило ~83 мОм.

Выводы

Проведенные эксперименты показали, что от конструкции взрывного размыкателя существенно зависит эффективность формирования импульса тока в нагрузке. При коммутации тока 5,5 МА, генерируемого спиральным генератором диаметром 100 мм, размыкатель с ребристой преградой позволяет формировать в нагрузке 10 нГн импульс тока амплитудой 4,4 МА с временем нарастания ~0,7 мкс. При прочих равных условиях, замена ребристой преграды в размыкателе на проволочный соленоид, приводит к уменьшению тока в нагрузке на ~15 % и увеличению времени нарастания тока в 1,4 раза, а сопротивление ВРТ уменьшается в ~2,5 раза.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке и конструировании устройств на основе взрывных источников импульсной энергии.

Литература

1. Агапов А. А., Борискин А. С., Володченков С. И. и др. Устройство осевого инициирования цилиндрических зарядов взрывчатого вещества // XVI научно-техническая конференция «Молодежь в науке». Сборник тезисов. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2017. С.31.

2. Голосов С. Н., Демидов В. А., Казаков С. А. и др. Испытание устройства на основе дискового взрывомагнитного генератора ДВМГ480 с взрывным размыкателем тока // Проблемы физики высоких плотностей энергии. Под ред. Гаранина С. Г., Селемира В. Д., Соловьева В. П. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2017. Т. 2. С. 223–228.

3. Бабичев А. П., Бабушкина Н. А., Братковский А. М. и др. Физические величины (справочник). Под ред. И. С.Григорьева, Е. З. Мейлихова М.: Энергоатомиздат, 1991. С. 1232.

РЕГИСТРАЦИЯ ПЕРЕГРУЗОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МИКРОВОЛНОВОЙ ДИАГНОСТИКИ НА ЛАБОРАТОРНОМ КОМПЛЕКСЕ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОНИКИ

А. В. Цветков[1], *В. А. Токарев* [1], *В. А. Борисенок* [2], *В. А. Брагунец* [1], *Д. И. Баклашов* [1], *В. Г. Симаков* [1,2], *А. В. Крюков* [1], *А. А. Седов* [1], *А. В. Родионов* [1], *Е. Е. Шестаков* [1,2]

[1]ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.
[2]СарФТИ НИЯУ «МИФИ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Эффективность боеприпаса определяется многими факторами, одним из основных является эффективность работы взрывного устройства (ВУ) – элемента, входящего в состав всех артиллерийских и реактивных снарядов и определяющего своевременность их срабатывания. В связи с этим, разработка новых и модернизация существующих ВУ является важной составляющей по повышению эффективности осколочно-фугасных и кумулятивных боеприпасов [1–3].

Работа ВУ, разрабатываемых до недавнего времени, основывалась, как правило, на механических принципах. Однако всевозрастающие требования к точности срабатывания ВУ, в сочетании с предельно минимальным временем на обработку информации, значительными динамическими нагрузками и малыми габаритами, обуславливают поиск новых научно-технических путей и принципов их построения. В последнее время наибольший приоритет получило развитие электронных ВУ с использованием новейшей элементной базы микроэлектроники с целью существенно повысить тактико-технические характеристики ВУ и, соответственно, боеприпасов [2, 3].

Замена механических подсистем электронными блоками влечет за собой необходимость снабжения ВУ надежным источником электропитания. Этот источник должен сохранять свои свойства в течение десяти лет и более, а затем обеспечить ВУ электроэнергией после того, как подвергнется ударным нагрузкам при выстреле. Для успешного проведения разработки ВУ необходимы также данные по стойкости элементной базы и его электронных узлов к перегрузкам. Цель настоящей работы – отработать метод регистрации перегрузок с использованием микроволновой диагностики на имеющемся лабораторном комплексе [4].

Описание комплекса

Для создания перегрузок использовался лабораторный комплекс [4], расположенный в СарФТИ. В состав комплекса входят: легкогазовая пушка, лазерный измеритель скорости метаемого объекта, система управлением выстрела и регистрации. Фотография комплекса представлена на рис.1.

Легкогазовая пушка (рабочий газ – гелий) состоит из камеры высокого давления (КВД), ствола и мишенной камеры (МК). Стволы сменные, калибры – 37мм и 40 мм, длина – 3,2 м. Размеры КВД ∅300х450мм (внутренний объем 2,5 л), МК ∅250х250мм. КВД отделена от ствола мембраной. Разрушение мембраны принудительное с помощью электромагнитного устройства. Максимально возможное давление в камере - 150 атм. Ствол и МК перед опытом вакуумируются.

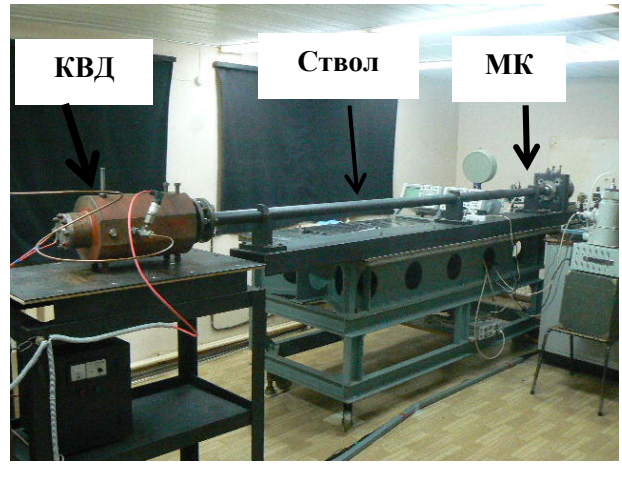


Рис. 1. Фотография комплекса

Метод регистрации перегрузок

Для регистрации параметров перегрузок выбрана микроволновая диагностика [5] (радиоинтерферометр) с длиной волны зондирующего излучения 3,2 мм.

Наиболее важным достоинством метода является прозрачность диэлектрических материалов для миллиметрового диапазона длин волн, что позволяет проводить измерения характеристик движения снаряда через заглушку на выходном торце мишенной камеры (см. рис. 2). При этом характерные размеры шероховатостей, отражающих микроволновое излучение, таких как шероховатость поверхностей удар-

ников, значительно меньше длины волны излучения. Такие поверхности для микроволнового излучения являются практически гладкими.

Микроволновой метод является невозмущающим и дистанционным, поскольку в зону зондирования не вносятся какие-либо датчики, волокно и др., а зондирование возможно в достаточно протяженных объектах (стволе). Высокая чувствительность микроволнового метода к движению различных границ раздела, возможность проведения исследований в оптически-непрозрачных средах, а также непрерывность получаемых данных предоставляют широкие возможности в экспериментальных исследованиях.

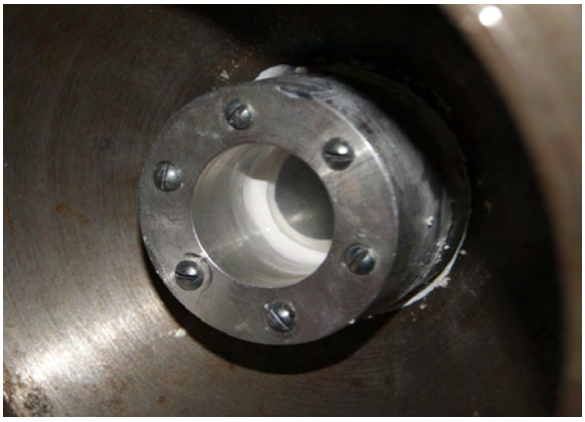


Рис. 2. Выходной торец мишенной камеры с заглушкой

Оценка границ применимости микроволновой диагностики

Для того чтобы обеспечить возможность расчета ускорения движения объекта по данным радиоинтерферометра, необходимо обеспечить наличие в экспериментальных результатах хотя бы минимального массива некоррелированных данных о скорости объекта. Дело в том, что для минимизации систематических погрешностей при расчете *V-t* диаграммы, дифференцирование *X-t* диаграммы осуществляется методом скользящей секущей, адаптируемой к интервалу перемещения в половину длины волны зондирующего излучения. Поэтому соседние отсчеты данных о скорости, удаленные друг от друга по перемещению менее чем на половину длины волны, являются коррелированными друг с другом. Следовательно, для определения перегрузки перемещение объекта за время её действия должно составить не менее двух полуволн или одной полной длины волны.

Если взять одну из известных формул для перемещения объекта, движущегося с постоянным ускорением:

$$x = \frac{W_2^2 - W_1^2}{2a}, \qquad (1.1)$$

где W_1 и W_2 – начальная и конечная скорости соответственно, из (1.1), приняв полную остановку $W_2 = 0$ можно выразить:

$$|a| = \frac{W_1^2}{2x}. \qquad (1.2)$$

В качестве x следует понимать выше упомянутый интервал минимальной дифференцируемости *V-t* диаграммы, который равен длине волны, т. е. 3,2 мм. Из формулы можно сделать вывод, что максимальная перегрузка, которую можно рассчитать, будет зависеть не столько от величины перепада скорости, сколько от диапазона скоростей, в котором проводится эксперимент.

Для оценки минимальной длительности перегрузки, которую можно зарегистрировать, используем другую формулу из элементарной механики:

$$x = W_1 t - \frac{at^2}{2}. \qquad (1.3)$$

Решив квадратное уравнение (один из корней которого нужно опустить) и подставив в решение значение для перегрузки, получаем:

$$t = \frac{2x}{W_1}. \qquad (1.4)$$

Если подставить в формулы значения, близкие к условиям проводимого эксперимента, а именно – торможение объекта с 200 м/с до нулевой скорости, то получим, что максимальная регистрируемая перегрузка составит $6{,}25 \cdot 10^5\, g$, а минимальная длительность – 32 мкс. Следует отметить, что данные значения были получены при минимальном значении x, при котором такие измерения вообще теоретически возможны. На практике же проведение измерений на экстремально малых базах сопряжено со значительными трудностями при обработке и большими погрешностями величин, полученных дифференцированием массива экспериментальных данных, поэтому в реальности следует руководствоваться значением предельной перегрузки ниже и значением предельного времени выше указанного.

Оценка погрешности метода показала, что она, в основном, определяется шумовой составляющей интерферограммы и составляет 2 % для перемещения, 4 % для скорости и 9 % для ускорения.

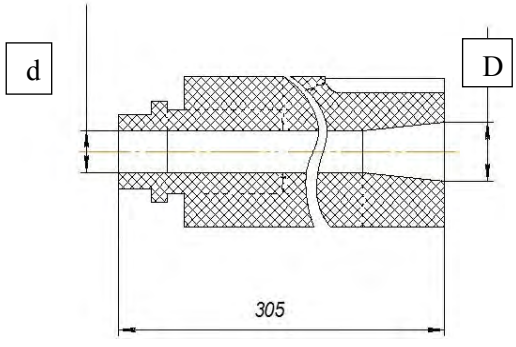
Создание перегрузок

Проведена отработка методов создания нагружающего импульса на контейнере с исследуемыми объектами на стадиях разгона и торможения. Измерение скорости снаряда на стадии разгона показало, что ее нарастание плавное, максимальные перегрузки не превышают 5000 g и, следовательно, недостаточны для достижения поставленной цели. С использованием стадии торможения снаряда опробованы два способа достижения требуемых ускорений.

1. Торможение снаряда-контейнера при взаимодействии со сплошной преградой из низкоплотного материала.

2. Торможение снаряда-контейнера при внедрении в крешерную систему, в конструкции которого предусмотрено отверстие с диаметром меньшим, чем диаметр снаряда.

По результатам проведенных на комплексе экспериментов сформулированы технические требования к крешеру. В настоящее время используется крешер, эскиз (см. рис. 3а) и фото (см. рис. 3б) которого показаны на рис.3. Для ствола калибра 40 мм $D = 40$ мм $d = 25$ мм. Крешер изготовлен из полиэтилена.



а

б

Рис. 3. Крешер: а – эскиз, б – фото

Для исключения поперечного деформирования снаряда на него надевался алюминиевый колпачок в виде усеченного конуса, а также внутрь полиэтиленового поддона вставлялся цилиндр из алюминия, фото снаряда-контейнера приведено на рис. 4а. Также такая конструкция колпачка обеспечивает хорошее отражение для микроволнового излучения.
Фотографии снаряда до и после торможения о крешер приведены на рис. 4. Основной действующий фактор – сила в осевом направлении.

а

б

Рис. 4. Снаряд с контейнером в снаряженном состоянии: а – до опыта, б – после опыта

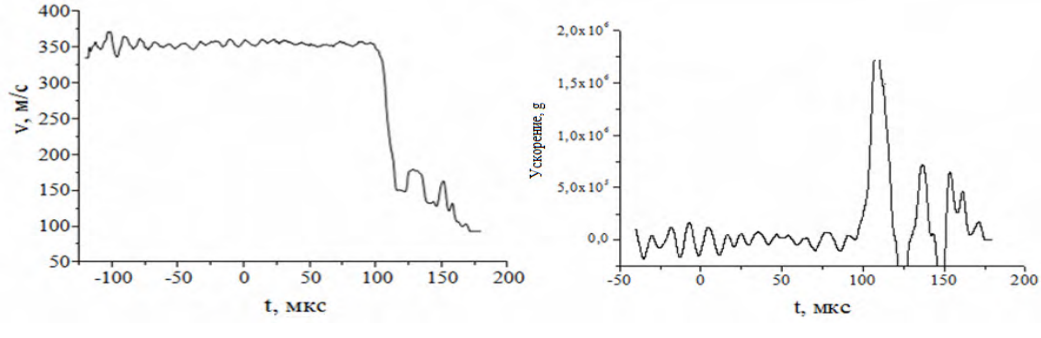
Регистрация перегрузок

Проведена отработка способа торможения снаряда-контейнера при взаимодействии со сплошной преградой из полиэтилена, результаты опыта приведены на рис. 5. Максимальное значение ускорения составило ~$2 \cdot 10^6 g$, половина длительности импульса $\tau_{1/2} \approx 15$мкс.

Проведено три опыта по способу торможения снаряда-контейнера при внедрении в крешерную систему.

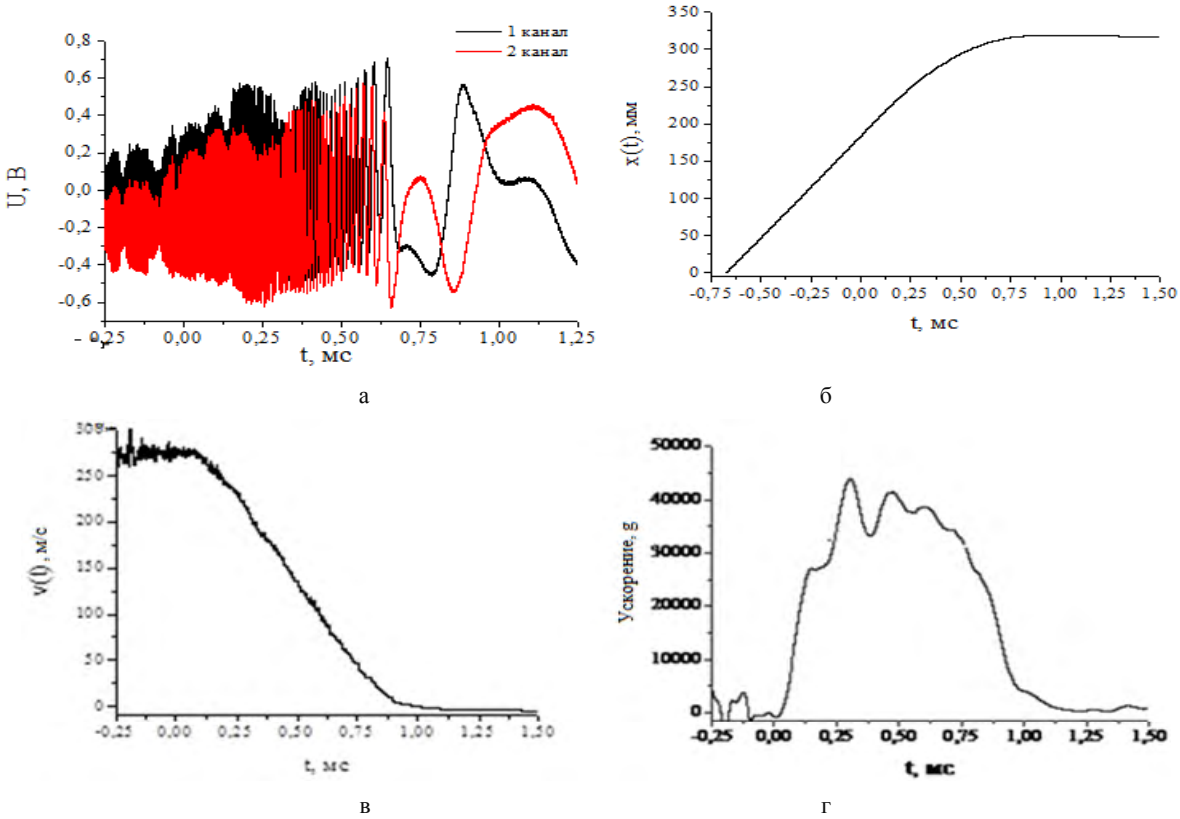
В первом опыте скорость снаряда W составила 275 м/с. Результаты обработки эксперимента представлены на рис. 6. Временная отметка «ноль» во всех экспериментах соответствует моменту времени пересечения снарядом ближнего к крешеру луча лазерного измерителя скорости. Максимальная перегрузка в опыте составила $a_m = 45000g$, половина длительности импульса $\tau_{1/2} = 0{,}75$ мс.

Во втором опыте скорость снаряда составила 375 м/с. Результаты обработки эксперимента представлены на рис. 7. Максимальная перегрузка $a_m = 70000$g, половина длительности импульса $\tau_{1/2} = 0{,}58$мс.



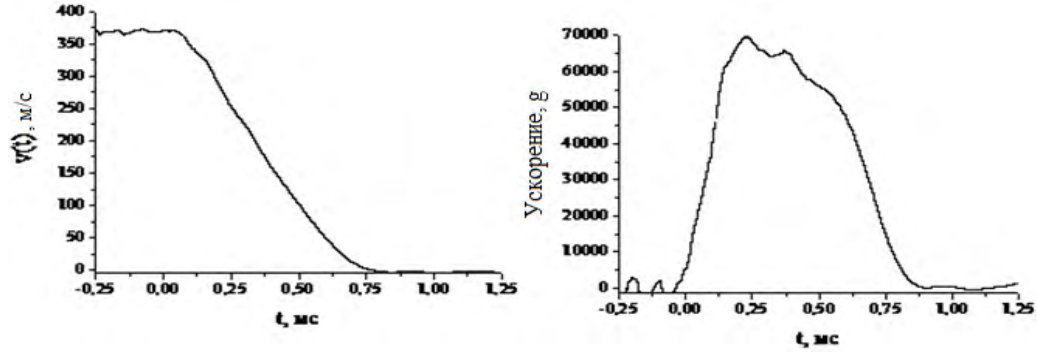
а б

Рис. 5. Зависимости характеристик снаряда от времени: а – скорости, б – ускорения



а б в г

Рис. 6. Результаты опыта с W = 275 м/с: а – интерферограмма полета снаряда, зависимости характеристик снаряда от времени: б – расстояния, в – скорости, г – ускорения



а б

Рис. 7. Зависимости параметров полета снаряда от времени: а – скорости, б – ускорения

В третьем опыте скорость снаряда составила 225 м/с. Зависимость ускорения от времени, полученная в опыте, представлена на рис. 8. Максимальная перегрузка составила 35000g, половина длительности импульса $\tau_{1/2}$ = 0,77мс.

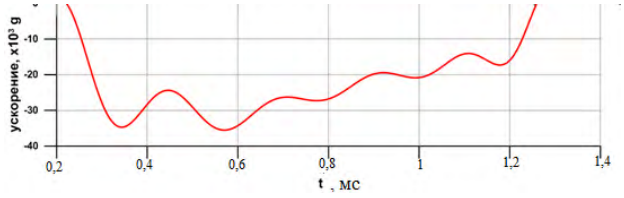


Рис. 8. Зависимость ускорения от времени

Заключение

Обосновано использование микроволновой диагностики с длиной зондирующего излучения 3,2 мм для регистрации параметров полета снаряда. Оценено максимальное значение перегрузки, которое может зарегистрировать радиоинтерферометр при торможении снаряда с 200 м/с до полной остановки, оно составило $6{,}25 \cdot 10^5$ g. Дана оценка минимальному времени регистрации этих процессов – 32 мкс.

Представлены результаты измерения кинематических параметров полета снаряда на комплексе при помощи микроволновой диагностики.

Применение методики позволяет регистрировать импульсы перегрузок при различных условиях нагружения:

1) при ускорении максимальная зарегистрированная перегрузка составила 5000 *g*;

2) при торможении о сплошную преграду максимальное значение ускорения составило ~$2 \cdot 10^6$ *g* и половиной длительности импульса $\tau_{1/2} \approx$ 15мкс;

3) при торможении через крешер максимальные амплитуды перегрузок составили до 70000 *g* и половинами длительности импульса от 0,58 до 0,77 мс.

Литература

1. Козлов В. И. Особенности конструкции взрывательных устройств к боеприпасам ствольной артиллерии и ракетным снарядам. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012.

2. Меркулова И. И., Козлов В. И. Тенденции и перспективы развития взрывательных устройств боеприпасов // Инженерный вестник. 2014. Эл. № ФС77-51036, № 10. С. 633–640.

3. Коленкин А. В., Гогин В. В., Стецкевич А. Д. Состояние и направления разработок многофункциональных взрывательных устройств за рубежом // Боеприпасы и высокоэнергетические конденсированные системы. 2016. Выпуск № 2.

4. Токарев В. А., Борисенок В. А. Евланов К. И. и др. Лабораторный комплекс для испытания элементов электроники на стойкость к перегрузкам // Международная конференция «XX Харитоновские тематические научные чтения» // Сборник тезисов. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2019.

5. Невозмущающие методы диагностики быстропротекающих процессов. Под ред. доктора техн. наук А. Л. Михайлова. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2015. С. 322.

МЕТОД РАСЧЕТА ЧИСЛА ДЕЛЕНИЙ В ВОДНОМ ИМПУЛЬСНОМ РЕАКТОРЕ ПО ВЫХОДУ ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ

А. В. Шуркаев, А. Д. Авдеев, А. Р. Дягель, С. П. Котков, С. О. Табаков, Д. А. Юнин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Водный импульсный ядерный реактор (ИЯР) ВИР-2М относится к классу апериодических импульсных реакторов самогасящегося действия «нулевой мощности» и представляет собой растворный вариант ИЯР, отличающийся простотой изготовления и эксплуатации, а также малым количеством делящегося материала, используемого в качестве топлива (в реакторе ВИР-2М – всего около 7 кг урана) [1, 2]. Особенности конструкции и эксплуатации реакторов типа ВИР [1] определяются тем, что в них ядерное топливо используется в виде раствора соли – уранилсульфата UO_2SO_4 в легкой воде. Топливный раствор (ТР) постоянно находится в герметичном корпусе, придающем топливной композиции компактную геометрическую форму, необходимую для получения интенсивных потоков нейтронов и гамма-квантов, и способном длительное время выдерживать значительные динамические нагрузки, которые возникают при работе реактора в режиме генерации мощных импульсов.

Реактор ВИР-2М может работать в двух режимах – импульсном и статическом.

Одной из важнейших характеристик любого реактора является энергия, выделенная в активной зоне (АЗ) за время работы реактора на мощности. Общепринятое название такой энергии – энерговыделение. Известно, что при делении одного ядра урана выделяется энергия ~200 МэВ [3]. Учитывая, что 1 эВ = $1{,}602 \cdot 10^{-19}$ Дж, получается, что выделившейся энергии в 1 МДж соответствует $3{,}1 \cdot 10^{16}$ делений. Таким образом, энерговыделение на реакторе ВИР-2М (как и на других реакторах) может измеряться, как в джоулях (Дж), так и в количестве делений (дел).

Важность контроля энерговыделения на ИЯР ВИР-2М связана прежде всего с обеспечением безопасной работы установки, а именно с не превышением установленных пределов динамических нагрузок на корпус установки во время генерации импульса.

Методы определения энерговыделения в АЗ реактора ВИР-2М

Традиционно на ИЯР ВИР-2М применяются следующие методы определения энерговыделения:

- по выходу гремучего газа (ГГ);
- по активационным индикаторам;
- по температуре корпуса АЗ.

Определение энерговыделения по выходу гремучего газа

Основным методом определения энерговыделения на реакторе ВИР-2М (как и на всех реакторах семейства ВИР) является метод, который базируется на измерении выхода гремучего газа ($2H_2 + O_2$), образующегося вследствие радиолиза воды топливного раствора осколками деления [4]. Энерговыделение E (в МДж) вычисляется по формуле:

$$E = \frac{V_{\text{нп}}}{G}\frac{\Delta P}{P}, \qquad (1)$$

где G – выход ГГ из ТР на единицу выделенной в АЗ энергии при нормальных условиях (н.у).; $V_{\text{нп}}$ – объем надтопливного пространства корпуса АЗ реактора ВИР-2М; ΔP – разница давления газа в надтопливном пространстве АЗ реактора до и после работы на мощности; P = 101,3 кПа – давление при н.у.

Принималось (как и на всех модификациях реакторов семейства ВИР), что выход ГГ из АЗ реактора ВИР-2М на 1 МДж энерговыделения равен примерно 4,5 нормальных литра (объем газа при н.у.).

К недостаткам этого метода можно отнести следующие факторы:

- неполный выход ГГ из ТР в пусках с малым энерговыделением приводит к занижению реально наработанного энерговыделения;
- не учитывается зависимость давления ГГ от температуры;
- так как сжигание ГГ производят через 20 мин после импульса, то часть радикалов ГГ успевает рекомбинировать;
- величина G по данным [4] может отличаться на 20 %.

Определение энерговыделения методом активационных детекторов

Количество делений в АЗ любого реактора можно определить по известному соотношению:

$$N = \Sigma_f V \overline{\Phi}_{\text{АЗ}}, \qquad (2)$$

где Σ_f – макроскопическое сечение деления в АЗ, $м^{-1}$; V – объем АЗ, $м^3$; $\overline{\Phi}_{\text{АЗ}}$ – средний по АЗ флюенс нейтронов, $м^{-2}$.

Методом активационных индикаторов [5] можно измерить флюенс нейтронов утечки ($\overline{\Phi}$) в определенной (калиброванной) точке:

$$\overline{\Phi} = \frac{A}{\overline{\sigma}}, \qquad (3)$$

где A – активационный интеграл; $\overline{\sigma}$ – среднее микроскопическое сечение для данного индикатора в калиброванной точке, м^2.

Полагая, что флюенс нейтронов утечки пропорционален среднему по АЗ флюенсу нейтронов, можно записать:

$$\overline{\Phi}_{\text{АЗ}} = k\overline{\Phi}, \qquad (4)$$

где k – коэффициент неравномерности.

Таким образом, соотношение (2) можно переписать в следующем виде:

$$N = \Sigma_f V k \frac{A}{\overline{\sigma}}, \qquad (5)$$

или

$$E = KA, \qquad (6)$$

где K – коэффициент перевода активационного интеграла в энерговыделение, МДж.

К недостаткам этого метода можно отнести следующие факторы:

– необходимость проведения предварительной калибровки для установления коэффициента К;

– непостоянство формы распределения плотности делений по высоте и радиусу АЗ, вызываемое возмущениями от облучаемых образцов, приводит к изменению коэффициента неравномерности k, а, следовательно, и коэффициента K, что в итоге приводит к внесению дополнительной погрешности при определении энерговыделения.

Определение энерговыделения в АЗ по температуре корпуса реактора

Определение энерговыделения в АЗ реактора ВИР-2М осуществляется путем измерения температуры корпуса реактора спустя 20 минут после импульса мощности [3], так как к этому времени устанавливается равновесное состояние теплопередачи от разогретого топливного раствора к корпусу активной зоны и температура корпуса остается некоторое время (~5 минут) стабильной. Затем наступает спад температуры за счет принудительного охлаждения корпуса реактора системой охлаждения или за счет естественной отдачи тепла в окружающее пространство. Этому стабильному (~5 минут) значению температуры соответствует (линейная зависимость) энерговыделение в активной зоне реактора за время импульса.

$$E = K_T T, \qquad (7)$$

где K_T – коэффициент перевода температуры корпуса АЗ в энерговыделение, МДж/°С; T – температура корпуса АЗ.

Однако это значение энерговыделения имеет лишь характер дополнительной и оперативной информации о энергии произведенного импульса, потому что температура корпуса после импульса зависит не только от энерговыделения, но и от предыстории работы реактора до импульса. Так, на температуру корпуса оказывают влияние следующие факторы: время, прошедшее после предыдущего импульса, продолжительность работы системы принудительного охлаждения корпуса, работа вентиляционной системы в залах установки.

Недостатком этого метода является необходимость проведения предварительной калибровки для установления коэффициента K_T, а также невозможность применения данного метода в статическом режиме работы ИЯР ВИР-2М.

Из анализа выше описанных методов определения энерговыделения можно сделать следующие выводы:

– высокая погрешность определения энерговыделения по выходу ГГ (20 %) не позволяет использовать данный метод для калибровки остальных методов;

– необходим дополнительный метод определения абсолютного энерговыделения, обладающий достаточно низкой погрешностью.

Таким альтернативным методом может стать метод определения числа делений по выходу продуктов деления (ПД).

Метод расчета числа делений в импульсном реакторе по выходу продуктов деления

Когда ядро делящегося материала расщепляется на два ядра, то образующиеся осколки имеют слишком большое отношение числа нейтронов к числу протонов, чтобы быть устойчивыми. Даже после испускания мгновенных нейтронов отношение числа нейтронов к числу протонов во многих случаях остается вне области устойчивости для данного массового числа. Образовавшиеся ПД радиоактивны и испускают отрицательные β-частицы. Примером является ниже приведенная цепочка распада, содержащая барий и лантан, которая привела к открытию деления урана:

$$^{140}_{54}\text{Xe} \xrightarrow{16\ \text{сек}} {}^{140}_{55}\text{Cs} \xrightarrow{66\ \text{сек}} {}^{140}_{56}\text{Ba} \xrightarrow{12{,}8\ \text{дня}} {}^{140}_{57}\text{La} \xrightarrow{40\ \text{часов}} {}^{140}_{58}\text{Ce}$$

(стабилен)

Очевидно, что соотношение для изменения числа атомов первично образовавшегося продукта деления в импульсе ИЯР ВИР-2М имеет вид:

$$\frac{dN_0(t)}{dt} = -\lambda_0 N_0(t), \qquad (8)$$

$$N_0(t_0) = \omega_0 N_0^f, \qquad (9)$$

$$\lambda_0 = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}, \qquad (10)$$

где λ_0 – постоянная распада первичного ПД; $T_{1/2}$ – период полураспада; ω_0 – кумулятивный выход пер-

вичного ПД; $N_0(t)$ – число атомов первичного ПД в момент времени t; $N_0(t_0)$ число атомов первичного ПД в начальный момент времени t_0; N_0^f – число делений в импульсе.

Полагая, что импульс произошел мгновенно, соотношения (8) и (9) можно записать следующим образом:

$$N_0(t) = \omega_0 N_0^f e^{-\lambda_0 t}, \quad (11)$$

В случае N независимых импульсов (статических пусков) выражение (11) примет вид:

$$N_0(\tau) = \omega_0 \sum_{i=1}^{N} N_i^f e^{-\lambda_0(\tau - t_i)}, \quad (12)$$

где t_i – момент времени i-ого пуска ИЯР, τ – момент времени измерения активности ПД. Суммирование числа делений от статических пусков в данном случае предполагается производить путем разбиения делений в статическом пуске на некоторое (в зависимости от периода полураспада ПД) количество импульсных пусков.

Соответственно, измеряемая активность (в момент времени τ) продукта деления после серии N независимых импульсов будет определяться как:

$$A_0(\tau) = \frac{\lambda_0 \omega_0}{V_{\text{АЗ}}} \sum_{i=1}^{N} N_i^f e^{-\lambda_0(\tau - t_i)}, \quad (13)$$

где $V_{\text{АЗ}}$ – объем ТР ИЯР ВИР-2М.

Разделим данное соотношение на общее число делений в реакторе, произошедших за N импульсов (статик):

$$N^f = \sum_{i=1}^{N} N_i^f, \quad (14)$$

Получаем соотношение:

$$\frac{A_0(\tau)}{N^f} = \frac{\lambda_0 \omega_0 \sum_{i=1}^{N} N_i^f e^{-\lambda_0(\tau - t_i)}}{V_{\text{АЗ}} N^f}, \quad (15)$$

Известно, что энерговыделение в активной зоне реактора ВИР-2М пропорционально числу делений:

$$k_i = \frac{N_i^f}{N^f} = \frac{E_i}{E}, \quad (16)$$

где E_i – энерговыделение, определенное по относительной методике определения энерговыделения, в i-ом импульсе, E – сумма энерговыделений за N импульсов.

Подставляя данное выражение в (15), получим:

$$N_f(\tau) = \frac{A_0(\tau) V_{\text{АЗ}}}{\lambda_0 \omega_0 \sum_{i=1}^{N} k_i e^{-\lambda_0(\tau - t_i)}}, \quad (17)$$

Поскольку пробы ТР из АЗ реактора ВИР-2М берутся с некоторой периодичностью, число делений за время между взятиями проб определяется следующим соотношением:

$$N_f(\Delta\tau) = \frac{A_0(\tau^{\text{тек}}) - A_0(\tau^{\text{пред}}) e^{-\lambda_0 \Delta\tau}}{\lambda_0 \omega_0 \sum_{i=1}^{N} k_i e^{-\lambda_0(\tau - t_i)}} V_{\text{АЗ}}, \quad (18)$$

где $A_0(\tau^{\text{пред}})$ – активность, измеренная при взятии проб в предыдущий период; $\tau^{\text{тек}}$ – момент времени измерения активности текущей пробы; $\tau^{\text{пред}}$ – момент времени измерения активности предыдущей пробы; $\Delta\tau = \tau^{\text{тек}} - \tau^{\text{пред}}$ – разница времени при измерении активностей $A_0(\tau^{\text{тек}})$ и $A_0(\tau^{\text{пред}})$.

Рассматриваемое время $\Delta t_i = \tau - t_i$ для конкретного ПД бралось не более 6,7 периодов его полураспада $\left(\Delta t_i^{\max} \le 6,7 \cdot T_{1/2}\right)$. В этом случае величина $e^{-\lambda_0 \Delta t_i} = 0,0096$, т. е. в расчетах не учитывались импульсы, которые давали вклад в активность на момент измерения менее 0,96 % от изначальной (в момент генерации импульса). Суммарное энерговыделение при этом также бралось только за это время.

Результаты расчетов числа делений по измеренной активности проб ТР

В соответствии с соотношением (18) были проведены расчеты числа делений за период с 2006 по 2017 гг. Пробы ТР брались в 2006, 2011, 2015 и 2017 гг.

В расчетах использовались следующие константы [6], приведенные в табл.1:

Таблица 1

Свойства продуктов деления

ПД	Период полураспада ($T_{1/2}$), день	Постоянная распада (λ_0), $с^{-1}$	Кумулятивный выход ПД (ω_0), отн. ед.
$^{95}_{40}$Zr	64,02	1,25E-07	0,062
$^{141}_{58}$Ce	32,5	2,47E-07	0,060
$^{144}_{58}$Ce	284,9	2,82E-08	0,060
$^{103}_{44}$Ru	39,26	2,04E-07	0,030
$^{106}_{44}$Ru	373,6	2,15E-08	0,0038
$^{140}_{56}$Ba	12,8	6,27E-07	0,063

Объем ТР принимался равным 104±1 л.

В табл. 2 приведены результаты измерения удельной активности ПД.

Таблица 2

Результаты анализа образцов растворов топлива

ПД	Дата измерения активности	Измеренная удельная активность $(A_0(\tau))$, Бк/л
$^{95}_{40}$Zr	13 июля 2006	$1{,}71\cdot10^{9}$
	7 сентября 2011	$9{,}70\cdot10^{8}$
	24 сентября 2015	$1{,}95\cdot10^{8}$
	10 июля 2017	$1{,}19\cdot10^{9}$
$^{141}_{58}$Ce	13 июля 2006	$1{,}32\cdot10^{9}$
	7 сентября 2011	$2{,}38\cdot10^{8}$
	24 сентября 2015	$3{,}50\cdot10^{6}$
	10 июля 2017	$6{,}61\cdot10^{8}$
$^{144}_{58}$Ce	13 июля 2006	$2{,}84\cdot10^{9}$
	7 сентября 2011	$1{,}93\cdot10^{9}$
	24 сентября 2015	$5{,}60\cdot10^{8}$
	10 июля 2017	$1{,}25\cdot10^{9}$
$^{103}_{44}$Ru	13 июля 2006	$8{,}51\cdot10^{8}$
	7 сентября 2011	$1{,}84\cdot10^{8}$
	24 сентября 2015	$2{,}92\cdot10^{7}$
	10 июля 2017	$4{,}02\cdot10^{8}$
$^{106}_{44}$Ru	13 июля 2006	$2{,}69\cdot10^{8}$
	7 сентября 2011	$1{,}47\cdot10^{8}$
	24 сентября 2015	$4{,}50\cdot10^{7}$
$^{140}_{56}$Ba	13 июля 2006	$3{,}03\cdot10^{8}$
	10 июля 2017	$7{,}33\cdot10^{8}$

По результатам анализов проб топливного раствора, а также по измерениям энерговыделения на установке ВИР-2М было рассчитано число делений в активной зоне реактора за рассматриваемые периоды времени. В табл. 3 и 4 показаны результаты расчетов. Значения энерговыделения, представленные в данных таблицах, соответствуют значениям суммарного энерговыделения, определенного за рассматриваемый период времени по выходу ГГ. В суммирование включены только те пуски, с которых на момент измерения активности, осталось не распавшимся не менее 4 % ядер рассматриваемого ПД. Соответственно, рассматриваемый период ограничивался 6,7 периодам полураспада конкретного ПД.

При расчетах использовались следующие приближения:

– погрешность измерения активности равна 10 %;

– погрешность определения промежутка времени между двумя измерениями активностей $\Delta\tau$ принималась, равной 1 суткам;

– энерговыделение по выходу ГГ определено с погрешностью 20 %;

– время от i-го импульса до момента измерения активности продукта деления определено с точностью Δt_i = 1сут.

Таблица 3

Результаты расчетов числа делений по результатам измерения активности ПД за 2006 и 2011 г.

ПД	Дата измерения активности					
	13 июля 2006			7 сентября 2011		
	Рассматриваемый период (Δt_i^{max}), день	Энерговыделение (E), ГДж	Количество делений (N_f), $\cdot10^{20}$ дел	Рассматриваемый период(Δt_i^{max}), день	Энерговыделение (E), ГДж	Количество делений (N_f), $\cdot10^{20}$ дел
$^{95}_{40}$Zr	429±1	8,2±1,5	2,0±0,4	429±1	6,2±1,1	2,1±0,4
$^{141}_{58}$Ce	218±1	4,4±0,8	1,6±0,3	218±1	3,4±0,6	1,1±0,2
$^{144}_{58}$Ce	1909±1	28,8±5,2	8,0±1,6	1787±1	23,4±4,2	6,9±1,4
$^{103}_{44}$Ru	263±1	5,1±0,9	1,9±0,4	263±1	4,4±0,8	1,4±0,3
$^{106}_{44}$Ru	–	–	–	1787±1	23,4±4,2	7,6±1,5

Таблица 4

Результаты расчетов числа делений по результатам измерения активности ПД за 2015 и 2017 г.

ПД	Дата измерения активности					
	24 сентября 2015			10 июля 2017		
	Рассматриваемый период (Δt_i^{max}), день	Энерговыделение (E), ГДж	Количество делений (N_f), $\cdot10^{19}$ дел	Рассматриваемый период (Δt_i^{max}), день	Энерговыделение (E), ГДж	Количество делений (N_f), $\cdot10^{19}$ дел
$^{95}_{40}$Zr	429±1	1,8±0,3	7,1±1,4	429±1	4,4±0,8	13,0±2,6
$^{141}_{58}$Ce	218±1	1,1±0,2	4,1±0,8	218±1	2,1±0,4	5,9±1,2
$^{144}_{58}$Ce	729±1	3,1±0,6	10,1±2,0	706±1	6,3±1,1	15,9±3,2
$^{103}_{44}$Ru	263±1	1,3±0,2	4,6±0,9	263±1	2,3±0,4	6,6±1,3
$^{106}_{44}$Ru	729±1	3,1±0,6	11,4±2,3	706±1	6,3±1,1	16,5±3,3
$^{140}_{56}$Ba	–	–	–	86±1	1,4±0,3	3,6±0,7

По полученным результатам была построена зависимость числа делений, рассчитанных по измеренной активности различных ПД, от энерговыделения, определенного по выходу ГГ. График зависимости представлен на рис. 1.

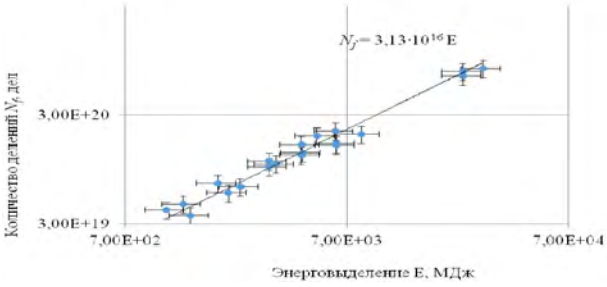


Рис. 1. График зависимости числа делений, рассчитанных по измеренной активности различных ПД, от энерговыделения, определенного по выходу ГГ

Из рис. 1. видно, что количество делений, рассчитанное по представленным ПД, линейно зависит от энерговыделения в АЗ ИЯР ВИР-2М. Причем тангенс угла наклона аппроксимирующей прямой соответствует числу деления на 1 МДж и равен $\sim 3{,}13 \cdot 10^{16}$ дел/МДж.

Заключение

В работе рассмотрен метод определения энерговыделения в АЗ ИЯР ВИР-2М по выходу ПД. Данный метод основан на спектроскопическом анализе проб ТР и пересчете измеренной активности различных ПД в количество делений. Расчет проводился по измеренной активности шести продуктов деления: ${}^{95}_{40}\mathrm{Zr}$; ${}^{141}_{58}\mathrm{Ce}$; ${}^{144}_{58}\mathrm{Ce}$; ${}^{103}_{44}\mathrm{Ru}$; ${}^{106}_{44}\mathrm{Ru}$; ${}^{140}_{56}\mathrm{Ba}$. Описанным методом удалось рассчитать число делений в реакторе ВИР-2М за периоды времени с 2006 по 2017 гг. С помощью метода определения энерговыделения по выходу ГГ и метода по определению количества делений было получено число делений урана на один МДж выделенной в АЗ ИЯР ВИР-2М энергии, равное $3{,}13 \cdot 10^{16}$ дел/МДж, что практически равно теоретическому значению $3{,}1 \cdot 10^{16}$ дел/МДж.

Описанный метод можно применять для оценки числа делений в АЗ ВИР-2М и связанного с ним выгорания. Применяемый на сегодняшний день спектроскопический метод измерения концентрации делящегося нуклида в ТР реактора ВИР-2М не позволяет провести подобную оценку по следующим причинам:

– выгорание в АЗ ВИР-2М за 700 импульсных пусков (проектное ограничение нагрузки на корпус АЗ) номинальной мощности (56 МДж) составляет около 0,5 г;

– погрешность измерения концентрации ${}^{235}_{92}\mathrm{U}$ составляет около 3 г/л;

Данный метод можно применять для оценки числа делений в импульсных реакторах за достаточно широкий диапазон времени (от нескольких месяцев до нескольких десятков лет). Теоретически возможно определять число делений и за достаточно короткий период времени, но в этом случае задача усложняется технологическими трудностями, связанной с измерениями активности короткоживущих ПД.

Кроме того, данный метод может служить для калибровки относительных методик определения энерговыделения на импульсных ядерных установках.

Литература

1. Колесов В. Ф. Апериодические импульсные реакторы. Саров: ФГУП «РФЯЦ–ВНИИЭФ», 1999. С. 1032.

2. Воинов А. М., Колесов В. Ф., Матвеенко А. С., Мельников С. Ф., Левицкий И. В., Маслов Г. Н., Павловская Л. М., Самодуров Л. А., Гладков В. С. Водный импульсный реактор ВИР-2М и его предшественники // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 1990. Вып. 3. С. 3–15.

3. Лукин А. В. Основы физики импульсных ядерных реакторов. Снежинск: ФГУП «РФЯЦ–ВНИИТФ», 2005. С. 438.

4. Boyle J. W., Hochanadel C. J., Sworsky T. J., Ghormley J. A., Kieffer W. F. The Decomposition of Water by Fission Recoil Particles / Международная конференция по мирному использованию атомной энергии, Женева, 8-20 августа 1955 г. // Материалы конференции. Т. 7. Ядерная химия и действие излучения.

5. Нефедов Ю. Я., Пунин В. Т. Методы диагностики параметров высокоинтенсивных импульсных источников ионизирующих излучений: Курс лекций. Саров: ФГУП «РФЯЦ–ВНИИЭФ», 2010. С. 125.

6. Грешилов А. А., Колобашкин В. М., Дементьев С. И. Продукты мгновенного деления ${}^{235}\mathrm{U}$, ${}^{238}\mathrm{U}$, ${}^{239}\mathrm{Pu}$ в интервале 0–1 ч. Справочник. М.: Атомиздат, 1969. С. 104.

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРЕВА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ НЕПРЕРЫВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

В. М. Ямщиков, Д. С. Тимаев, Г. Н. Качалин, Е. А. Кудряшов, В. Г. Рогачев

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Приведены результаты экспериментов и численного моделирования по воздействию непрерывного лазерного излучения высокой интенсивности на оптические элементы с отражающим диэлектрическим покрытием, при котором наблюдался нагрев образцов. С использованием, разработанного в ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» программного комплекса «ЛОГОС», рассматривались различные комбинации интенсивности излучения и толщин диэлектрических слоев.

Введение

Мощные непрерывные лазеры находят широкое применение в различных системах технологического назначения. В оптических системах данных лазеров используются различные оптические элементы (ОЭ). Одними из основных ОЭ являются зеркала с диэлектрическим покрытием. При нанесении покрытий важно соблюдение высокой технологической точности толщин слоев отражающего покрытия. Под воздействием мощного лазерного излучения даже при небольшом отклонении в толщине слоя возможен заметный нагрев ОЭ, в результате которого образуются искажения волнового фронта, что оказывает влияние на выходные характеристики лазера. Возможно также разрушение ОЭ.

В данной работе приведены результаты исследования нагрева оптических элементов с отражающим диэлектрическим покрытием в поле непрерывного лазерного излучения, при варьировании толщины слоев. Сформулированы требования по допустимым отклонениям толщины покрытий для уменьшения нагрева образцов.

Эксперимент

Экспериментальная установка

Экспериментальные исследования по воздействию непрерывного лазерного излучения ближнего инфракрасного (ИК) диапазона на оптические элементы с диэлектрическим покрытием были проведены на экспериментальном стенде, принципиальная схема которого представлена на рис. 1 [1].

Стенд, рис. 1, включает в себя: лазерную кювету с источником накачки *2*, систему формирования излучения генерации (резонатор), систему измерения параметров лазерного излучения *7, 9*, оптическую систему формирования пространственных и угловых характеристик лазерного излучения *5* на исследуемом оптическом элементе *6*.

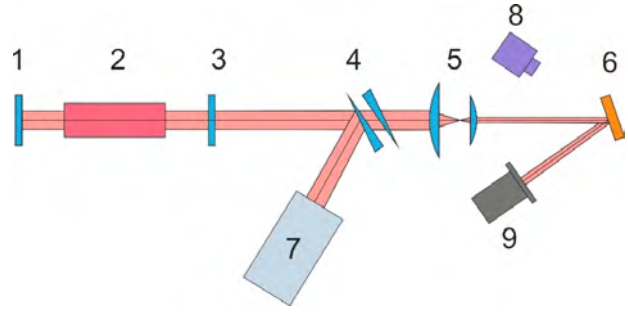


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментального стенда по исследованию воздействия лазерного излучения на оптические элементы: 1, 3 – глухое и выходное зеркала резонатора, 2 – кювета лазера с источником накачки, 4 – два клина установленные в положении компенсации углового увода оптической оси лазерного излучения, 5 – перестраивающая оптическая система, 6 – исследуемый оптический элемент, 7, 9 – система измерения параметров лазерного излучения, 8 – тепловизор

Для поддержания постоянного уровня выходной мощности лазерного излучения использовалось адаптивное глухое зеркало *1* [2–3]. Варьирование выходной мощности лазерного излучения проводилось посредством модуляции мощности накачки.

Часть излучения отводилась кварцевым клином *4* на систему измерения выходных параметров лазерного излучения. Для компенсации углового ухода луча в оптическую схему устанавливался дополнительный клин *4*, с разворотом на угол 180 градусов относительно оси лазерного излучения. Обе грани второго клина были просветлены на длину волны лазерного излучения. По результатам измерений отражение от просветлённой поверхности не превышало 0,2 %.

Измерение мощности генерации проводилось с помощью термоэлектрического измерителя OPHIR FL500A. Точность измерения составляла ±3 %.

Воздействию подвергался образец с узкополосным отражающим диэлектрическим покрытием (Nb_2O_5/SiO_2 33 слоя), нанесенным на кварцевую подложку диаметром D = 100 мм и толщиной h = 10 мм. Рабочая поверхность образца до испытаний покрыта защитным лаком. Заявленный производителем ко-

эффициент отражения покрытия для ближнего ИК диапазона составлял $R > 99{,}9$ %, лучевая прочность – не менее 10 кВт/см^2. Погрешность толщин при нанесении слоев составляла 2 %.

Длительность воздействия лазерного излучения на поверхность образца в экспериментах составляла 100 с. В процессе воздействия регистрировались: зависимость от времени мощности излучения, распределение интенсивности излучения в плоскости образца и температуры поверхности диэлектрического покрытия (измерялась тепловизором). Погрешность измерения температуры составляла $\Delta T = \pm 1$ °С. Область воздействия на образце представляла собой равнобедренную трапецию с площадью $S = 4{,}1$ см^2. Усредненная интенсивность излучения варьировалась от 1 до 2,1 кВт/см^2.

Результаты эксперимента

В результате экспериментов были зарегистрированы изменения температуры поверхности ОЭ за время воздействия $\Delta T \approx 10$–15 °С при плотности мощности $q = 1$; 1,14 кВт/см^2 и $\Delta T \approx 30$ °С при $q = 1{,}52$ кВт/см^2 (рис.2). Следует отметить, что при заявленном производителем коэффициенте отражения покрытия для $R > 99{,}9$ % изменение температуры поверхности не должно превышать $\Delta T \approx 1$ °С. Такое противоречие можно объяснить наличием области объемного поглощения в слоях (слое) диэлектрического покрытия (обусловленном наличием центров поглощения), или несоответствием величины коэффициента отражения покрытия заявленному значению.

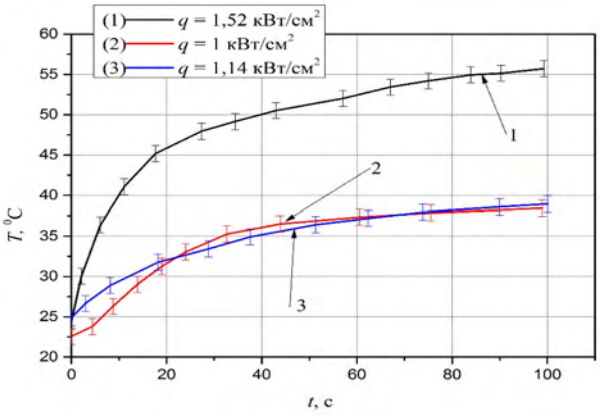


Рис. 2. Временная зависимость температуры поверхности диэлектрического напыления для разных значений интенсивности лазерного излучения

Для проверки данных предположений было проведено расчётное моделирование по воздействию непрерывного лазерного излучения высокой интенсивности на оптические элементы с отражающим диэлектрическим покрытием.

Численное моделирование

Постановка задачи

Исходя из условий эксперимента, моделируемый оптический элемент, подвергавшийся воздействию непрерывного лазерного излучения, представлял собой диск, с плоскопараллельными торцами, изготовленный из кварца с малым коэффициентом поглощения с соответствующим диэлектрическим покрытием. Для иллюстрации на рис. 3 представлена геометрическая модель исследуемого образца.

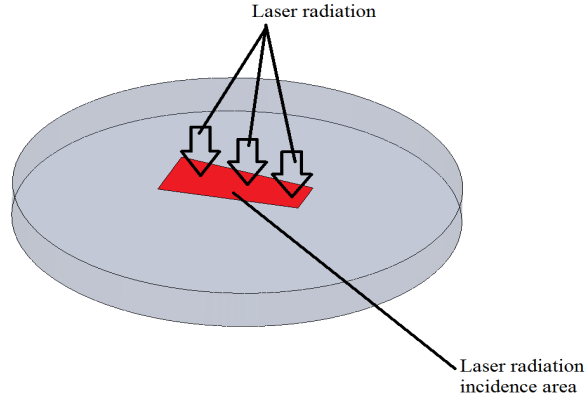


Рис. 3. Геометрическая модель исследуемого образца

Моделируемый оптический элемент имел следующие размеры: радиус $R = 50$ мм, толщина $h = 10$ мм. В расчеты закладывались теплофизические характеристики кварца(SiO_2) и Nb_2O_5 [4].

Конвективный теплообмен с окружающей средой не учитывался. Моделирование проводилось с использованием пакета программ «ЛОГОС» [5]. Для построения расчетной сетки использовались неструктурированные сетки, состоящие из 8-узловых шестигранников.

Расчет нагрева образца с диэлектрическим покрытием

В соответствии с выдвинутыми ранее предположениями нагрев многослойного диэлектрического покрытия может объясняться двумя причинами:

1) объемное поглощение в слоях диэлектрического покрытия;

2) поверхностное поглощение одного или нескольких слоев при условии, что коэффициент отражения покрытия меньше заявленного.

Для расчета коэффициента объемного поглощения в слоях, как функции от толщины, необходим интегральный коэффициент отражения покрытия. Для его определения использовался матричный метод расчета распространения электромагнитного излучения в многослойных структурах [6].

С использованием паспортных данных параметров слоев для исследуемого покрытия, рассчитана зависимость коэффициента отражения от длины волны лазерного излучения, приведенная на рис. 4 (рабочая длина волны нанесена вертикальной линией). Был определен коэффициент отражения R = 99,991 % для длины волны лазера. При учете погрешности в нанесении слоев коэффициент отражения может принять значения R_{min} = 99,9869 % и R_{max} = 99,993 %.

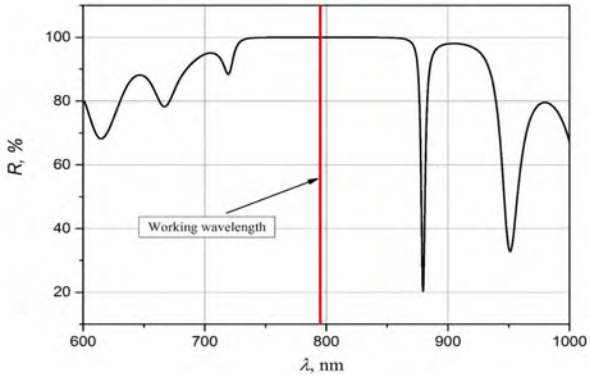


Рис. 4. Зависимость коэффициента отражения покрытия от длины волны

Зная показатель преломления SiO_2 и Nb_2O_5, а также значение толщин можно получить зависимость поглощения излучения от толщины слоя. Полагая, что изменение интенсивности лазерного излучения, при прохождении через поглощающий слой, подчиняется закону Бугера–Ламберта–Бэра, можно получить формулу для определения поглощенного излучения:

$$I_{absorb} = q_0\left(1-\exp(-\alpha h)\right), \qquad (1)$$

где α (см$^{-1}$) – коэффициент поглощения, h (см) – толщина диэлектрического слоя, q_0 (Вт/см^2) – интенсивность лазерного излучения.

В данной работе $\alpha \cdot h << 1$, что позволяет пользоваться упрощенным выражением:

$$I_{absorb} = q_0 \alpha h. \qquad (2)$$

Тогда количество поглощенной энергии в i – ом слое диэлектрика выразиться следующим образом:

$$I_{absorb}(i) = q_0 \alpha h_i (1-R_1)(1-R_2)\cdot\ldots\cdot(1-R_i), \qquad (3)$$

где R_i – интегральный коэффициент отражения i-го слоя, h_i (см) – толщина i-го слоя.

Расчет поглощенного излучения по формуле (3) позволяет получить зависимость поглощения излучения от толщины (рис. 5). На этом рисунке по оси ординат отложена поглощаемая интенсивность, которая нормирована на поглощаемую интенсивность в первом слое.

Объемное поглощение в покрытии может быть выражено зависимостью:

$$Q = q\delta W(z), \qquad (4)$$

где δ (см$^{-1}$) – усредненный коэффициент объемного поглощения лазерного излучения, q (Вт/см^2) – интенсивность лазерного излучения, $W(z)$ – полиномиальная функция поглощения излучения от толщины.

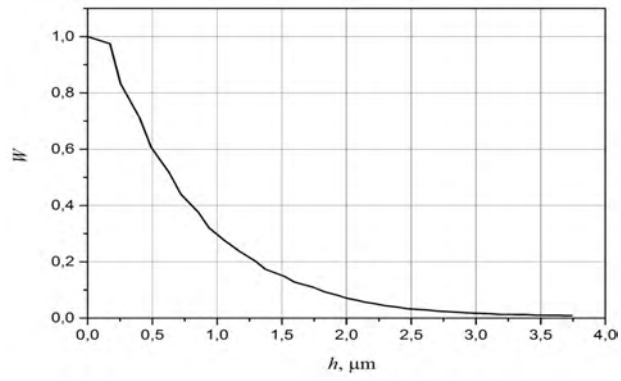


Рис. 5. Зависимость поглощения излучения от толщины покрытия

Моделирование проводилось в пакете программ «ЛОГОС». Покрытие рассматривалось, как единый материал с усредненными теплофизическими свойствами. Путем варьирования усредненного коэффициента объемного поглощения слоев необходимо получить температуры поверхностей ОЭ, наблюдаемые в эксперименте. Однако, даже при увеличении коэффициента до $2\cdot10^{-3}$ см$^{-1}$ предполагаемого нагрева не наблюдалось. Отсюда следует, что данный процесс не являлся причиной таких температур поверхностей.

Далее было сделано второе предположение о том, что коэффициент отражения покрытия меньше заявленного и часть проходимого излучения поглощается поверхностью одного или нескольких слоев из-за наличия в них центров поглощения.

В данном варианте расчетов в силу малости толщины покрытия и близких значений теплофизических свойств кварца и Nb_2O_5 использовались свойства кварца, а слои задавались единым целым вместе с подложкой. На область воздействия накладывалось граничное условие 2-го рода (тепловой поток) в виде:

$$q = q_f \varepsilon_f, \qquad (5)$$

где q_f (Вт/см^2) – интенсивность лазерного излучения, ε_f – коэффициент поверхностного поглощения.

Методом итерационных расчетов был подобран коэффициент поверхностного поглощения $\varepsilon_f \approx 0{,}0003$, при котором расчетный нагрев находился в хорошем согласии с экспериментальным. Результаты расчета приведены на рис. 6.

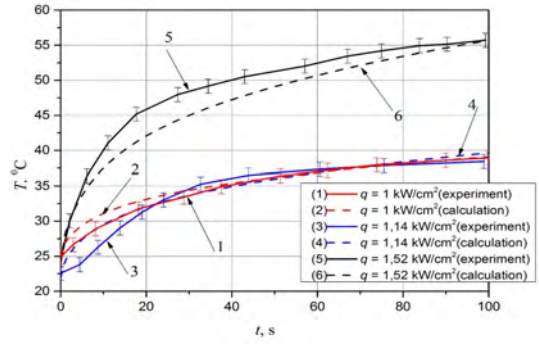


Рис. 6. Временная зависимость температуры поверхности образца с многослойным покрытием для различных значений интенсивности лазерного излучения

Из рис. 6 видно, что характер зависимости, как и значение температур поверхности, находятся в хорошем согласии с экспериментом. Данный факт означает, что выдвинутое предположение может объяснять полученные в экспериментах температуры поверхностей. Следует заметить, что возникновение поверхностного поглощения в слоях может наблюдаться только в случае, если коэффициент отражения покрытия отличается от заявленного. Такое может произойти при нанесении слоев с погрешностью порядка 5 % и более, в отчетных документах по покрытиям указывается погрешность в 2 %. Отсюда следует вывод, что для недопущения нежелательного нагрева образцов, нужно повышать требования по контролю толщин и качеству наносимых слоев.

Заключение

Проведено расчетно-экспериментальное исследование нагрева кварцевой пластины с многослойным диэлектрическим покрытием непрерывным лазерным излучением.

Получены экспериментальные и расчетные зависимости температуры поверхности ОЭ от времени для различных вариантов интенсивности воздействия лазерного излучения.

Хорошее согласие расчетных и экспериментальных результатов указывает на то, что вероятной причиной нагрева ОЭ является наличие поверхностного поглощения одного или нескольких слоев. Возникновение поверхностного поглощения может быть связано с отклонением значения коэффициента отражения от заявленного, а также от качества нанесения самих слоев.

Литература

1. Деркач И. Н., Кудряшов Е. А., Качалин Г. Н., Кирдяев Н. А., Ладейщикова В. В., Тимаев Д. С. // Письма в ЖЭТФ. 2018. Т. 108. Вып. 6. С. 404.
2. Garanin S., Khokhlov S., Manachinsky A., Starikov F. Advances in Science and Technology. Switzerland: Trans Tech Publications, 2013. Vol. 82. P. 75.
3. Гаранин С. Г., Маначинский А. Н., Стариков Ф. А., Хохлов С. В. Автометрия 48. 2012. № 2. С. 30.
4. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1967.
5. Пакет программ «ЛОГОС», версия 5. Свидетельство № 2017612306 от 20.02.2017.
6. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. Изд. 2-е. перевод с английского. М.: Наука, 1973.

СЕКЦИЯ 3

Инженерные науки

Председатели секции:
д-р техн. наук А. А. Юхимчук
канд. техн. наук В. Б. Профе
канд. техн. наук К. В. Троцюк

МНОГОКАНАЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО ГАЛЬВАНИЧЕСКОЙ РАЗВЯЗКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СИГНАЛОВ В ДВУХПРОВОДНЫХ ЛИНИЯХ СВЯЗИ

А. С. Анашкин, А. И. Гутников, Р. М. Пискунов, А. С. Краевский, В. П. Леушев, Т. А. Леушева

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Процесс организации измерительной системы для стендовых испытаний является не тривиальной задачей, он имеет массу вопросов, которые должен решить инженер-испытатель. Как правильно осуществить безошибочное измерение сигналов? Как защититься от наводок и помех по общей шине? Как организовать жгутовые соединения? А иногда даже как не вывести из строя дорогостоящее измерительное оборудование?

Одним из таких проблемных вопросов стала задача многоканального измерения высоковольтных сигналов измерительно-вычислительным комплексом МИК-300М (НПП «Мера» г. Мытищи). Задача требовала разработки многоканального устройства гальванической развязки между объектом контроля и МИК-300М для защиты от помех.

Пример организации измерительной системы испытательного стенда приведен на рис. 1.

Для решения задачи был проведен анализ известных устройств. Гальваническая развязка, как правило, обеспечивается элементами без непосредственной электрической связи, но с возможностью передавать и ограничивать сигналы – это такие элементы, какоптопары, трансформаторы и конденсаторы. Однако данные элементы не передают непрерывные аналоговые сигналы и поэтому сначалануж-но преобразовать (модулировать) аналоговый сигнал в импульсный, потом подать на элемент развязки, а затем преобразовать (демодулировать) обратно в непрерывный аналоговый сигнал (см. рис. 2). Кроме этого требовалось обеспечить:

– количество независимых каналов 8/16;

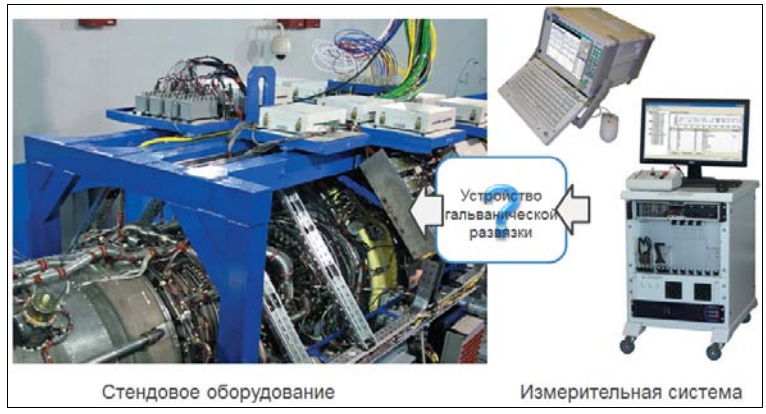


Рис. 1. Пример организации измерительной системы испытательного стенда

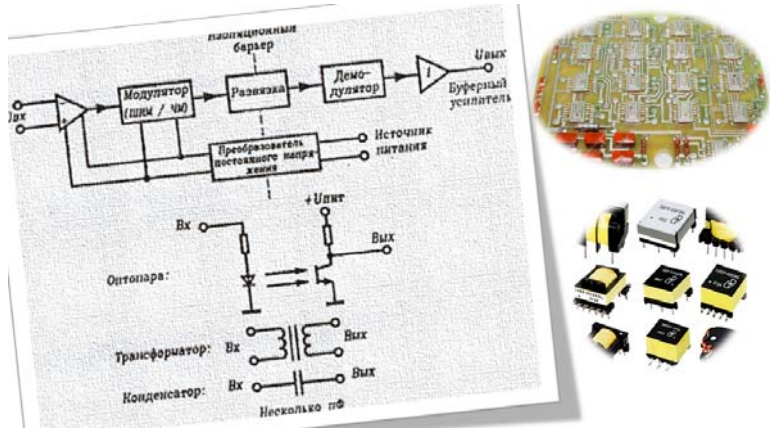


Рис. 2. Обзор принципов гальванической развязки

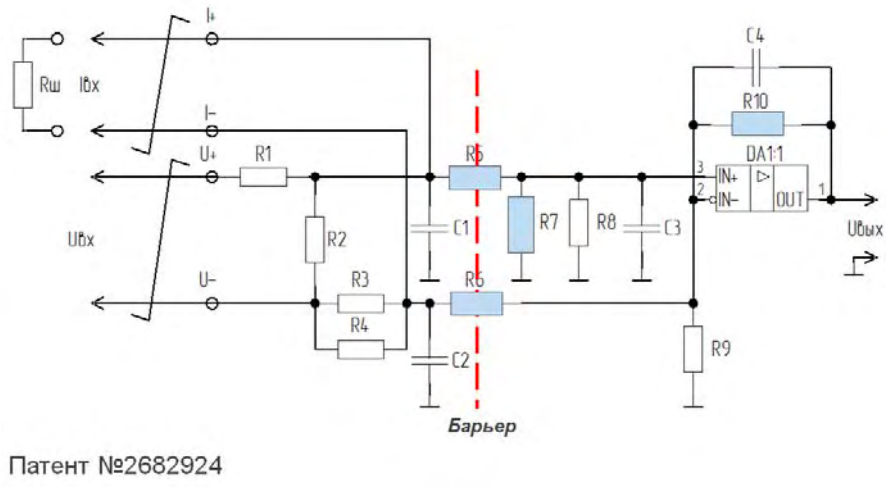


Рис. 3. Ноу-Хау «Фильтр нижних частот с гальванической развязкой»

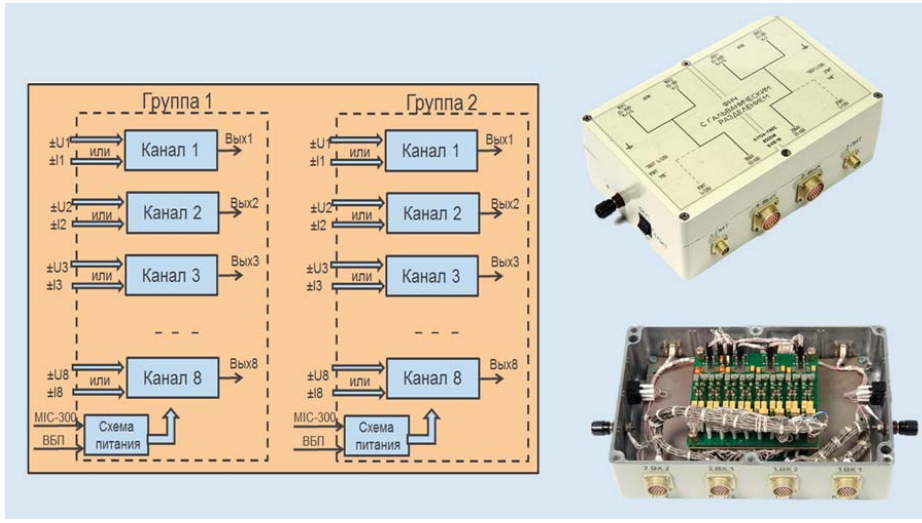


Рис. 4. Структурная схема и внешний вид устройства

– точность преобразования 0,5–1 %;

– входной динамический диапазон от 0 до 36 В;

– полосу пропускания частот от 0 до 30 кГц;

– нормированное входное сопротивление не менее 1 МОм.

Найденные устройства не подходили по функциональным требованиям.

Проанализировав устройства гальванической развязки, было выделено два важных свойства:

1) большое сопротивление разделения сигналов от общей шины (сопротивление гальванической развязки или сопротивление изоляции);

2) входное синфазное напряжение (напряжение гальванической развязки или напряжение изоляции).

Исходя из этого, предложена и разработана схема на основе дифференциального включения операционного усилителя с входными резисторами требуемой величины, обеспечивающих большие сопротивления разделения сигналов от общей шины. Для защиты от больших входных синфазных напряжений введены входные делители, которые были рассчитаны с учетом обеспечения равенства коэффициентов передачи по инвертирующему и неинвертирующему входам, что позволило подавлять помехи, а полезный сигнал усиливать.

В итоге требуемые функции были реализованы в схеме, получившей название «Фильтр нижних частот с гальванической развязкой» (ФНЧ с ГР). Она обеспечивает квазигальваническую развязку со всеми положительными свойствами гальванической развязки (см. рис. 3). На ФНЧ с ГР получен патент РФ № 2682924.

Применение дифференциального каскада позволило нормировать напряжение, реализовать фильтр нижних частот 2-го порядка, а также обеспечить возможность измерения токов через шунт (Rш = 0,1–0,5 Ом).

На основе разработанного каскада построено 16-и канальное устройство с независимым питанием для двух групп по 8 каналов. Также предусмотрена возможность питания как от внешнего блока питания (ВБП), так и через жгут от МИК-300М. Внешний вид устройства приведен на рис. 4. Характеристики устройства приведены в таблице.

Характеристики устройства

Характеристики устройства	Значение параметра
Количество независимых каналов	16
Сопротивление разделения входных сигналов от общей шины (сопротивление гальванической развязки), МОм	1,2
Допустимое входное синфазное напряжение (напряжение гальванической развязки), В	150
Входной динамический диапазон – по входу *U*вх, В – по входу *I*вх, В	 0–36 0–3
Выходной динамический диапазон	0–6
Точность преобразования, %	Не более 0,5
Полоса пропускания	от 0 до 30 кГц обеспечивается ФНЧ 2-го порядка
Нормированное входное сопротивление, МОм	1,1
Напряжение питания, В	± (10–15)
Диапазон температур, °С	–40…+50
Цена ЭРИ, т. руб.	15

На сегодняшний день изготовлено два опытных образца, которые проходят тестовую эксплуатацию и на ближайшее время запланировано проведение опытно-конструкторской работы. Данная работа показала пример слаженной работы различных подразделений (специальностей) и успешное их взаимодействие.

Литература

1. Пат. 2682924, РФ. Фильтр нижних частот с гальванической развязкой / Гутников А. И., Анашкин А. С. // Бюллетень изобретений. 2019. № 9.

2. Гребнев А. К., Гридин В. Н., Дмитриев В. П. Оптоэлектронные элементы и устройства / Под. ред. Гуляева Ю. В. М.: Радио и связь, 1998. С. 336.

3. Федоров А. Гальваническая развязка питания и двусторонняя передача данных на одном компоненте в SMD-корпусе // Компоненты и технологи. 2012. № 9.

4. Бакай В. Г. Гальваническая развязка сигналов датчиков и исполнительных устройств // ПиКАД. 2007. № 4.

5. Datasheet AD628.

ОБОСНОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ МАКЕТА РУЧНОГО ПНЕВМАТИЧЕСКОГО МИНОМЕТА ПРИ СТАТИЧЕСКОМ И ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

А. С. Блинов, В. В. Доценко, М. В. Никульшин, О. С. Путилин, В. В. Титов, И. Н. Чечеткин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина», г. Снежинск Челябинской обл.

Введение

В настоящее время в РФЯЦ-ВНИИТФ проводится разработка ручного пневматического миномета (РПМ), в котором запуск мины происходит при помощи сжатого воздуха без использования взрывчатых веществ и порохов. Для проведения предварительной экспериментальной отработки разработан макет миномета. Для снижения стоимости предварительной отработки в макете проведена замена легких алюминиевых материалов на сталь.

Для запуска мины на требуемое расстояние в герметичном объеме миномета (баллоне) предварительно создается давление воздуха $P_{раб}$ = 100 атм. (10 МПа) [1]. Давление воздействует на конструктивные элементы миномета – стенки баллона и удерживающее устройство. Согласно конструктивным особенностям, баллон одновременно является стволом миномета. Под действием давления возможна деформация баллона с последующим обжатием мины стволом, из-за чего вероятно заклинивание мины в стволе миномета.

Согласно предварительным данным, максимальная скорость мины при выстреле из РПМ составляет V = 70 м/с. При вылете мины из ствола происходит контактное взаимодействие механизма запуска с торцевой частью корпуса. Предварительные расчеты соударения механизма запуска с корпусом показали значительное деформирование внутренней трубы. Поэтому в процессе проведения расчетов по согласованию с разработчиком в модель миномета были введены конструктивные изменения, направленные на упрочнение корпуса.

В докладе представлены результаты расчетов на прочность корпуса миномета при статической нагрузке и ударном взаимодействии. Анализ НДС миномета проводился в двух пакетах программ (ПП): ЛОГОС-Прочность и аналогичного коммерческого продукта (КП).

Конструкция миномета

Основными конструктивными элементами миномета являются баллон, система удержания и опора (рис. 1).

Длина миномета составляет 0,8 метра. Баллон миномета изготовлен из стали 45. Силовые элементы изготовлены из стали 30ХГСА и титанового сплава ВТ14.

Баллон миномета представляет собой две соосные трубы (внешнюю 1 и внутреннюю 2), рис. 1, с одного торца соединенные заглушкой 3, с другого

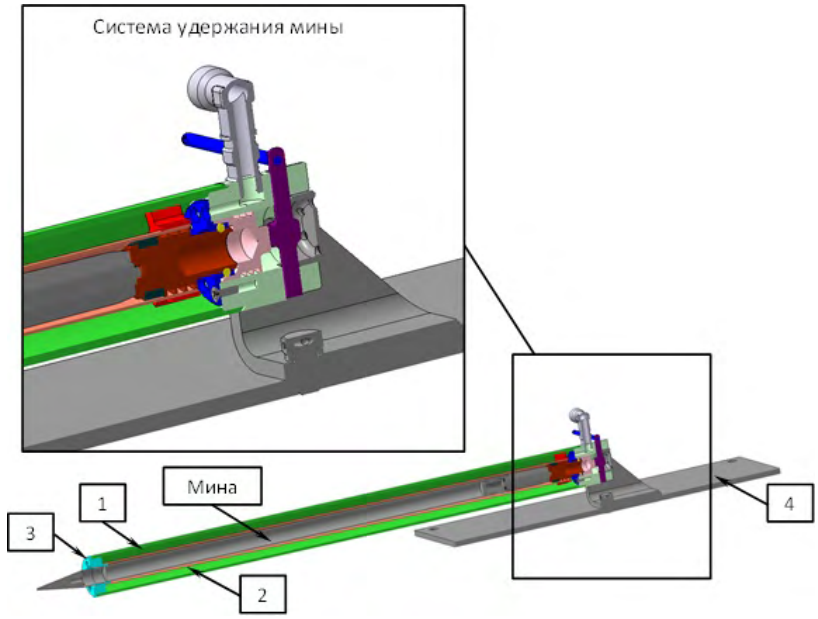


Рис. 1. Конструктивная схема миномета: 1 – внешняя труба, 2 – внутренняя труба, 3 – заглушка, 4 – основание

конца внешняя труба соединена с основанием 4, в котором установлена система удержания. Для усиления конструкции в области заглушки, на внутреннюю трубу устанавливается дополнительное стальное кольцо (рис. 2) длиной 50 мм и толщиной стенки 5 мм.

Расчетная модель

Расчеты прочности РПМ проведены методом конечных элементов. Расчеты выполнялись в двух ПП: ЛОГОС-прочность и аналогичном коммерческом продукте. Построение расчетной модели осуществлялось на основе геометрической модели миномета, созданной в формате сборки конструкторского пакета. Учитывая наличие плоскости симметрии, модель построена для половины конструкции. В модели учтены основные силовые элементы миномета: внешняя и внутренняя труба, заглушка и система удержания.

Конечно-элементная модель (КЭМ) РПМ содержит 350000 узлов и 280000 элементов (рис. 2, 3).

При задании физико-механических характеристик материалов использовались соответствующие государственные стандарты и данные справочников [2, 3].

При оценке прочности РПМ при действии рабочего давления $P_{раб}$ = 10 МПа нагрузка прикладывалась внутренним поверхностям баллона (рис. 2).

Для расчета прочности РПМ при вылете мины задавалась начальная скорость (V = 70 м/с) соударения цапфы с заглушкой (рис. 3). Следует отметить, что заданная скорость является максимальной и не учитывает возможное торможение за счет воздушной подушки между цапфой и заглушкой.

Ограничение перемещения модели по всем направлениям (UX = UY = UZ = 0) задано по торцам поворотного кулачка.

Результаты статических расчетов

В данном разделе представлены результаты расчетов корпуса миномета на действие рабочего статического давления P = 10 МПа.

При действии давления упругое изменение радиуса внутренней трубы 2 (рис. 1) не превышает Δ = 0,05 мм. Зазор между миной и стволом миномета не выбирается. Смещение внешней трубы 1 (рис. 1) в радиальном направлении не превышает значения Δ = 0,02 мм.

На рис. 4 представлено распределение эквивалентных напряжений во внешней трубе. Как видно из рис. 4, максимальные эквивалентные напряжения достигают значения $\sigma_{экв}$ = 80 МПа. Полученное значение ниже предела текучести материала трубы (сталь 45).

Напряжения, реализующиеся в остальных силовых элементах миномета, представлены в табл. 1.

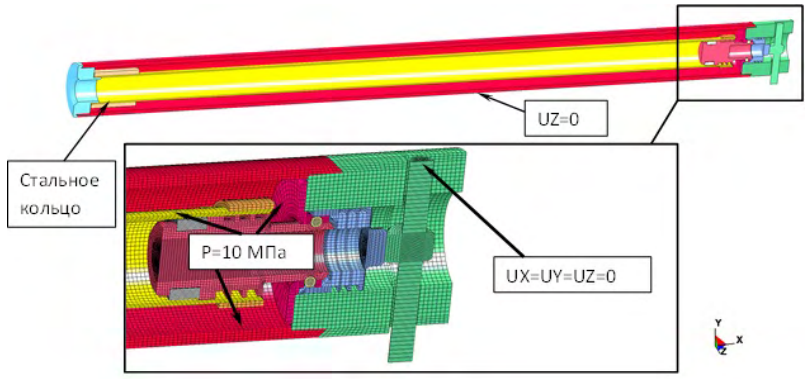


Рис. 2. Конечно-элементная модель и условия нагружения статическим давлением

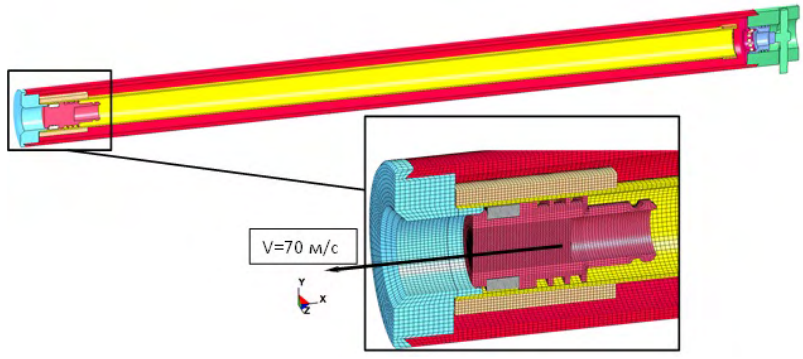


Рис. 3. Конечно-элементная модель для ударного взаимодействия

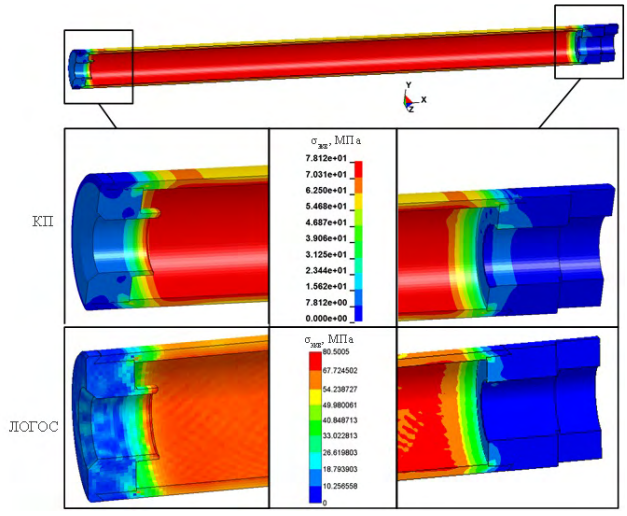


Рис. 4. Распределение эквивалентных напряжений во внешней трубе корпуса миномета

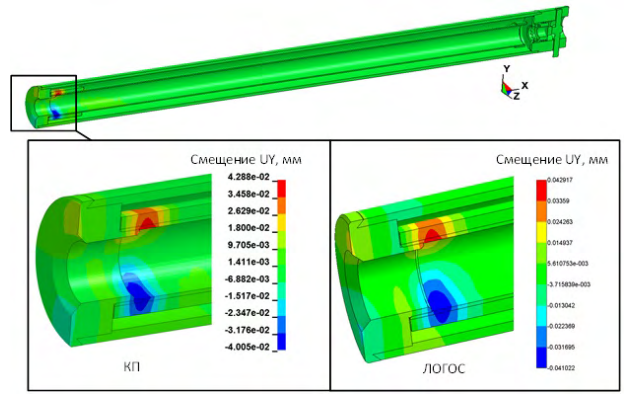


Рис. 5. Деформированное состояние корпуса миномета при выстреле

Таблица 1

Результаты расчета прочности миномета при статическом нагружении

Деталь	Материал	Логос	КП
		$\sigma_{экв}$, МПа	$\sigma_{экв}$, МПа
Внешняя труба	Сталь 45 $\sigma_т$= 245 МПа, $\sigma_в$= 415 МПа	80	78
Внутренняя труба		131	130
Заглушка	Сталь 30ХГСА $\sigma_т$= 835 МПа, $\sigma_в$= 10080 МПа	80	76
σ – эквивалентное напряжение; ε – пластические деформации			

Как видно из табл. 1, результаты расчетов в обоих программах идентичны.

Результаты динамических расчетов

При выстреле наибольшее увеличение радиуса внутренней трубы наблюдается в зоне контакта заглушки с демпфером. В связи с отсутствием возможности получения в постпроцессоре ЛОГОС (ScientificView) распределения радиальных смещений, приводится смещение элементов конструкции в поперечном направлении UY. В данной области локальное изменение радиуса внутренней трубы в направлении UY не превышает $\Delta = 0{,}043$ мм (рис. 5). Как видно из рис. 5, результаты расчетов по обоим ПП идентичны.

В заглушке 3 (рис. 1) при выстреле максимальное эквивалентное напряжение $\sigma_{экв} \approx 870$ МПа реализуется в зоне взаимодействия с демпфером (рис. 6). Полученное значение превышает предел текучести материала заглушки (сталь 30ХГСА – $\sigma_т = 835$ МПа). На поверхности заглушки возникают локальные пластические деформации $\varepsilon = 2{,}6$ % не превышающие предельное значение $\delta = 10$ % для стали 30ХГСА. В данной зоне возможно смятие материала заглушки, при этом целостность детали сохраняется.

Во внутренней трубе при выстреле максимальные эквивалентные напряжения достигают $\sigma_{экв}$= 250 МПа в зоне резьбового соединения с заглушкой (рис. 7). Расчетное значение напряжений превышает предел текучести материала трубы (сталь 20 – $\sigma_т$ = 245 МПа). Уровень пластических деформаций в трубе $\varepsilon < 1$ % значительно ниже относительного удлинения после разрыва для стали 20 ($\delta = 25$ %). Целостность внутренней трубы сохраняется.

В табл. 2 представлены результаты расчета миномета. Как видно из табл. 2, после соударения все силовые элементы сохраняют свою целостность при однократном нагружении. Результаты расчетов в КП и ПП ЛОГОС-прочность идентичны.

Заключение

В работе представлен анализ прочности конструктивных элементов макета пневматического ручного миномета при действии максимального внутреннего давления $P_{раб} = 10$ МПа и в условиях выстрела мины.

Анализ прочности проводился в двух пакетах программ конечно-элементного анализа: коммерческий продукт и отечественная программа ЛОГОС-прочность.

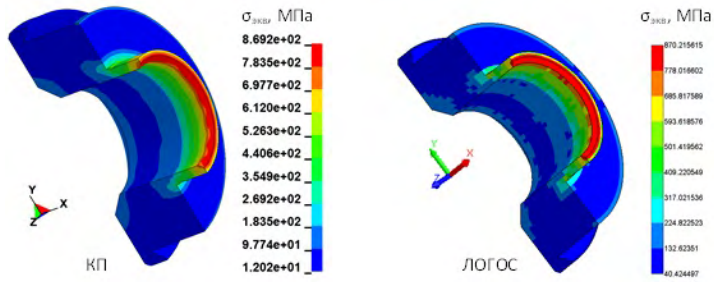


Рис. 6. Распределение эквивалентных напряжений в заглушке

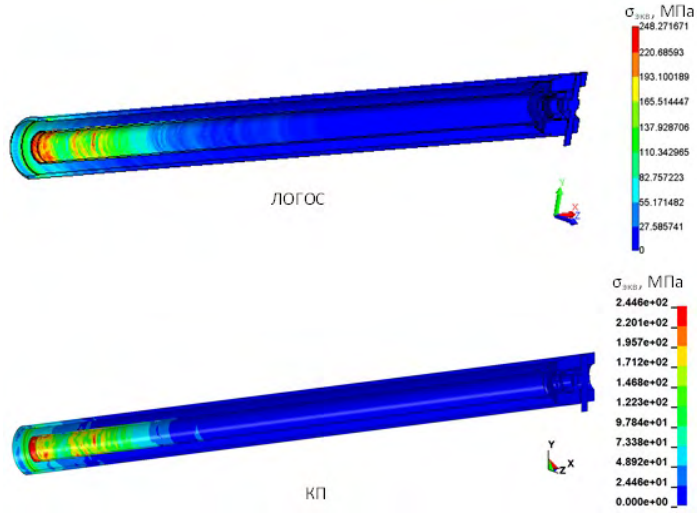


Рис. 7. Распределение эквивалентных напряжений в трубах корпуса минометa

Таблица 2

Результаты расчета прочности минометa при ударном взаимодействии

Деталь	Материал	Логос		КП	
		$\sigma_{экв}$, МПа	ε, %	$\sigma_{экв}$, МПа	ε, %
Внешняя труба	Сталь 45	198	–	201	-
Внутренняя труба	$\sigma_т$ = 245 МПа, $\sigma_в$ = 415 МПа	248	ε > 1	246	ε > 1
Заглушка	Сталь 30ХГСА $\sigma_т$ = 835 МПа, $\sigma_в$ = 10080 МПа	870	ε = 2,6	869	ε = 2,6
Цапфа	Сплав ВТ14 $\sigma_т$ = 1080 МПа, $\sigma_в$ = 1160 МПа	941	–	910	-
σ – эквивалентное напряжение; ε – пластические деформации					

Результаты расчетов показали:

– при действии внутреннего давления прочность корпуса минометa обеспечивается;

– в условиях выстрела в отдельных деталях (заглушка, внутренняя труба) реализуются пластические деформации. При однократном выстреле с максимальной скоростью V = 70 м/с целостность конструкции макета минометa сохраняется;

– значения смещений, напряжений и деформаций конструктивных элементов минометa, полученные по двум программам идентичны.

Литература

1. Кузнецов Е. В., Чечеткин И. Н. Техническое задание на расчет прочности деталей модели ручного пневматического минометa: ТЗ/РФЯЦ-ВНИИТФ № 230-14/2943 от 13.03.2018 // Снежинск: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ», 2018.

2. Никитин А. М., Фёдорова И. В. Физико-механические характеристики и билинейные диаграммы деформирования конструкционных материалов: Справочник. Инв. № ПС01.8193. Снежинск: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ», 2001.

3. Арзамасов Б. Н., Брострем В. А. и др. Конструкционные материалы. Справочник. Под общ. ред. Арзамасова Б. Н. М.: Машиностроение, 1990. С. 688.

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ МОДЕЛЕЙ ИЗДЕЛИЙ ДЛЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

А. В. Васильев, А. С. Антонов, Л. В. Поносова, А. Н. Лавронович

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Целью нашей работы является модернизация технологического процесса (ТП) изготовления моделей натурных изделий для повышения точности определения аэродинамических характеристик моделей.

Проектирование и изготовление моделей для отработки изделий является актуальной задачей, без решения которой значительно увеличиваются финансовые затраты, время изучения, корректировки и достижения требуемых характеристик натурных макетов изделий при проведении аэродинамических испытаний, в особенности при высоких скоростях.

На рис.1 представлена схема модели: наконечник *1*, корпус *2*, дно *3* моделируют внешний профиль изделия.

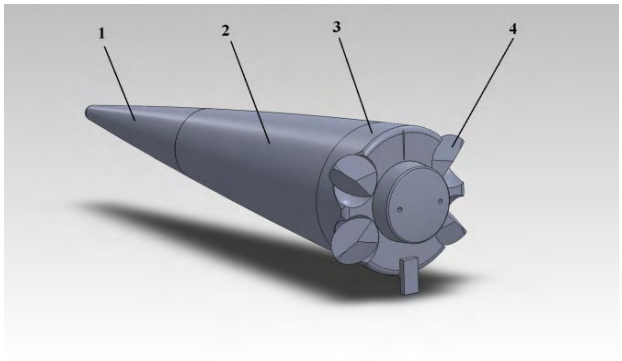


Рис. 1. 3D-схема модели: 1 – наконечник, 2 – корпус, 3 – дно, 4 – сферические щитки

Аэродинамические органы управления предназначены для создания управляющих усилий для маневрирования изделия в полете. Ассиметричные сферические щитки *4* создают заданные управляющие усилия при повороте на определенный угол. Щитки имеют сферическую посадку с корпусом модели и фиксируются штифтом. Геометрические параметры плоского щитка также определяют маневр изделия на траектории движения. Плоский щиток изготавливается как единое целое с корпусом модели. Прочность конструкции оценивается как инженерными, так и численными методами.

Важная роль при аэродинамической отработке моделей принадлежит наземному аэробаллистическому эксперименту, который осуществляется методом отстрела моделей, являющихся масштабной копией натурного изделия, из пороховых и легкогазовых баллистических установок. После выхода из ствола части поддона разделяются и улавливаются отсекателем, а модель, с заданными начальными условиями движения по скорости и углу атаки, пролетает на измерительный участок, на котором осуществляется внешнетраекторная регистрация положения модели, которая заключается в получении ряда последовательных фотоизображений на фоне реперной системы координат тира. После обработки снимков высчитываются 6 координат модели в пространстве в фиксированные моменты времени.

Погрешности определения аэродинамических характеристик (АДХ) моделей влияют на точность прогнозирования полетных траекторий натурных изделий и напрямую сказываются на его эффективности. Они во многом обусловлены искажением обводов моделей в пределах принятых полей технологических допусков. Рассмотрению подлежали искажения обводов, обусловленные отклонениями размеров радиуса притупления конуса *r,* длины *l* и диаметра основания *d*, рис. 2.

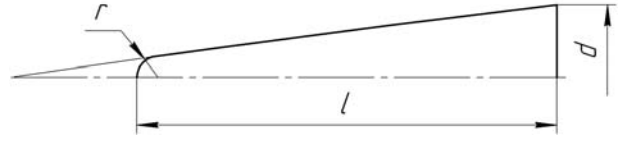


Рис. 2. Модель затупленного конуса

Погрешности АДХ определены в виде отклонений коэффициентов продольной и нормальной сил, а также центра давления у моделей с искаженными обводами, от соответствующих характеристик моделей с номинальными обводами.

В табл. 1 показано, что при увеличении масштаба модели в 2 раза обратно пропорционально уменьшается погрешность определения АДХ модели.

Таблица 1

Значения погрешностей АДХ моделей

*D*м, мм	ΔCτ, %	ΔCn, %	ΔCd, %
60	1,40	0,15	-0,09
120	0,68	0,07	-0,04

Аналогично, при сохранении масштаба модели повышение точности изготовления внешних обводов напрямую сказывается на повышении точности определения АДХ. Особенно в перспективе разработки специальных изделий с гиперзвуковыми скоростями. Это и послужило решающим фактором разработки технологических решений по модернизации ТП.

Рассмотрим основные операции по изготовления модели. Особенностью конструкции корпуса является сложно-профильный внутренний контур, состоящий из двух базирующих внутренних элементов с резьбами, а так же внутреннего конусного отверстия с двумя сферическими скруглениями. Изначально для выполнения операции требовалось 9 единиц инструмента, трудоемкость составляла 350 мин, точность размеров располагалась в крайних значениях заданных полей допусков. Результатом внедрения разработанных технологических решений стало сокращение требуемого инструмента в 3 раза, сокращение трудоемкости на 40 %, повышение точности обработки в 3 раза.

Особенностью изготовления внешнего контура модели является криволинейная составляющая, которая состоит из радиуса притупления конуса *r,* рис. 2, и радиуса внешнего обвода. Изначально выполнение данной операции характеризовалось ступенчатостью получаемого контура с точностью 0,08 мм. После применения разработанных технологических решений удалось устранить ступенчатость и добиться выполнения гладкого внешнего контура, повысить в 2 раза качество изготавливаемой поверхности, значительно снизить трудоемкость, сократить в 3 раза требуемый инструмент и повысить точность получаемых размеров в 4 раза. Например, скругление при вершине *r* имело допуск 0,1 мм, который на практике составил менее 0,02 мм. Это показал высокоточный контроль размеров при помощи измерительной установки.

Токарные операции по изготовлению модели изначально выполнялись резцами с напаянными пластинами. Механическая обработка таким инструментом, имеет ряд недостатков, среди которых: необходимость постоянной заточки, что влечет за собой многократную переналадку оборудования; при сколе пластины резец приходит в негодность и может испортить изготавливаемую деталь. Обработка происходит при относительно небольших оборотах шпинделя, вследствие чего не удается получить высокое качество шероховатости поверхности. Поэтому одним из основных факторов повышения стабильности и точности получаемых размеров явилось использование современного инструмента со сменными пластинами. Данные пластины не требуют переточки, обладают повышенной износостойкостью и надежностью режущей кромки, что позволяет выполнять обработку в 3 раза быстрее. А качество получаемых поверхностей выше более чем в 2 раза. Это позволяет с максимальной эффективностью применять данный инструмент. Приняв во внимание все вышесказанное, были спроектированы 3 универсальных державки под пластины рис. 3с параметрами, которые позволяют обрабатывать все типы моделей, в связи с чем отпала необходимость проектирования специального инструмента под каждый тип моделей, как это было ранее.

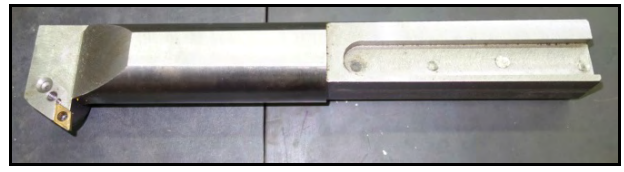


Рис. 3. Универсальная державка под сменные пластины для изготовления всех типов моделей

Фрезерная операция по изготовлению корпуса характеризовалась наличием сферических поверхностей с допуском 0,1 мм, допуском взаимного расположения оси модели и осей посадочных отверстий под сферические щитки 1/4 градуса. При выполнении этих операций по предшествующему технологическому процессу требовалось 6 фасонных фрез 2 типов и еще 7 единиц инструмента, получаемая точность составляла крайние значения допусков, в связи с чем 1 из 10 корпусов, как правило, выходил за требуемые параметры, трудоемкость 560 мин. Внедренные технологические решения, а так же применение метода высокоскоростной обработки (ВСО) позволили отказаться от изготовления трудозатратных фасонных фрез и сократить трудоемкость в 5 раз, точность изготовления повысилась в 3 раза, качество обрабатываемых поверхностей выросло в 2 раза, технологических потерь не зафиксировано.

Особенностью сферических щитков является угловой допуск на взаимное расположение поверхностей сферической части 1/4 градуса. Изготовление отдельно каждого щитка было чересчур трудозатратной и сложной операцией, возникла потребность спроектировать оправку, которая позволила обрабатывать до 6 деталей одновременно, тем не менее, разброс получаемых размеров составлял более 0,12 мм и у четверти изготавливаемых деталей размеры выходили за поля допусков. Изготовление сферических щитков на обрабатывающем центре с числовым программным управлением с применением метода ВСО позволило:

– отказаться от изготовления трудоемкой оправки,

– повысить точность более чем в 3 раза,

– сократить трудоемкость почти в 3 раза,

– снизить технологические потери в 5 раз, так как точность и стабильность получаемых размеров выше за счет возможности применения метода высокоскоростной обработки.

При использовании метода ВСО важно еще на этапе подготовки производства выявить возможные неточности в управляющей программе. Для этого используется виртуальное симулирование процесса изготовления деталей. В качестве симулятора применяется CAM система, в которой моделируются

и отрабатываются управляющая программа механической обработки рис. 4, рис. 5. При виртуальной симуляции можно визуально определить положение инструмента и исключить ошибки – выход инструмента за габариты детали или врезание в приспособления.

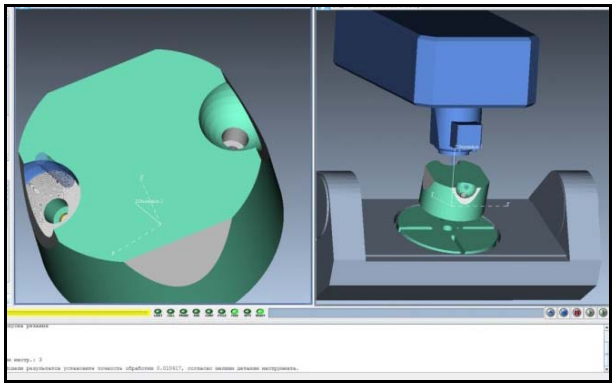


Рис. 4. Симуляция механической обработки сферических посадочных отверстий под щитки

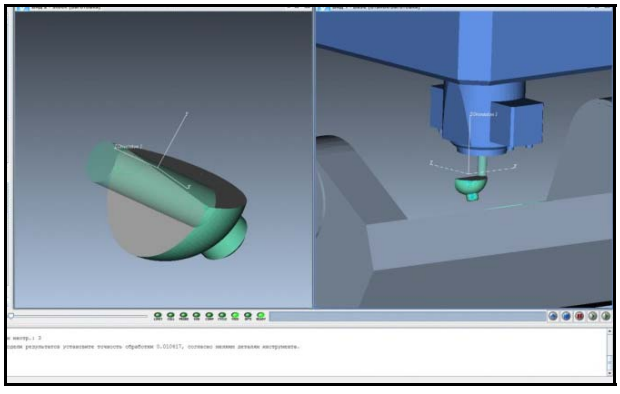


Рис. 5. Симуляция механической обработки сферических щитков

Для изготовления моделей были спроектированы резьбовые оправки с базирующим элементом, обеспечивающие высокую точность базирования деталей в процессе изготовления, что обеспечивает требуемую конструкторской документацией соосность составных частей при обработке в сборе. Особенностью приведенных выше оправок, является защита от повреждений готовых резьб и наружных поверхностей деталей, образующихся в результате зажатия детали в патроне. К оптимизации ТП также привело и то, что для стабильного выполнения требований конструкторской документации к позиционированию сферических щитков в посадочных отверстиях модели была спроектирована и изготовлена оправка. В ее конструкции предусматривается выполнение паза под прямоугольный щиток, который используется в качестве технологичной базы. Также технологической базой служит цилиндрический хвостовик. При установке оправка позиционируется при помощи технологических баз и жестко фиксируется в необходимом положении, в котором торцы щитков упираются в боковые выступы, тем самым исключается возможность появления погрешности. Это позволяет обеспечить требуемую точность установки и сделать сам процесс позиционирования щитков гораздо эффективнее и быстрее.

Пооперационный и окончательный контроль при изготовлении модели осуществлялся на координатно-измерительной машине, рис. 6, с помощью оптического щупа с 40 кратным увеличением. Проведение данного вида контроля заключается в измерении детали, путем считывания точек, и получения фактически измеренных элементов таких как: прямая, сфера, радиус. Далее строится система координат в соответствии с чертежом, после чего проводится анализ полученных данных и составляется протокол измерений с результатами и графическое отображение фактического размера в пределах допуска.

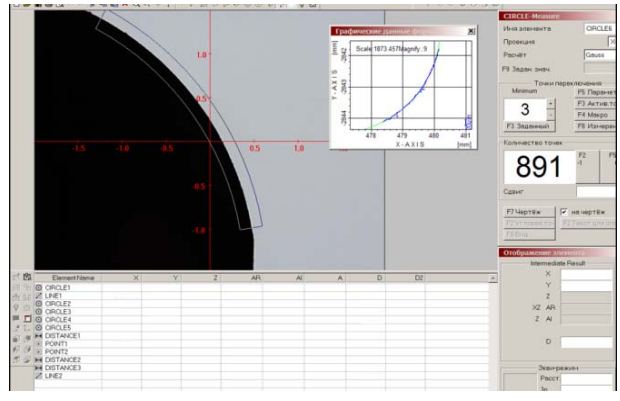


Рис. 6. Измерения модели на координатно-измерительной машине

Рассмотрев все особенности конструкции моделей, проанализировав действующий ТП, оборудование и инструмент, был разработан комплекс технологических решений, который позволил:

1) повысить точность геометрических размеров в 2,5 раза;

2) сократить количество времени затраченного на проектирование и изготовление оснастки и специального инструмента в 2 раза;

3) улучшить качество изготавливаемых поверхностей в 2 раза;

4) сократить время изготовления моделей более чем в 3 раза;

5) сократить номенклатуру требуемого для изготовления инструмента в 2 раза;

6) снизить материальные затраты на изготовление моделей

Некоторые результаты внедрения разработанных тех. решений показаны в табл. 2.

Таблица 2

Сводная таблица результатов применения принятых технологических решений

Деталь	Технологический процесс	Точность размеров, мм.	Качество поверхности (шероховатость Rz, мкм.)	Технологические потери, %	Основное время механической обработки, мин.
Наконечник	Прежний	0,05	40	5	150
	Внедренный	0,03	12,5	1	40
Корпус	Прежний	0,04	20	20	420
	Внедренный	0,02	12,5	5	130
Сферические щитки	Прежний	0,06	40	25	350
	Внедренный	0,02	12,5	5	50
Модель в сборе	Прежний	0,05	20	10	110
	Внедренный	0,02	10	1	20

Например, при изготовлении модели в сборе точность увеличилась в 2,5 раза, а технологические потери сократились фактически до нуля.

Разработанные технологические приемы были внедрены на базе опытного цеха 1805. Они используются при решении сложных технологических задач по изготовлению высокоточных сборочных единиц с высокой степенью стабильности получаемых размеров, а также для изготовления широкого спектра деталей сложнопрофильной конструкции.

Внедрение новых прогрессивных технологий:

– привело к значительному повышению качественных и точностных параметров изготавливаемых моделей;

– позволило в 2,5 раза повысить стабильность геометрических характеристик и соответственно в 2,5 раза повысить точность определения АДХ моделей в связи, с чем отпала необходимость изготовления более трудоемких и затратных моделей больших диаметров;

– позволило на треть сократить общее потребное количество опытов для определения АДХ моделей и сократить количество аварийных опытов, связанных с некорректным заходом моделей в аэробаллистический тир.

Наработаны принципы технологических решений, открывающие возможность их применения при изготовлении специальных изделий, предназначенных для испытаний на гиперзвуковых скоростях.

Литература

1. Каценеленбоген М. Е., Лебединский Н. Я. Справочник работника механического цеха. Москва, 1962.

2. Панов А. А., Аникин В. В., Бойм Н. Г., Волков В. С. и др. Обработка металлов резанием. Москва, 1988.

3. Родин П. Р. Металлорежущие инструменты. Киев, 1986.

4. Семенченко И. И., Матюшин В. М., Сахаров Г. Н. Проектирование металлорежущих инструментов. Москва, 1963.

5. Золин И. М., Зыбкин В. В. Справочник конструктора, ч. 1. Нижний Новгород, 2003.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МАГНИТОРЕЗИСТИВНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

С. В. Горохов, А. В. Негин, В. Е. Сергеев

Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю. Е. Седакова», г. Нижний Новгород

В настоящее время широкое применение находят анизотропные магниторезистивные датчики, предназначенные для бесконтактного измерения скорости и направления вращения зубчатых колес и многополюсных роторов энкодеров, определения угла поворота или величины линейного перемещения, бесконтактного измерения тока (мощности), а также для определения курса объекта по магнитному полю.

С повышением требований к точностным характеристикам магнитных датчиков для создания современных перспективных навигационных комплексов и систем контроля встает задача по разработке технологии изготовления отечественных первичных магниторезистивных преобразователей (МРП) магнитного поля на анизотропном магниторезистивном эффекте с характеристиками на уровне зарубежных аналогов – HMC 1021 производства Honeywell:

– удельная чувствительность, не менее 0,8 мВ/ВЭ;

– нелинейность передаточной характеристики – не более 0, % в диапазоне магнитных полей ± 1Э;

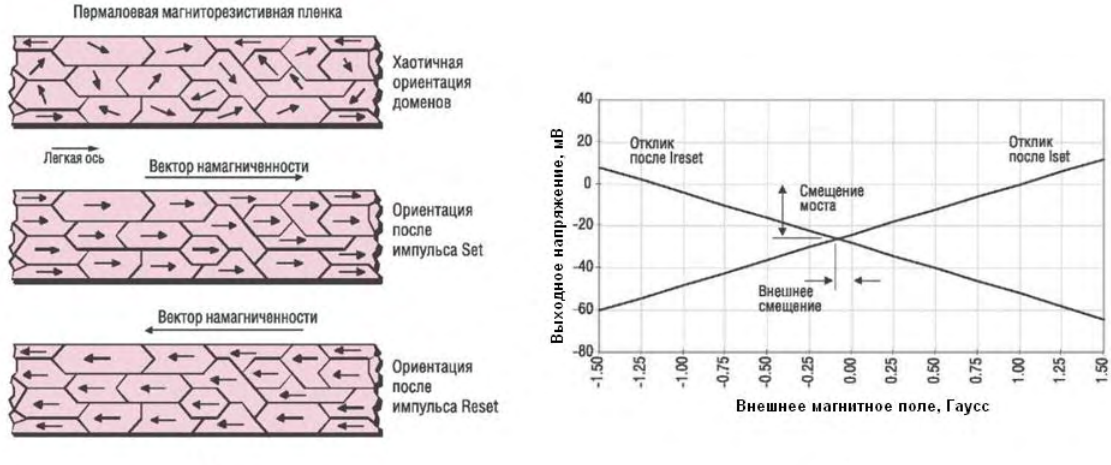
– нестабильность выходного напряжения не более 6 мкВ, после подачи установочных импульсов «set/reset».

В работе представлены исследования, вносящие вклад в решение данной задачи и направленные на совершенствование технологии изготовления МРП.

Конструкция МРП представляет собой многослойную структуру, состоящую из магниторезистивного моста Уинстона, и пленочной катушки индуктивности «set/reset», создающей установочные импульсы. В исходном состоянии магнитная (доменная) структура магниторезистивных полосок хаотична и измерение величины магнитного поля не производится. Подача короткого импульса тока длительностью 1–2 мкс через катушку «set/reset» формирует поле, ориентирующее магнитные домены всех магниторезистивных полосок в направлении оси легкого намагничивания (ОЛН), тем самым выводя магниторезистивный мост Уинстона в режим максимальной чувствительности. Катушка «set/reset» выполняет так же еще одну важную функцию – инвертирование передаточной характеристики для исключения влияния температурного дрейфа элементов моста Уинстона, ошибки, вызванной нелинейностью передаточной характеристики, а также потерю слабого сигнала на фоне сильных паразитных полей [1]. Процесс перемагничивания доменной структуры и передаточная характеристика МРП при подаче импульсов «set/reset» представлены на рис. 1.

Ортогональное расположение двух и трех МРП позволяет изготовить датчики курса (азимута) по магнитному полю Земли – магнитометры для навигационных систем.

Одними из основных параметров, определяющих разрешающую способность МРП по магнитно-



а б

Рис. 1. Воздействие импульсов «set/reset» на МРП: а – влияние на доменную структуру магнитной пленки; б – влияние на передаточную характеристику

му полю, являются чувствительность и стабильность выходного сигнала. Величина выходного напряжения магниторезистивного моста Уинстона, после подачи установочных импульсов «set» и (или) «reset» катушкой индуктивности, задает точность измерения величины магнитного поля. В составе датчика магнитного поля стабильность выходного напряжения будет определять точность измерения магнитного поля или среднеквадратичное отклонение (СКО) магнитного поля. Следует отметить, что стабильность выходного напряжения МРП зависит как от конструкции магниторезистивного моста Уинстона, так и от технологии его изготовления.

Для напыления магниторезистивной структуры использовалась вакуумная установка электронно-лучевого испарения «Оратория-9М», содержащая две электронные пушки FerroTecEVM-8 позволяющая напылять до 8 различных материалов. На первых этапах исследований для формирования моста Уинстона использовалась структура 47НК – Та – Cu - 47НК [2], где 47НК – сплав с химическим составом Ni(65%)Co(20%)Fe(15%), Та – защитный слой, Cu – проводящий слой. Напыление магниторезистивной структуры производилось за один цикл откачки вакуумной камеры. Получаемые образцы имели характеристики на уровне зарубежных аналогов лишь на единичных образцах, выход годных составлял не более 1–3 %. Основными параметрами по которым браковались получаемые МРП были высокий разбаланс моста Уинстона и нестабильность выходного сигнала. Величина разбаланса зависит в большей степени от выполнения операции фотолитографического травления, значения же нестабильности выходного сигнала напрямую зависят от толщины слоев, температуры напыления, времени выдержки и величины наведенного магнитного поля.

Для получения требуемых значений МРП и повышения процента выхода годных на следующем этапе исследований была выбрана магниторезистивная структура моста Уинстона на основе 47НК – Та – Al, взамен ранее использовавшейся. Изменение материалов структуры моста Уинстона обусловлено вероятностью появления контакта Cu-Al, с возникновением химического потенциала на границе до 1 В, при разварке алюминиевыми перемычками и присутствия дополнительного (защитного) магнитного слоя способного негативно повлиять на характеристики МРП. Для этого были проведены работы по отработке технологии получения стабильного напыления алюминия толщиной 0,7–1 мкм на установке «Оратория – 9М».

Следует отметить, что напыление алюминия электронно-лучевым методом является трудновыполнимой и трудновоспроизводимой задачей. Наиболее часто используемый метод напыления пленок алюминия – магнетронное распыление.

На первых этапах исследований было экспериментально определено, что при напылении проводникового слоя на сформированные отдельностоящие магниторезистивные полоски и последующего формирования проводящего слоя, образуется большое переходное сопротивление между проводящими и магниторезистивными элементами, вследствие образования на последнем окисного слоя. Изготовленные МРП имели неудовлетворительные характеристики. Для устранения данного факта было принято решение напылять пленки 47НК – Та – Al за один цикл откачки на установке «Оратория-9М».

Напыление алюминия из слитка, установленного в карман испарителя электронной пушки FerroTec установки «Оратория - 9М», оказалось невозможным (из за высокой теплопроводности алюминия и значительной температуры испарения порядка 1200 °С стабильного процесса испарения получить не удалось). Поэтому для отработки стабильного процесса напыления использовались дополнительные тигли – лайнеры из керамики и тугоплавких металлов устанавливающиеся в карман испарителя и представленные на рис. 2. Наиболее эффективно показал себя лайнер из молибдена (рис. 2е). Остальные испытываемые лайнеры были разрушены, из-за неравномерного нагрева от электронного луча (рис. 2а, 2б, 2в), либо не обеспечили стабильного напыления (рис. 2г, 2д).

За основу технологического процесса изготовления МРП взят процесс указанный в литературе [2].Процесс изготовления МРП состоит из следующих этапов:

– напыление магниторезистивной структуры 47НК – Та – Al на установке электронно-лучевого испарения «Оратория - 9М»;

– фотолитография структуры 47НК – Та – Al с получением топологии моста Уинстона;

– нанесение изоляционного слоя лака АД-9103 с последующей его имидизацией;

– фотолитография изоляционного слоя;

– напыление проводниковой структуры V-Al;

– фотолитография проводникового слоя с получением топологии катушки «set/reset».

В качестве подложки использовалась пластина монокристаллического кремния, с нанесенными на нее изолирующими слоями. Для получения топологического рисунка моста Уинстона использовалась фоторезистивная маска фоторезиста – microposit S1813SP15.

Травление структуры происходило в два этапа:

– травление слоя Al;

– травление слоев 47НК – Та.

Критериальными параметрами процесса являлись селективность травителя и отсутствие сквозных «дырок» (питтингов) в магниторезистивных полосках.

Был разработан состав травителя и отработан режим травления, при котором элементы МРП имеют четкие и ровные края. После травления структуры 47НК – Та – Al проводился контроль внешнего вида и измерение элементов магниторезистивного моста Уинстона на микроскопе МИКРО-200Т-01 при 320-х увеличении. Подтрав структуры составил до 4 мкм – для магниторезистивных полосок и до

Рис. 2. Тигли – лайнеры для напыления алюминия на установке электронно – лучевого испарения «Оратория - 9М»: а – лайнер из диборида титана; б – лайнер из керамики «Кортим»; в – литой лайнер из корунда; г – прессованный лайнер из корунда; д – лайнер-лодочка из тантала; е – лайнер из молибдена

2 мкм – для проводникового слоя, при этом отсутствовали питтинги на открытых участках магниторезистивных полосок. Отработка данного процесса фотолитографического травления позволила повысить процент годных образцов по разбалансу моста Уинстона в 1,5–2 раза по сравнению со структурой 47НК – Та – Cu - 47НК.

На изготовленных образцах МРП по данной технологии проверялась адгезия сварных соединений методом ультразвуковой сварки. Усилие отрыва алюминиевой перемычки (шириной 400 мкм и толщиной 50 мкм) составило более 20 г, отрыв происходил по переходу (сварное соединение – металлизация).

Были проведены исследования магнитных параметров структуры 47НК-Та-Al с целью определения возникновений внутренних напряжений в магниторезистивной структуре. Измерения проводились на базе технологического центра МИЭТ (г. Зеленоград) магнитооптическим методом Керра.

Для измерений магнитных параметров были изготовлены следующие образцы:

– пленка сплава 47НК на пластине монокристаллического кремния с изоляционными слоями SiO_2и Si_3N_4;

– структура 47НК-Та-Al напыленная на кварцевое стекло.

Использование двух образцов обусловлено особенностями определения магнитных характеристик оптическим методом Керра. При снятии петли гистерезиса методом Керра необходимо, чтобы луч от источника (лазера, светодиода) падал непосредственно на поверхность магнитного материала (либо через прозрачные среды). Так как магнитный сплав 47НК в структуре 47НК-Та-Al «скрыт» от луча проводящим слоем Al и защитным слоем Та, то было принято решение напылять структуру на подложку из кварцевого стекла толщиной 0,15 мм. Для определения магнитных параметров образец просвечивался с обратной стороны кварцевой подложки – т. е. со стороны слоя сплава 47НК. Малая толщина кварцевого стекла обеспечивает минимальное влияние на измерения магнитных параметров.

Графические представления петель гистерезиса образцов снятые в направлении осей легкого (ОЛН) и трудного (ОТН) намагничивания представлены на рис. 3. По осям отложены значения величины магнитного поля и условные единицы интенсивности света на приемнике.

На петлях гистерезиса снятых с образцов 47НК-Та-Al присутствуют незначительные шумы (рис. 3в, 3г) качественно не влияющие на форму петли гистерезиса. Скорее всего, это связано с наличием дополнительной прозрачной среды – кварцевой подложки. Полученная форма петли гистерезиса указывает на отсутствие внутренних напряжений в структуре.

На образце монокристаллического кремния в районе поля анизотропии (рис. 3б) присутствует сильный скачок на петле гистерезиса, который, скорее всего, вносит вклад в нестабильность выходного сигнала МРП. При измерении магнитного поля пленочная катушка индуктивности формирует установочный импульс – «set» (или «reset»), который переводит магниторезистивные полоски плеч моста Уин-

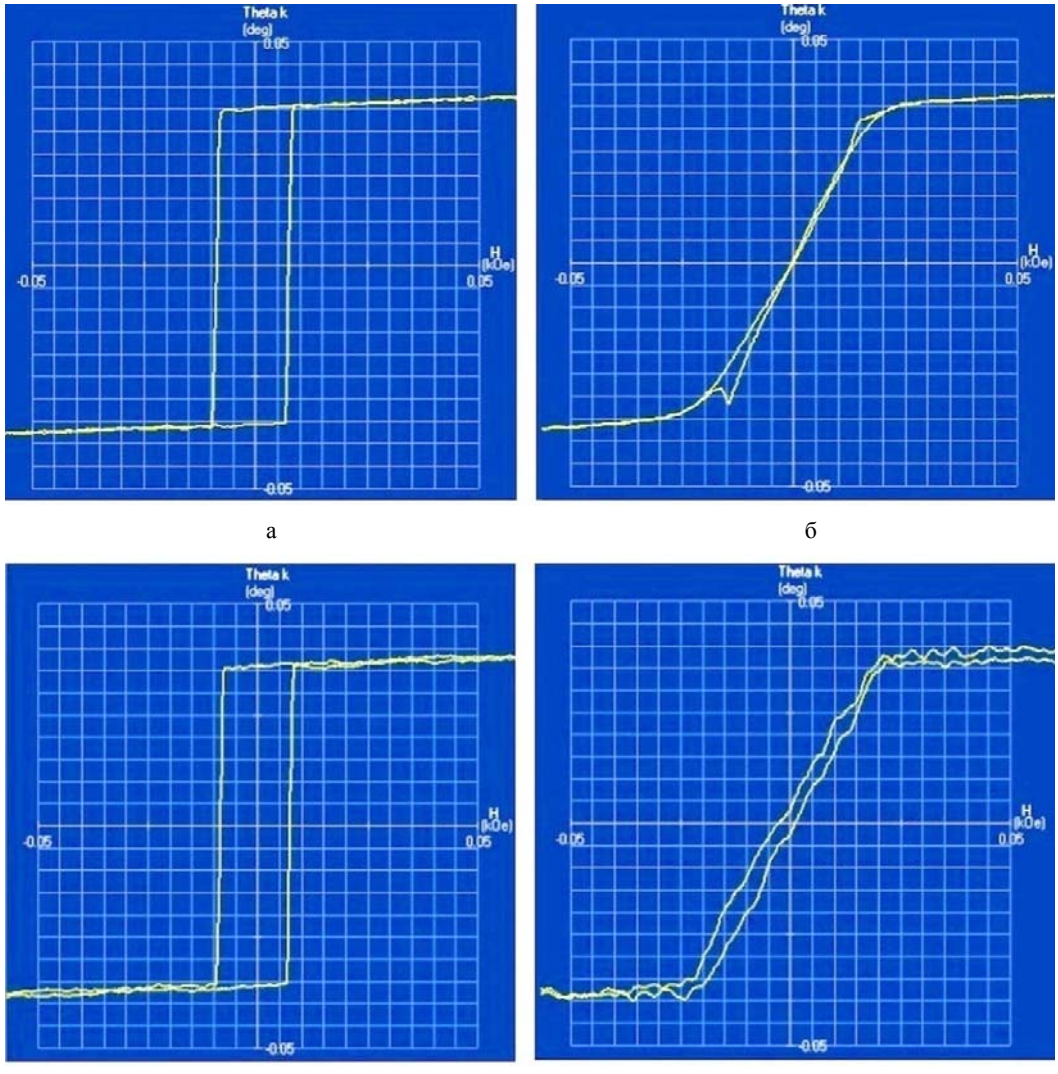


Рис. 3. Петли гистерезиса магниторезистивной пленки: а – 47НК на подложке монокристаллического кремния по ОЛН; б – 47НК на подложке монокристаллического кремния по ОТН; в – 47НК-Та-Al на подложке из кварцевого стекла вдоль ОЛН; г – 47НК-Та-Al на подложке из кварцевого стекла вдоль ОТН

стона в режим насыщения (горизонтальный участок на петле гистерезиса), при этом происходит «выстраивание» доменной структуры в направлении ОЛН. После импульса «set» (или «reset») происходит измерение магнитного поля в зависимости от ориентации протекающего тока в магниторезистивных полосках и внешнего магнитного поля, которое поворачивает домены на угол θ, в результате чего в выходной диагонали моста Уинстона образуется сигнал от воздействующего внешнего магнитного поля.

В идеальном случае, все домены должны быть ориентированы строго в одном направлении и после каждого импульса ориентироваться в одном и том же направлении в этом случае имеет место быть когерентное вращение. Повторяемость значений выходных напряжений в таком случае будет высока. За счет того, что на измеренных образцах наблюдается скачок на петле гистерезиса, часть доменов будет перемагничиваться некогерентным вращением, а скачкообразно. В результате исходное состояние структуры магниторезистивных полосок (при каждом установочном импульсе) будет различным, а следовательно появится и значительная компонента нестабильности выходного напряжения магниторезистивного моста Уинстона.

На пластину монокристаллического кремния, прошедшую исследование петли гистерезиса оптическим методом Керра, была допылена структура Та-Al для формирования целостной структуры 47НК-Та-Al с последующим получением топологии мостов Уинстона. Изготовленные на основе полученных мостов Уинстона МРП были установлены на макет датчика магнитного поля, на котором определялась удельная чувствительность и СКО магнитного поля. Измеренная чувствительность имела удовлетворительные значения более 0,8 мВ/ВЭ, но СКО магнитного поля значительно превышало требования разработчиков и составило более 300 нТл (необходимый уровень не более 150 нТл).

По результатам измерений магнитных параметров было выдвинуто предположение о влиянии неравномерного прогрева монокристаллического кремния. Конструкция установки «Оратория – 9М» включает в себя четыре группы нагревателей расположенные через 90 ° и над каждым испарителем располагается по одной группе нагревателей.

Технологический процесс напыления на установке пленки сплава 47НК и магниторезистивной структуры 47НК-Та-Al происходит с поворотом карусели на 180°. При переводе карусели с подложкой на позицию распыления происходит понижение температуры с последующим ее нагревом. Ввиду высокой теплопроводности кремния (149 Вт/(м×К)), используемые подложки на его основе, не позволяют получать магниторезистивную пленку с высокой однородностью доменных структур. Малая теплопроводность кварцевого стекла (1,38 Вт/(м×К)) позволяет получать пленки с однородной доменной структурой, однако подложки из данного материала значительно уступают по механическим свойствам подложкам из монокристаллического кремния. Кроме того в процессе исследований была измерена шероховатость поверхности подложек с помощью атомно-силового микроскопа. Качество поверхности подложек из кварцевого стекла так же уступает качеству поверхности пластин монокристаллического кремния. Таким образом, использование подложек из кварцевого стекла настоящими исследованиями признано нецелесообразным.

Дальнейшие исследования были направлены на уменьшение неравномерного прогрева пластин монокристаллического кремния. С этой целью были проведены экспериментальные работы по напылению магниторезистивных структур на монокристаллический кремний с использованием «аккумулятора тепла» и дополнительными выдержками в процессе отжига и напыления структуры. На полученных структурах, данным способом напыления, были изготовлены образцы МРП. Образцы МРП имели удельную чувствительность 0,8–0,9 мВ/ВЭ, нелинейность не более 0,1 % в диапазоне магнитных полей ±1 Э, а СКО составило 60–80 нТл. Выход годных образцов составил порядка 20 %.

МРП изготовленные по разработанной технологии успешно прошли испытания на длительное хранение (имитация 17,5 лет хранения в отапливаемом хранилище и 3 (трех) лет хранения под навесом) и на стойкость к пониженной и повышенной температурам (от минус 40 ºС до плюс 60 ºС). Были получены зависимости ключевых параметров МРП от значения температуры в диапазоне от минус 40 °С до плюс 60 °С. Это позволит при создании датчика учесть температурное влияние и тем самым повысить точность измерения магнитного поля при различных температурах его использования.

Выводы

В ходе выполнения исследований была разработана технология изготовления МРП с характеристиками на уровне зарубежных аналогов, и с выходом годных образцов не менее 20 %. Проведены испытания получаемых МРП на имитацию длительного хранения и стойкость к пониженным и повышенным температурам. Данные МРП являются основой для создания различных датчиков магнитного поля:

– магнитометров с диапазоном магнитных полей ±1 Э;

– бесконтактных пороговых датчиков и датчиков угла поворота с напряженностью магнитного поля более 8 мТл.

Проведенные исследования вносят вклад в решение задачи по созданию отечественного первичного преобразователя магнитного поля взамен импортных МРП.

Литература

1. Маргелов А. Модульные и компонентные магниторезистивные датчики и компасы Honeywell. Часть I // // Новости электроники, 2006. № 10.

2. Пат. 2617454, РФ, МПКС1 H01L 43/12. Способ изготовления магниторезистивного датчика / Гусев В. К., Негин А. В., Андреева Т. Г., Горохов С. В. // Изобретения, полезные модели. Официальный бюллетень. 2017. № 12.

НОВЫЕ НАУЧНЫЕ РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ЛУЧА И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НА КОМБИНАТЕ «ЭЛЕКТРОХИМПРИБОР»

А. А. Дивак

ФГУП «Комбинат «Электрохимприбор», г. Лесной Свердловской обл.

На комбинате «Электрохимприбор» широко применяются электронно-лучевые технологии в промышленных масштабах.

В настоящее время на комбинате «Электрохимприбор» в эксплуатации находятся установки собственной разработки и приобретенные в НИТИ «Прогресс». Установки отличаются подходом к проектированию, применяемыми электронно-лучевыми пушками. Установки, разработанные на комбинате, имеют одну камеру и несколько специализированных манипуляторов, что позволяет использовать объем камеры на 100 %. Электронно-лучевая пушка предприятия отличается повышенным ресурсом работы.

Установки, разработанные в НИТИ «Прогресс», имеют камеру и один универсальный манипулятор, объем камеры при этом существенно больше.

Оборудование непрерывно совершенствуется. В работах принимают участие инженеры-конструкторы отдела нестандартного оборудования и инженеры Службы специализированных лабораторий комбината «Электрохимприбор». На опытно-промышленном участке комбината на современном оборудовании электронно-лучевой обработки работают опытные специалисты. Осваиваются новые разработки, и проводятся научно-исследовательские работы. Заказы на проведение работ поступают от других предприятий региона, в том числе таких как ВСМПО АВИСМА (В. Салда) и НИИМаш (Н. Салда).

На установке собственной разработки ЭЛУ-68М, прошедшей многочисленные модернизации и совершенствования, можно осуществлять: прецизионную сварку в вакууме, вакуумное напыление, пайку, сварку криволинейных стыков тел вращения, сварку тугоплавких и разнородных металлов, локальное нанесение покрытия (в том числе из разнородных материалов) наружных и внутренних поверхностей, металлопластику методом нанесения слоя в вакууме. Данная установка обеспечивает высокую стабильность и воспроизводимость технологических параметров.

Установка является универсальной, благодаря не только своим техническим характеристикам (см. табл. 1), но и, благодаря имеющимся манипуляторам (см. табл. 2).

Таблица 1

Энергетические параметры установки

Параметр	Значение
Ускоряющее напряжение *U*уск.	5 – 40 кВ
Стабильность *U*уск.	± 0,02 %
Мощность луча	12 кВт
Ток луча, максимальный	300 мА
Стабильность тока фокусировки *I*ф	0,02 %
Рабочий вакуум в камере	$5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.
Вакуум в пушке	$3 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст.
Диаметр пучка	100 мкм при токе 1 мА
Ресурс катода	300 ч

Технологические возможности электронно-лучевой установки:

- прочностные характеристики сварного шва и околошовной зоны не уступают прочностным характеристикам основного материала;
- минимальные термические деформации;
- система управления лучом обеспечивает синхронное начало сварки и вращения;
- система наведения луча и слежения за стыком позволяет осуществлять сварку криволинейных швов и деталей с биением стыка до 5 мм;
- генератор развертки электронного луча позволяет осуществлять деление электронного луча на несколько (частота развертки 1000 Гц) для сварки, вакуумного напыления и обработки поверхности.

Таблица 2

Механические параметры

Параметр	Значение
Размеры камеры	Диаметр 900, длина 1500 мм
Габариты свариваемых изделий	Диаметр до 750 мм
	Длина до 900 мм
Фокусное расстояние от пушки до изделия	От 100 до 350 мм
Система наведения и слежения луча за стыком	Ширина отслеживаемого стыка не менее 0,05 мм; Величина биения стыка до ± 10 мм

Таблица 2 (окончание)

Параметр	Значение
Манипулятор одноместный с горизонтальной осью вращения и контролируемым механическим сжатием	Производительность сварки до 6 деталей в смену; Величина осевого усилия от 0 до 1,5 т; Скорость вращения максимальная 15 об/мин
Манипулятор с изменяемой осью вращения и регулируемым углом ее наклона	Производительность до 6 деталей в смену Сварка в горизонтальной оси изделий диаметром до 700 мм; Сварка швов с наклоном плоскости вдоль оси камеры от 0 до 90°; Сварка швов с наклоном поперек оси камеры ± 40°; Крепление детали - консольное
Шести местный манипулятор с горизонтальной осью вращения и вращающимся барабаном	Производительность до 30 деталей в смену; Радиус по центрам позиций барабана 250 мм; Максимальная скорость вращения позиции 0,13 об/мин; Максимальная скорость вращения барабана 0,5 об/мин Усилие пожатия детали на позиции – 3 кг

На участке производится сварка и нанесение покрытий, в среднем – около 2000 операций в год.

Сварка

На комбинате «Электрохимприбор» накоплен большой опыт по сварке тугоплавких металлов, таких как ниобий, тантал и молибден в сочетании с другими металлами. Используются преимущества имеющегося оборудования. Некоторые из них рассмотрим ниже.

1. Одним из достижений в области электронно-лучевой технологии является сварка заготовки и герметизирующего шва ниобиевого сопла. Для достижения максимальной производительности используется шестипозиционный манипулятор, позволяющий проводить радиальную сварку соединений: ниобий–ниобий, ниобий–стальХ18Н9Т, ниобий–титан за одну откачку.

2. Лейнер – герметизирующая оболочка из титана, работающая под давлением на околоземной орбите. Для сварки используется специализированный манипулятор с регулируемым углом оси вращения, а также оригинальная собственной разработки система наведения луча и слежения за стыком (защищенная тремя авторскими свидетельствами) [1, 2, 3]. Система позволяет осуществлять сварку изделий, получаемых раскаткой без высоких требований к прямолинейности шва.

После очередной проведенной модернизации установки были проведены исследовательские работы по определению максимальной глубины проплавления алюминия, стали, титана, режимы сварок каждого материала представлены в табл. 3, 4, 5. В результате были получены следующие данные:

Таблица 3

Режимы сварки алюминиевого образца

Ускоряющее напряжение, $U_{ус}$, кВ	Ток луча, $I_{св}$, мА	Скорость сварки, $V_{св}$, м/ч	Ток фокусировки, $I_{ф.\ ост.}$, мА	Степень фокусировки, мА
39,5	267	40	652	+20

Таблица 4

Режимы сварки низколегированной марганцовистой стали

Ускоряющее напряжение, $U_{ус}$, кВ	Ток луча, $I_{св}$, мА	Скорость сварки, $V_{св}$, м/ч	Ток фокусировки, $I_{ф.\ ост.}$, мА	Степень фокусировки, мА
39	276	20	628	+20

Таблица 5

Режимы сварки титанового образца

Ускоряющее напряжение, $U_{ус}$, кВ	Ток луча, $I_{св}$, мА	Скорость сварки, $V_{св}$, м/ч	Ток фокусировки, $I_{ф.\ ост.}$, мА	Степень фокусировки, мА
40	270	40	696	+10

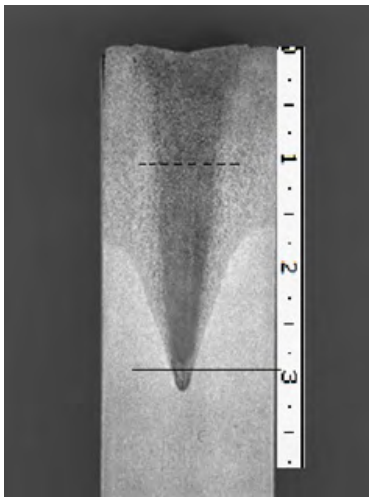


Рис. 1. Образец формы шва алюминия

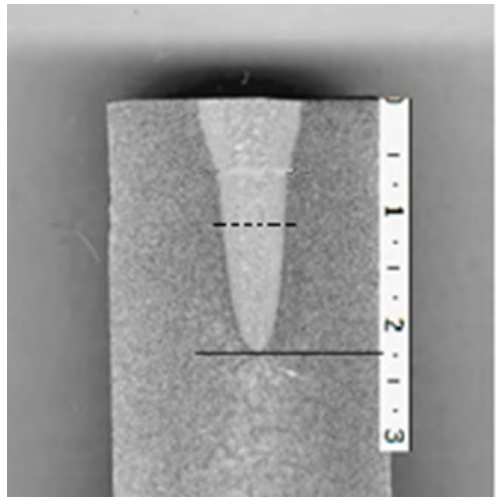


Рис. 2. Образец формы шва низколегированной марганцовистой стали

Рис. 3. Образец формы шва титана

Сварка образца, на режиме, приведенном в табл. 3, обеспечивала глубину проплавления 29 мм, ширина шва на половине глубины провара составляет 5,1 мм. Коэффициент соотношения равен 5,6. Дефекты в корне шва отсутствуют. Форма сварного шва представлена на рис. 1.

Сварка образца, на режиме, приведенном в табл. 4, обеспечивала глубину проплавления на 22,3 мм, ширина шва на половине глубины провара составляет 3,7 мм. Коэффициент соотношения равен 6. Дефекты в корне шва отсутствуют. Форма сварного шва представлена на рис. 2.

Сварка образца, на режиме, приведенном в табл. 5, обеспечивала глубину проплавления на 36,1 мм, ширина шва на половине глубины провара составляет 4,5 мм. Коэффициент соотношения равен 8. Дефекты в корне шва отсутствуют. Форма сварного шва представлена на рис. 3.

Получены данные по глубине проплавления стали 22,3 мм (при скорости сварки 20 м/ч), алюминия 29 мм (при скорости 40 м/ч), титана 38 мм (при скорости сварки 40 м/ч)

Напыление

Изготовление металлостеклянных спаев является основной операцией при производстве герметичных электроразъемов. Технология пайки металла со стеклом основана на процессе смачивания стеклом поверхности металла. Следует отметить, что диапазон металлов и марок сплавов, способных паяться таким методом, очень ограничен. Была разработана технология нанесения покрытия в отверстиях деталей коваром (рис. 4) [2]. Деталь имеет большое количество отверстий (от 4 до 10), диаметром 2,5 мм. Толщина покрытия находится в диапазоне от 10 до 20 мкм.

Согласно приведенной на рис.4 схеме, напыляемые отверстия детали *2* закрываются двумя масками. Верхняя маска *1*, имеет отверстие для прохода электронного луча, предотвращает запыление наружной поверхности детали вблизи отверстия. Одновременно ограничивается выход паров за пределы напыляемого объема, что повышает производительность процесса. Нижняя маска *3* формирует нижнюю границу нанесения покрытия и является тепловым изолятором между испарителем и деталью, что необходимо для поддержания температуры детали в заданных пределах в течение всего процесса. В качестве источника нагрева использовалась верхняя маска, которая в свою очередь нагревалась предварительно расфокусированным электронным лучом. Температура нагрева составляет 550–600 °С.

Для изучения толщины покрытия были выполнены металлографические исследования. Определение толщины покрытия производилось на продольных шлифах напыленных отверстий. Данный метод использовался для исследований распределения толщины покрытия.

Результат исследования баланса распределения испаренного металла приведен на рис. 5.

Пайка

Вольфрам – ниобий

Ранее для изготовления вольфрам – ниобиевого катода был использован метод прессования, прочность катода не удовлетворяла заданным требованиям. Был разработан метод пайки вольфрам – ниобий с помощью титанового припоя. Данный метод успешно используется на комбинате для пайки катодов электронно-лучевой пушки. Ресурс данной конструкции катода относительно традиционной схемы увеличен с 30 часов до 300 и более часов работы. При этом стабильными сохраняются геометрические размеры луча. Представлен шлиф паянного соединения вольфрам – ниобий (рис. 6).

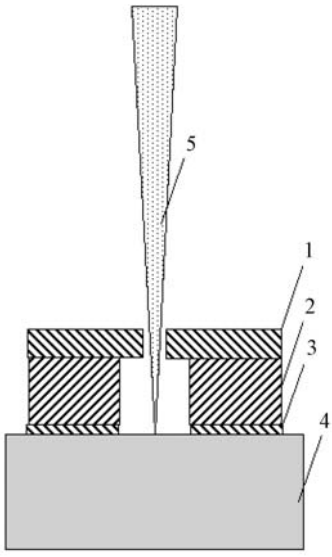


Рис. 4. Схема нанесения покрытия в отверстия: 1 – верхняя маска, 2 – напыляемая деталь, 3 – нижняя маска, 4 – испаритель, 5 – электронный луч

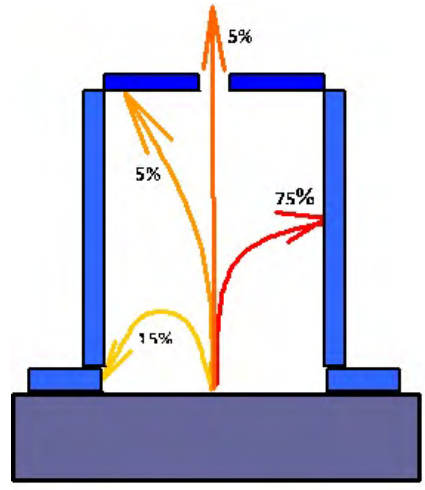


Рис. 5. Баланс распределения пара в отверстии

Рис. 6. Шлиф паянного соединения вольфрам – ниобий

Рис. 7. Пайка молибдена

Молибден – никель

На комбинате используется большое количество оснастки из молибдена. В процессе эксплуатации оснастка изнашивается и ломается. Восстановить элементы данной оснастки невозможно, из-за низких механических свойств сварного шва, обусловленного его крупнозернистой кристаллической структурой.

Публикации в технической литературе по методам восстановления таких деталей отсутствуют и было решено применить неординарное техническое решение.

Мной был предложен другой метод соединения отдельных частей молибденовых деталей посредствам пайки. При этом в качестве припоя был выбран и исследован никель. Паяный шов (рис. 7) никелем обеспечил прочность и надежность шва при температурах до 1000 °С.

Исследования паяного шва и зоны взаимной диффузии молибдена и никеля показали отсутствие структур в соединении ухудшающих механические свойства детали.

Литература

1. А.с. 1259581, СССР, МКИ 4 В 23 К 15/00. Устройство для управления электронно-лучевой сваркой / Дмитриев А. Л., Юров Л. В. // Изобретения. 1984.

2. А.с. 1441629, СССР, МКИ 4 В 23 К 15/00. Устройство для управления электронно-лучевой сваркой / Дмитриев А. Л., Юров Л. В. // Изобретения. 1986.

3. А.с. 1679718, СССР, МКИ 5 В 23 К 15/00. Устройство для управления электронно-лучевой сваркой / Дмитриев А. Л., Юров Л. В. // Изобретение. 1989.

4. Пат. 211258, РФ, МКП: 7С 23С 14/30.ФИПС, Рег. ЛР № 040921. Способ нанесения вакуумных покрытий в отверстиях / Анкудинов С. Н., Дмитриев А. Л., Черепанов Л. Н. // Изобретения. 2003.

ПАВ-РАДИОМЕТКА НА ОСНОВЕ МНОГОПОЛОСКОВОГО ОТВЕТВИТЕЛЯ СО СНИЖЕННЫМ УРОВНЕМ ПАРАЗИТНЫХ СИГНАЛОВ

С. П. Дорохов, А. С. Салов

Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю. Е. Седакова», г. Нижний Новгород

Введение

В настоящее время перспективным направлением развития радиотехнических комплексов дистанционной идентификации и контроля состояния объектов является разработка транспондеров, ключевой элемент в которых – радиометки, функционирующие на поверхностных акустических волнах (ПАВ). Основное преимущество таких устройств заключается в их устойчивости к различным дестабилизирующим факторам, таким, как воздействие ионизирующего излучения, ударных перегрузок и температурных воздействий в широком диапазоне.

Работа ПАВ-радиометки транспондера основана на генерации поверхностной акустической волны встречно-штыревым преобразователем (ВШП) при подаче на него опрашивающего радиоимпульса, прохождении ПАВ по поверхности пьезоэлектрической подложки и ее взаимодействии с расположенными на поверхности подложки отражательными структурами (ОС). При достижении ОС, ПАВ частично отражается и возвращается на ВШП, где, в результате прямого пьезоэффекта, преобразуется на его электродах в ответный информационный сигнал, содержащий идентификационный номер объекта и информацию о воздействовавших на него в процессе эксплуатации факторах.

Для осуществления правильной идентификации объекта и получения достоверной информации о его состоянии, одной их основных задач на стадии проектирования радиометки является необходимость производить расчет, позволяющий учесть влияние переотражений ПАВ от ОС и других вторичных эффектов, влияющих на характеристики систем дистанционной радиочастотной идентификации.

Целью настоящей работы является анализ физических механизмов переотражений в радиометках на ПАВ, моделирование импульсного отклика тестовой структуры одного канала радиометки, разработка конструкции ПАВ-радиометки со сниженным влиянием переотражений и увеличенным отношением «сигнал/шум».

Конструкции радиометок на ПАВ с амплитудным кодированием

В условиях воздействия дестабилизирующих факторов необходимую достоверность получаемых данных обеспечивает амплитудное кодирование информационного сигнала. Для достоверной идентификации объекта задается определенный уровень сигнала, при превышении которого импульс распознается как «1», если амплитуда импульса меньше заданного уровня, импульс идентифицируется как «0».

Конструкция радиометки на ПАВ с амплитудным кодированием представлена на рис. 1. Кодированная последовательность импульсов формируется путем переотражения сигнала опроса от системы ОС путем наличия («1») или отсутствия («0») отраженного импульса в заданном временном интервале. Поскольку в данной конструкции все отражательные группы располагаются в одном акустическом канале, возникает проблема множественных переотражений между ОС, формирующими информационный код.

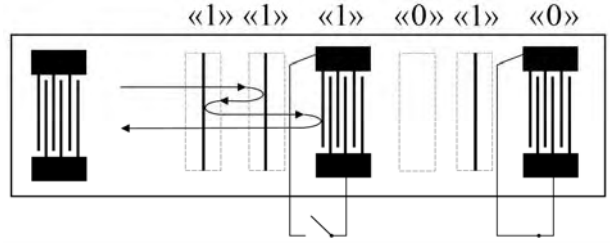


Рис. 1. Одноканальная конструкция радиометки на ПАВ с амплитудным кодированием

Один из способов решения данной проблемы описан в работе [1], где авторы предлагают для минимизации переотражений использовать для одного акустического канала не более 8 групп ОС, работая при этом с 4 акустическими каналами на увеличенной апертуре входного ВШП.

Другим решением проблемы множественных переотражений между группами ОС стал переход к многоканальной конструкции [2, 3, 4]. Для уменьшения уровня паразитных переотраженных сигналов каждую отражательную группу помещают в отдельный акустический канал, тем самым формируют многоканальную конструкцию (рис. 2). Ее преимущество заключается в возможности пространственного разнесения акустических каналов, обеспечивающих пониженный уровень ложных импульсов при формировании информационного сигнала с высоким коэффициентом отражения от каждой ОС.

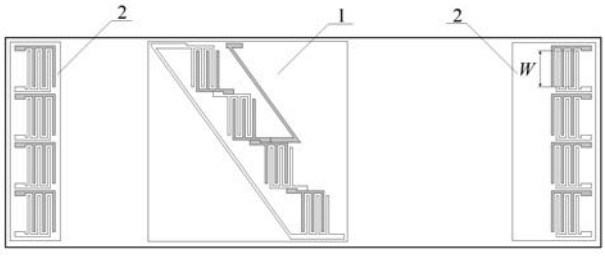


Рис. 2. Структурная схема многоканальной конструкции радиометки: 1 – входной / выходной преобразователь, состоящий из ненаправленных ВШП, 2 – отражательные структуры, W – апертура отражательной структуры

Каждый ВШП входного преобразователя генерирует поверхностную акустическую волну, в поле которой в параллельных акустических каналах на различных расстояниях от входного преобразователя размещены отражательные структуры (ОС). При необходимости формирования кодированной последовательности с большим количеством импульсов увеличивается число акустических каналов и, как следствие, число параллельно подключенных ВШП. В связи с этим импеданс входного преобразователя может быть неприемлемым для хорошего согласования с приемо-передающей антенной, что приведет к дополнительному затуханию импульсов информационного сигнала. Вопрос согласования входного преобразователя многоканальной конструкции с внешним волновым трактом был рассмотрен в работе [5].

При реализации многоканальной конструкции радиометки на ПАВ присутствуют потери, связанные с затуханием ПАВ при распространении, резистивные потери в ВШП и проводящих шинах, потери на дифракцию и потери в результате различных отражений и переотражений в акустических каналах. При увеличении информационной емкости подобных радиометок, часть ложных импульсов (импульсов двойного прохождения), образованных первой половиной ОС, попадет в информационный сигнал [4], поэтому необходимо проанализировать механизмы переотражений для снижения их влияния на информационный сигнал на стадии проектирования устройства.

Анализ физических механизмов переотражений в радиометках на ПАВ

В данном разделе рассмотрим основные типы паразитных отражений и переотражений, которые необходимо учитывать при проектировании топологии устройства на ПАВ.

В конструкции (рис. 1) информационный код формируется путем частичного отражения импульса опроса от групп ОС, расположенных в одном акустическом канале. В данной конструкции необходимо использовать малые коэффициенты отражения ОС, чтобы энергия распределилась между всеми информационными символами в акустическом канале. Как было сказано выше, формирование кодированной последовательности импульсов информационного сигнала в случае амплитудной модуляции происходит путем наличия («1») или отсутствия («0») ОС на соответствующем временном интервале.

На примере сигнала тройного отражения (рис. 1), становится ясно, что формируемый им импульс по времени задержки может совпасть с одним из информационных импульсов. Это не только влияет на неравномерность информационной посылки, но и ухудшает динамический диапазон между сигналами «1» и «0» в случае амплитудной модуляции. При этом в случае наличия ложного сигнала на месте отсутствующего информационного импульса «0» с амплитудой, превышающей заданный уровень, системой обработки информационного сигнала приемным устройством он может быть интерпретирован как информационный импульс «1», следовательно, будет получен недостоверный результат идентификации.

При реализации многоканальной конструкции (рис. 2) ОС в каждом акустическом канале располагаются по обе стороны ненаправленного ВШП, тем самым в каждом акустическом канале можно сформировать два информационных символа. Поскольку с одной стороны преобразователя формируется только один информационный символ, то можно использовать большие коэффициенты отражения для ОС при формировании кодированной последовательности, в отличие от конструкции, представленной на рис. 1. В многоканальной конструкции сталкиваемся еще с несколькими типами ярко выраженных паразитных сигналов. Первый – сигнал двойного и последующих проходов (рис. 3а).

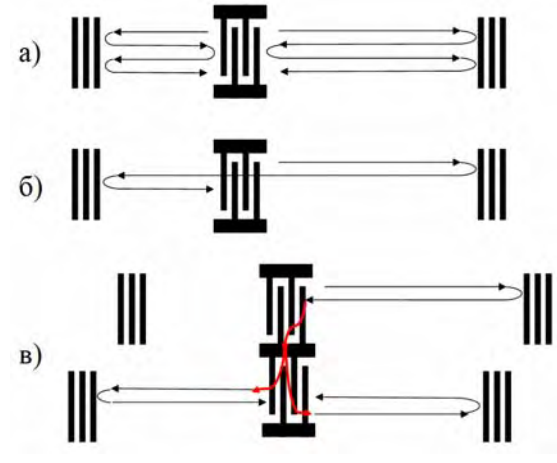


Рис. 3. Физические механизмы формирования паразитных сигналов в акустических каналах радиометки: а – сигнал двойного прохода; б – паразитного сигнала от смежного символа; в – межканальный паразитный сигнал

Для каждого информационного символа присутствуют сигналы двойного, тройного и последующих проходов, поскольку, в силу ненаправленности ВШП, часть мощности всегда отражается. Кроме

сигнала двойного прохода присутствует еще паразитный сигнал, обусловленный тем, что ненаправленный (входной/выходной) преобразователь пропускает через себя отраженный от отражательной структуры сигнал в сторону ОС, расположенной в этом же акустическом канале, формирующей другой информационного символ (рис. 3б). Помимо описанных выше паразитных сигналов, есть еще один ложный межканальный сигнал. Принцип его формирования показан на рис. 3в.

Расчет тестовой структуры одного канала радиометки

Проведем моделирование импульсного отклика тестовой структуры радиометки методом связанных мод (COM-методом) в программном пакете COMSOL Multiphysics для одного акустического канала многоканальной конструкции, представленной на рис. 2.

Для проведения расчета тестовой структуры используем метод моделирования, основанный на модифицированных уравнениях для связанных мод [7].

Используемый метод расчета основан на рассмотрении в структуре устройства двух однородных плоских волн, распространяющихся во встречных направлениях:

$$R(z,\omega) = R(\omega)\cdot\exp(-j\omega z), \qquad (1)$$

$$S(z,\omega) = S(\omega)\cdot\exp(+j\omega z), \qquad (2)$$

где $R(\omega)$, $S(\omega)$ – комплексные амплитуды поверхностных потенциалов с волновым числом к и круговой частотой ω, имеющие значения поверхностных электрических потенциалов.

При распространении ПАВ в периодической электродной структуре имеют место процессы их отражения и преобразования. Присутствие электродов на поверхности меняет скорость распространения волн и обуславливает взаимную связь между волнами. Отметим две причины: первая – частичное отражение ПАВ от электродов и вторая – возбуждение ПАВ посредством высокочастотного тока, протекающего в металлических электродах.

Можно записать уравнения, связывающие комплексные амплитуды ПАВ на входе $R_K(\omega)$, $S_K(\omega)$ и выходе $R_{K+1}(\omega)$, $S_{K+1}(\omega)$ K-го элемента структуры, и уравнение для тока через K-й электрод $I_K(\omega)$. Для формализации процесса вычисления, уравнения связанных волн удобно представить в матричной форме [8]:

$$\begin{bmatrix} S_K(\omega) \\ R_{K+1}(\omega) \\ I_K(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11}^K(\omega) & P_{12}^K(\omega) & P_{13}^K(\omega) \\ P_{21}^K(\omega) & P_{22}^K(\omega) & P_{23}^K(\omega) \\ P_{31}^K(\omega) & P_{32}^K(\omega) & P_{33}^K(\omega) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_K(\omega) \\ S_{K+1}(\omega) \\ U_0 \end{bmatrix}. \qquad (3)$$

Эквивалентную акустоэлектрическую схему тестовой структуры радиометки с ОС можно представить в виде, приведенном на рис. 4.

Результаты расчета импульсного отклика, полученного с помощью метода связанных мод, представлены на рис. 5.

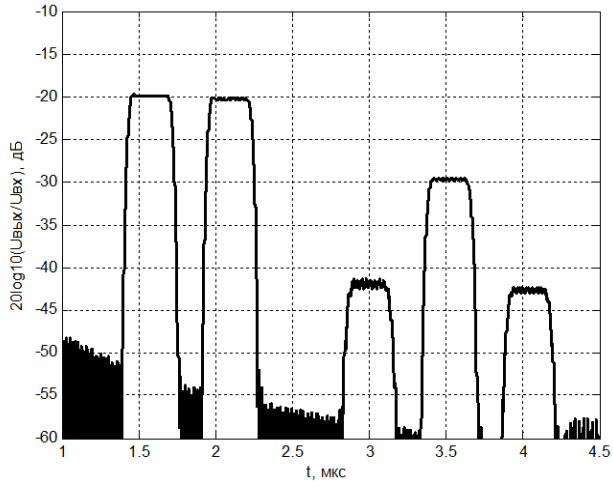


Рис. 5. Результат расчета импульсного отклика, полученного с помощью метода связанных мод

Как видно из рис. 5, кроме двух информационных символов присутствуют сигналы двойного прохода (время задержки 3 и 4 мкс соответственно) и паразитный сигнал от смежной ОС (время задержки 3,5 мкс).

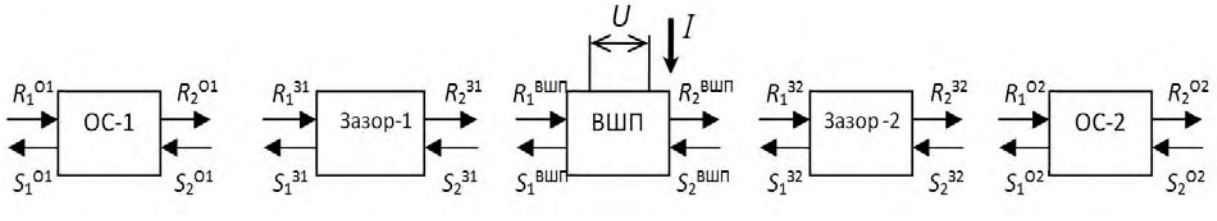


Рис. 4. Эквивалентная акустоэлектрическая схема тестовой структуры

Конструкция ПАВ-радиометки на основе МПО

Снижения влияния переотражений и увеличения отношения «сигнал/шум» можно достичь при реализации конструкции, представленной на рис. 6.

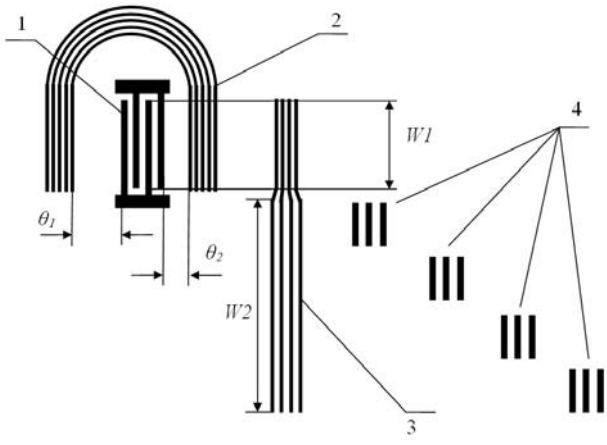


Рис. 6. Конструкция ПАВ-радиометки на основе МПО: 1 – входной ВШП; 2 – *U*-образный многополосковый ответвитель (МПО) с равным делением энергии; 3 – многополосковый ответвитель (компрессор); 4 – ОС

В качестве входного элемента, преобразующего радиоимпульс в ПАВ, используется однонаправленный преобразователь, обеспечивающий максимальное излучение энергии в заданном направлении. Чтобы реализовать однонаправленное распространение ПАВ, ВШП устанавливается между двумя плечами *U*-образного многополоскового ответвителя (МПО) с равным делением энергии так, чтобы выполнялось условие $\theta_1 - \theta_2 = \pi/2$. В этом случае волна, возбуждаемая ВШП и распространяющаяся в противоположных направлениях, достигает электродов *U*-образного МПО с разными фазовыми задержками, зависящими от положения преобразователя внутри ответвителя, обеспечивая, тем самым, однонаправленное излучение.

Ключевым элементом, позволяющим увеличить динамический диапазон между «0» и «1», является МПО, обеспечивающий полный перенос энергии, излученной входным преобразователем, из акустического канала апертуры W_1, сформированного ВШП, в акустический канал апертуры W_2, где установлены ОС, формирующие идентификационную кодированную последовательность импульсов (рис. 6). Апертура W_2 определяется требованиями к обеспечению необходимой информационной емкости радиометки, т. е. количеством ОС. Полная передача энергии из одного канала в другой обеспечивается при выполнении условия

$$d_1 - d_2 = \frac{\lambda(d_1 + d_2)}{4L_T} \frac{W_1 - W_2}{W_1 + W_2}, \qquad (4)$$

где L_T – длина МПО, d_1, d_2 – ширина зазора между электродами МПО с апертурами W_1 и W_2 соответственно.

При выполнении условия (4) обеспечивается полный перенос энергии ПАВ из одного канала в другой, когда длина МПО равна:

$$L_T^{'} = L_T \frac{W_1 + W_2}{2\sqrt{W_1 W_2}}. \qquad (5)$$

Максимальное подавление импульсов двойного прохождения достигается за счет того, что акустическая энергия, переизлученная МПО, достигает ОС и делится на N каналов, число которых соответствует количеству ОС. В случае отражения от входного преобразователя, акустическая энергия еще раз делится на N каналов, что позволяет обеспечить подавление импульсов двойного прохождения до 25 дБ.

Для исключения возможности попадания энергии ПАВ, сформированных ОС, из одного акустического канала в другой, на стадии проектирования радиометки обеспечивается их пространственное разнесение с учетом дифракционной расходимости ПАВ, излученных отражательными структурами. Минимальное расстояние от входного преобразователя до ближайшей отражательной структуры определяется из условия обеспечения достоверной идентификации объекта.

Радиометка работает следующим образом: при подаче радиоимпульса опроса на входной ВШП 1, генерируется ПАВ, распространяющаяся от преобразователя в противоположные стороны. При достижении ПАВ электродов *U*-образного МПО с фазовой задержкой $\theta_1 - \theta_2 = \pi/2$, реализуется однонаправленное излучение ПАВ (суммирование двух волн, первоначально излучаемых ВШП 1 в противоположных направлениях) в акустическом канале апертуры W_1, определяемой апертурой ВШП 1 с учетом дифракционной расходимости [4]. Полная энергия ПАВ, излученная в одну сторону и имеющая апертуру W_1, достигает многополоскового ответвителя (компрессора) 3, обеспечивающего полный перенос акустической энергии, излученной входным преобразователем, из акустического канала апертуры W_1 в акустический канал апертуры W_2, определяемой требованиями обеспечения информационной емкости радиометки (количества ОС). Достигнув ОС, акустическая энергия ПАВ в акустическом канале апертуры W_2 делится на N каналов, число которых соответствует количеству ОС, формирующих информационный сигнал. Отраженные волны, сформированные, в свою очередь ОС, возвращаются с определенными временными задержками на компрессор, где их энергия переносится в акустический канал апертуры W_1 и далее приходит на входной ВШП 1, где преобразуется в радиоимпульс, содержащий кодированный информационный сигнал.

Предлагаемая конструкция позволяет полностью исключить электрическое взаимодействие между акустическими каналами, что существенно уменьшает степень взаимных искажений импульсов информационного сигнала. Динамический диапазон между идентификационными «0» и «1» позволяет обеспечить максимальную различимость импульсов информационного сигнала при осуществлении его дальнейшей обработки. Так же к достоинствам предлагаемой конструкции относятся небольшие размеры пьезоэлектрической подложки, позволяющие обеспечивать компактность конечного изделия (радиометки).

На рис. 7 и 8 показаны импульсные отклики экспериментального образца, изготовленного на подложке 128°YX-среза $LiNbO_3$, содержащей 18 ОС. Выравнивание импульсного отклика по амплитуде осуществлялось за счет увеличения апертуры ОС на больших временах задержки.

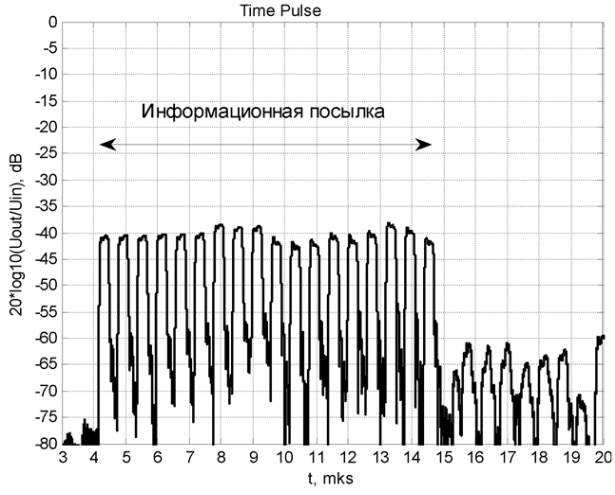


Рис. 7. Импульсный отклик экспериментального образца. Все импульсы – «1»

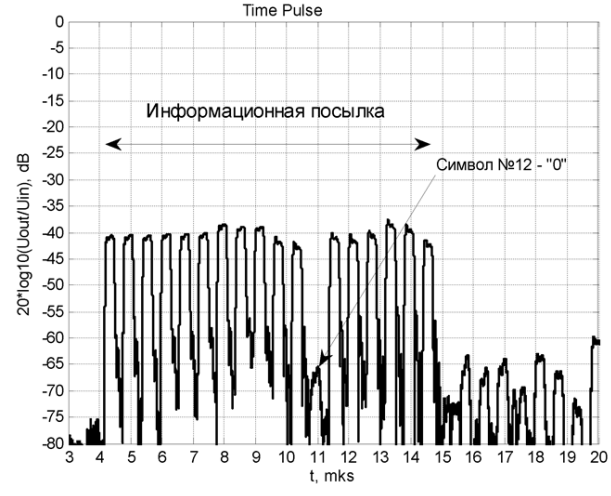


Рис. 8. Импульсный отклик экспериментального образца. Информационный символ № 12 – «0» при амплитудном кодировании

Анализ основных параметров изготовленных радиометок на ПАВ по импульсному отклику показал, что минимальные вносимые потери не превышают значения 38 дБ. Уровень неравномерности амплитуды в измеренном импульсном отклике не превышает значения 5 дБ. Уровень ложных сигналов не менее 23 дБ. Таким образом, новая уникальная конструкция позволяет работать с ОС с большим коэффициентом отражения и получить динамический диапазон не менее 23–25 дБ по ложным сигналам. Новая конструкция за счет применения ответвителя минимизирует все акустические отражения и переотражения, присущие «классической» схеме многоканальной метки и способна работать на любых временных задержках, без опасности влияния ложных сигналов.

Предлагаемая конструкция радиометки на ПАВ может быть использована в транспондере, осуществляющем идентификацию и регистрацию воздействия дестабилизирующих факторов на охраняемый объект, если в качестве ОС использовать ВШП.

Заключение

Показан физический механизм формирования паразитных/ложных импульсов, вызванных переотражениями ПАВ от отражательных структур радиометки. Представленная модель импульсного отклика тестовой структуры, состоящей из одного акустического канала, позволяет проводить учет влияния паразитных импульсов на стадии проектирования акустоэлектронных устройств.

Результаты, полученные при проектировании многоканальной радиометки, позволяют решать задачи по практической реализации систем дистанционной идентификации объектов, построенных на транспондерах.

В реализованной конструкции многоканальной ПАВ-радиометки на основе МПО увеличено отношение «сигнал/шум», что упрощает обработку информационного сигнала и позволяет увеличить дальность действия системы дистанционной идентификации и контроля.

Литература

1. Reindl L., Ruile W. Programmable Reflectan for SAW-ID-Tags. // IEEE Ultrasonics Symp. Proc. 1993. P. 125–130.

2. Plessky V. P., Kondratiev S. N., Stierlin R., Nyffeler F. SAW Tags: New Ideas. Proc. IEEE Ultrasonics Symp. 1995. P. 117–120.

3. Пат. 2522886, РФ, С2. Многоканальная отражательная линия задержки на поверхностных акустических волнах / Дорохов С. П., Князев И. А., Салов А. С. // Бюл. 2014. № 20.

4. Дорохов С. П., Козлов В. А., Салов А. С. Оптимизация конструкции многоканальной ОЛЗ на ПАВ // Проектирование и технология электронных средств. 2017. № 2. С. 22–26.

5. Дорохов С. П. Многопараметрический транспондер на основе пассивной радиометки на поверхностных акустических волнах // Датчики и системы. 2018. № 11. С. 35–41.

6. Campbell C. K. Surface Acoustic Wave Devices for Mobile and Wireless Communications. Boston: Academic Press, 1998. P. 631.

7. Дмитриев В. Ф. Вывод модифицированных уравнений связанных поверхностных акустических волн // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54, № 9. С. 1134–1143.

8. Балышева О. Л., Григорьевский В. И., Гуляев Ю. В., Дмитриев В. Ф., Мансфельд Г. Д. Акустоэлектронные устройства обработки и генерации сигналов. Принципы работы, расчета и проектирования. Под ред. академика РАН Гуляева Ю. В. М.: Радиотехника, 2012. С. 576.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ РЕМОНТА АНТИАДГЕЗИОННОГО ПОКРЫТИЯ

И. Р. Закирова, Г. Х. Коршунова, М. П. Пасечник, С. Н. Силяева, А. А. Дорофеев

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

При разработке новых изделий возникает необходимость в высокотемпературной теплозащите изделий при аварийных тепловых воздействиях. Для этих целей возможно использование негорючего теплоизоляционного материала «Сферолит» [1]. Формирование заготовок из материала «Сферолит» происходит методом заливки заранее приготовленной смеси в ограничительные разъемные формы (рис. 1), с последующим отверждением при повышенных (до 250 °С) температурах.

Из материала «Сферолит» изготавливаются заготовки двух видов: в виде диска и цилиндра (рис. 2).

Рис. 1. Ограничительные формы для получения заготовок из «Сферолита»

а б

Рис. 2. Внешний вид заготовок из «Сферолита»: а – в виде диска; б – в виде цилиндра

Технология ремонта антиадгезионного покрытия в локальных местах

Материал «Сферолит» обладает высокой адгезией, при отсутствии антиадгезионного покрытия извлечь готовую заготовку из формы без разрушения материала практически невозможно. Для исключения риска залипания отвержденных заготовок к внутренним поверхностям ограничительных форм предварительно на все рабочие поверхности форм с использованием плазменной струи напыляется порошок фторопласта марки Ф-4МБ, затем фторопласт спекается при температуре (350–360) °С в течение 1,5 часов до образования сплошного однородного покрытия. Напыление и оплавление фторопласта таким способом повторяется три раза. В результате образуется износоустойчивое антиадгезионное покрытие, позволяющее изготавливать до 30–40 заготовок в одной форме.

В процессе эксплуатации возможно локальное повреждение фторопластового покрытия в виде отслоения или царапин. В случае повреждения фторопластового покрытия (рис. 3) требуется производить его ремонт.

В зависимости от степени повреждения антиадгезионного фторопластового покрытия ремонт осуществляется несколькими способами:

– при сильном повреждении антиадгезионного покрытия ремонт осуществляется снятием отработанного покрытия с последующим напылением нового, аналогичного удаленному, отработанному слою, фторопласта;

– для ремонта небольших отслоившихся участков фторопластового покрытия используется дорогостоящее импортное средство- антиадгезионная смазка-спрей «PTFEN» фирмы «Molykote».

Но оба эти способа ремонта используют дорогостоящие компоненты, дорогое оборудование. Кроме того, ремонт с использованием плазмохимического метода длителен по времени и требует больших энергозатрат. Поэтому возникла необходимость в разработке более простого способа локального ремонта поврежденного антиадгезионного покрытия. В РФЯЦ-ВНИИЭФ разработана технология ремонта фторопластового покрытия путем нанесения локального антиадгезионного слоистого покрытия на основе отечественных полимерных материалов.

Из литературных данных известно, что при производстве лаков и защитных эмалей в качестве пленкообразующего вещества применяется фторопласт марки 32Л, который хорошо растворяется в сложных эфирах, кетонах при нормальной температуре [2]. На начальных этапах работы при получении защитного покрытия использовался фторопласт 32Л. Но многочисленные эксперименты показали, что низкая рабочая температура фторопласта 32Л (208–210 °С, что гораздо ниже температуры отверждения материала «Сферолит»), может приводить к залипанию материала, извлечь отвержденную заготовку без разрушения материала невозможно.

Дальнейшие исследования при разработке защитного покрытия проводились на фторопласте 4 МВ, который обладает хорошими антиадгезионными свойствами, высокой температурой плавления – 270–295 °С. Фторопласт 4МВ не растворяется в растворителях [2], поэтому нанесение порошка фторопластана ремонтируемую поверхность проводилось с использованием эпоксидных смол (ЭД-20, Л-20), растворенных в органическом растворителе – метиленхлориде.

При ремонте антиадгезионного покрытия на поврежденную поверхность изначально наносился слой композиции эпоксидных смол в растворителе, далее на него напылялся слой фторопласта. Но ряд экспериментов показал, что при таком способе нанесения покрытие не полностью обеспечивало антиадгезионные свойства, так как при заливке «Сферолита» фторопласт 4 МВ в некоторых случаях могне схватываться с эпоксидными смолами. В результате при заливке порошок фторопласта осыпался, что приводило к залипанию отвержденной заготовки к поверхности формы. В ходе дальнейших эксперименталь-

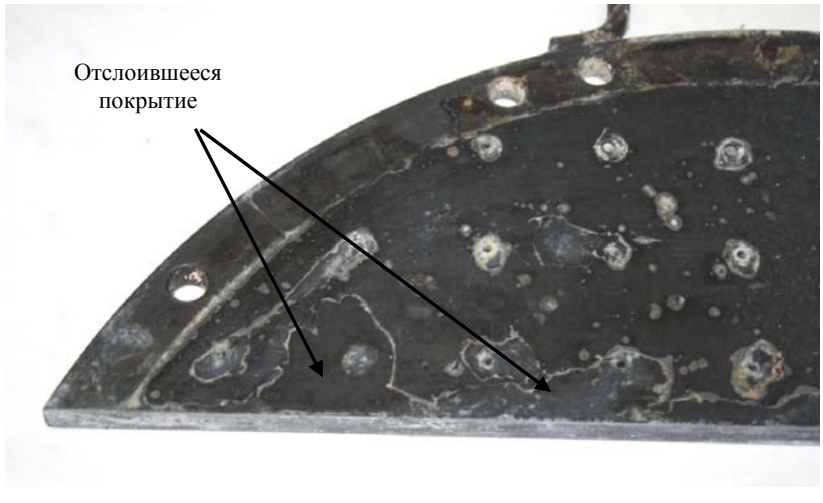


Рис. 3. Поврежденное фторопластовое покрытие крышки формы

ных работ было принято решение нанесенный фторопласт покрывать дополнительным слоем эпоксидных смол в растворителе для предотвращения осыпания фторопласта, то есть заключать фторопласт между слоями эпоксидных смол.

В результате была разработана технология ремонта фторопластового покрытия, состоящая из нескольких этапов:

– подготовка поверхности ограничительной формы к ремонту;

– предварительное приготовление композиции для антиадгезионного покрытия;

– нанесение слоя антиадгезионного покрытия;

– отверждение полученного покрытия.

Перед нанесением фторопластового покрытия требовалась подготовка поверхности ограничительной формы к ремонту. Локальный поврежденный участок внутренней поверхности сегмента ограничительной формы очищался от загрязнений, обезжиривался ацетоном.

Предварительно готовилась композиция для антиадгезионного покрытия на основе смол ЭД-20 и Л-20 и органического растворителя – метиленхлорида. Опытным путем было определено оптимальное соотношение компонентов композиции. Рецептура эпоксидных смол в растворителе представлена в таблице.

Рецептура композиции эпоксидных смол в растворителе

Исходные компоненты	Нормативно-техническая документация	Массовые части
ЭД-20	ГОСТ 10587-84 [3]	100
Л-20	ТУ 6-06-1123-98 [4]	100
Метиленхлорид	ТУ 2412-426-05763441-2004 [5]	800

В отдельную емкость бралась навеска смол ЭД-20 и Л-20 в количестве по 3 г каждой смолы. В эту же емкость добавлялся растворитель – метиленхлорид в количестве 25 г. Полученная смесь тщательно перемешивалась до полного растворения эпоксидных смол. Первоначально на ремонтируемый участок формы кистью равномерно наносился слой приготовленного раствора. Сразу же после этого (по истечению не более 1 минуты) на поверхность нанесенного раствора напылялся слой фторопласта Ф-4 МБ через сито с размером ячеек 0,5 мм. Количество напыляемого фторопласта зависело от площади ремонтируемой поверхности. Экспериментально было установлено, что на ремонт поверхности формы площадью 150 $см^2$ необходимо 2,5 г фторопласта.

Форма с нанесенным покрытием ставилась на 4 часа для отверждения в предварительно нагретый до 50 °С термошкаф.

По истечению указанного времени форма извлекалась из термошкафа и охлаждалась до комнатной температуры.

На отвержденный слой покрытия пульверизатором распылялась предварительно приготовленная композиция эпоксидных смол в метиленхлориде (рецептура указана в таблице), таким образом, чтобы вся поверхность была смочена раствором. Форма с нанесенным защитным покрытием выдерживалась для образования пленки при комнатных условиях 20 часов. На рис. 4 представлена крышка ограничительной формы с нанесенным защитным фторопластовым покрытием.

Как показали эксперименты, предлагаемый способ ремонта обеспечивал получение эффективно функционирующего антиадгезионного слоистого покрытия, препятствующего прилипанию формуемой массы к стенкам ограничительной формы.

На рис. 5 представлена поверхность формы с нанесенным защитным фторопластовым покрытием после отверждения заготовки из материала «Сферолит». После вспенивания крышка легко отходила от поверхности заготовки. Поверхность защитного покрытия оставалась неповрежденной. Отремонтированная таким образом форма могла повторно использоваться при последующем изготовлении заготовок и выдерживать многократные (не менее 5 раз) экс-

Рис. 4. Поверхность ограничительной формы с защитным фторопластовым покрытием

Рис. 5. Поверхность отремонтированной ограничительной формы после изготовления заготовки

Рис. 6. Участок поверхности вспененной заготовки «Сферолит»

плуатационные нагрузки при формовании в них заготовок из материала «Сферолит».

На рис. 6 представлен участок поверхности вспененной заготовки «Сферолит», к которому прилегала поверхность отремонтированного фторопластового покрытия.

Разработанная технология позволяет локально отремонтировать защитное покрытие, при этом отпадает необходимость:

– в использовании дорогостоящей импортной антиадгезионной смазки-спрея «PTFEN» фирмы «Molykote», производство США;

– в длительном по времени и трудоемком нанесении антиадгезионного покрытия из фторопласта Ф-4МБ по всей рабочей поверхности ограничительной формы.

Использование разработанного слоистого покрытия в 5 раз дешевле импортного покрытия «PTFEN», ведет к сокращению трудозатрат при изготовлении длительного по времени и трудоемкого нанесения антиадгезионного покрытия из фторопласта Ф-4МБ по всей рабочей поверхности ограничительной формы.

На разработанную технологию получения слоистого покрытия подана заявка на выдачу патента (№ 2018 137384, приоритет от 22.10.18) [7].

Заключение

1. Отработана рецептура состава для локального ремонта фторопластового антиадгезионного покрытия. В качестве композиции для антиадгезионного покрытия использовался порошок фторопласта 4 МВ совместно с раствором эпоксидных смол (ЭД-20, Л-20) в метиленхлориде.

2. Отработана технология нанесения разработанной композиции на рабочую поверхность ограничительных форм.

3. Показана возможность локального ремонта защитного фторопластового антиадгезионного покрытия, при этом отпадает необходимость:

– в антиадгезионном дорогостоящем импортном покрытии «PTFEN»;

– в длительном по времени и трудоемком нанесении антиадгезионного покрытия из фторопласта Ф-4МБ по всей рабочей поверхности ограничительной формы.

Литература

1. Быкова Э. В., Блинников П. Ю., Дорофеев А. А., Коршунова Г. Х., Силяева С. Н. Отработка технологии изготовления и внедрение в производство огнестойкого теплоизоляционного материала «Сферолит» применительно к изделиям, разрабатываемым в РФЯЦ-ВНИИЭФ // Свойства и переработка полимерных композиционных материалов. 2009. С. 168–172.

2. Антипов Ю. В., Бабаевский П. Г., Бородай Ф. Я. и др. Машиностроение. Энциклопедия. Неметаллические конструкционные материалы. М.: Машиностроение, 2005. Т. II-4. С. 464.

3. ТУ 301-05-73-90. Технические условия. Фторопласт - 4МВ.

4. ГОСТ 10587-84. Смолы эпоксидно- диановые неотвержденные.

5. ТУ 6-06-1123-98. Отвердители для эпоксидных смол марок Л-18, Л-19, Л-20 // ОАО «Институт пластмасс».

6. ТУ 2412-426-05763441-2004 Технические условия. Метилен хлористый.

7. Заявка на патент № 2018137384, приоритет от 22.10.18 Способ получения антиадгезионного слоистого покрытия / Закирова И. Р., Дорофеев А. А., Коршунова Г. Х., и др.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОМЕНТА ВРЕМЕНИ ВСТРЕЧИ ИЗДЕЛИЯ С ПРЕГРАДОЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУШНЫХ ВОЛН

С. В. Батарев, А. В. Гришин, А. А. Застылов, А. В. Пещенко, А. Н. Хорошко

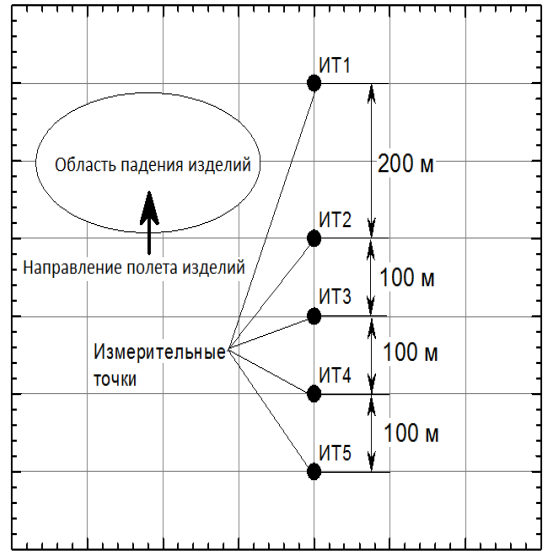
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Испытания изделий, являющиеся важной и неотъемлемой частью процесса их разработки, представляют собой сложный и дорогостоящий эксперимент. Поэтому к методам и средствам измерений, применяемым в испытаниях, предъявляются требования надежного получения экспериментальных данных. На практике это обеспечивается выполнением измерений по нескольким методикам, основанным на различных физических принципах. В испытаниях некоторых видов изделий применение акустических методов и средств измерений, позволяет увеличить объем и надежность получения экспериментальных данных.

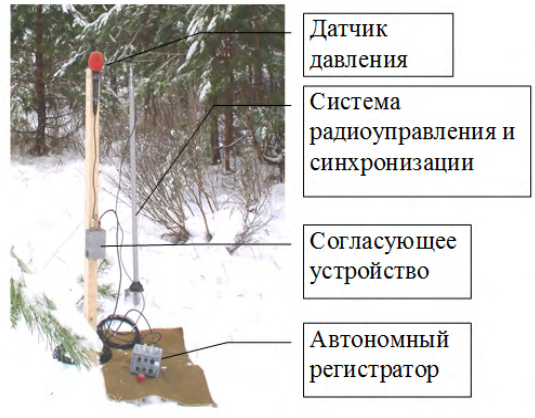
Применение акустических методов основано на измерении параметров слабых ударных и акустических волн, создаваемых в испытаниях изделием или его функциональными элементами и распространяющихся в воздушной среде во всех направлениях. Эта особенность распространения волн в среде позволяет не прицеливаться на объект, что наряду с отсутствием требований оптической прозрачности среды делает целесообразным применение акустических измерений в испытаниях некоторых видов изделий. Источником информации для получения экспериментальных данных являются сигналы как импульсного характера, порождаемые воздушными ударными волнами, так и сигналы, порождаемые широкополосными акустическими шумами длительного действия.

Для применения в испытаниях разработаны и используются акустические методики, позволяющие определять важные экспериментальные данные о пространственно-временном положении изделия на траектории. С появлением новых видов испытаний эти методики адаптируются под их задачи или же разрабатываются новые.

В частности, акустические измерения выполнялись в испытаниях, особенностью которых являлся подход группы изделий к поверхности преграды (в данном случае под преградой понимается поверхность земли) под острым углом на сверхзвуковой скорости и с разновременностью, составляющей десятки миллисекунд. Измерения параметров воздушных волн выполнялись датчиками давления в измерительных точках (ИТ). Схема размещения ИТ на мишенной площадке приведена на рис. 1а. Фотография ИТ представлена на рис. 1б. Регистрация сигналов с датчиков давления осуществлялась во временной шкале, синхронизированной с системой единого времени эксперимента.



а



б

Рис. 1. Постановка измерений в летных испытаниях: а – схема размещения ИТ на мишенной площадке, б – фотография ИТ

Результаты измерений, полученные в одной из ИТ при подходе и встрече изделий с преградой, представлены на рис. 2. Из рис. 2 видно, что датчиком зарегистрированы две группы волн. Количество волн в каждой группе равно количеству изделий

в эксперименте. В первой группе зарегистрированы баллистические ударные волны (БУВ) [2], во второй группе – акустические волны (АВ).

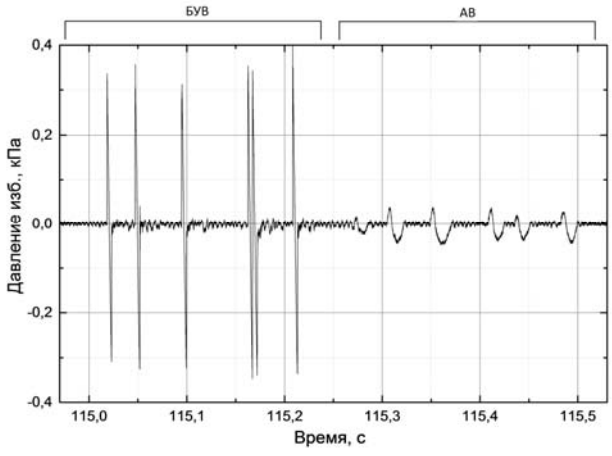


Рис. 2. Результаты акустических измерений, полученные в одной из ИТ

На рис. 3 показан профиль волны давления из первой группы. Вследствие превышения местной скорости звука изделие создает вокруг себя систему воздушных волн, огибающая которых в пространстве образует устойчивую коническую поверхность, называемую конусом возмущения. Угол α между траекторией полета и образующей конуса связан соотношением $\sin(\alpha)=1/M$, где M – число Маха [1]. Воздушные волны, образующие конусвозмущения, называются баллистическими ударными волнами [2], имеют характерный N-образный профиль и без значительных искажений формы распространяются в пространстве на большие расстояния.

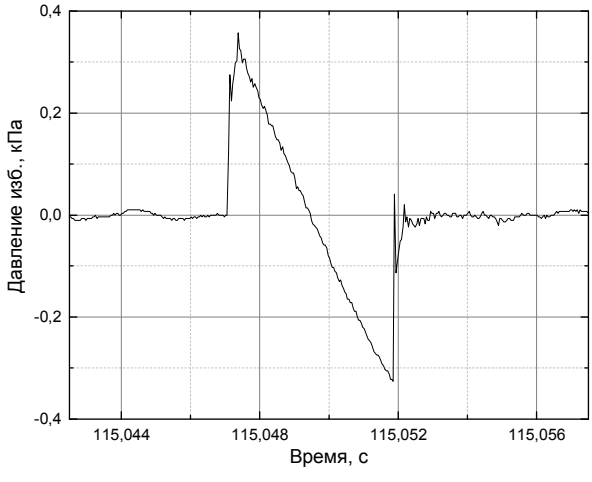


Рис. 3. Профиль избыточного давления волны из первой группы

На рис. 4 представлен профиль волны давления из второй группы. Это АВ. В отличие от БУВ, АВ несут признаки неподвижного точечного источника звука. При точечном возбуждении АВ распространяются сферично, с одинаковой интенсивностью во всех направлениях. С расстоянием они интенсивно затухают и уже на расстоянии ~400 м от точки падения изделия их амплитуда не превышает 20 Па.

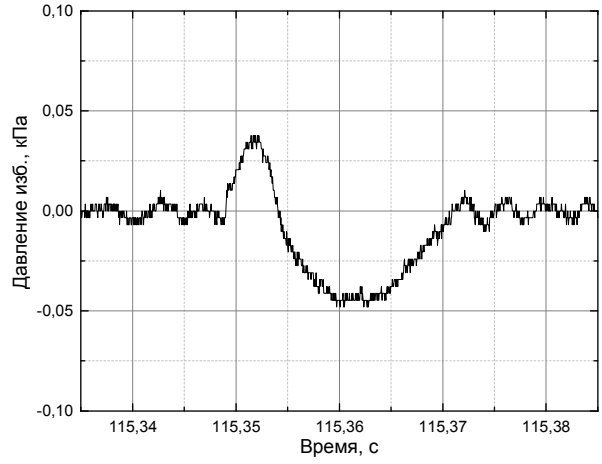


Рис. 4. Профиль избыточного давления волны из второй группы

Регистрируемое в нескольких ИТ акустическое поле в окрестности мест падения изделий подтверждает факт принципиального различия распространения БУВ и АВ (рис. 5). Точка падения тела делит измерительную площадку на «недолетную» и «перелетную» зоны. Схематично это представлено на рис. 5.

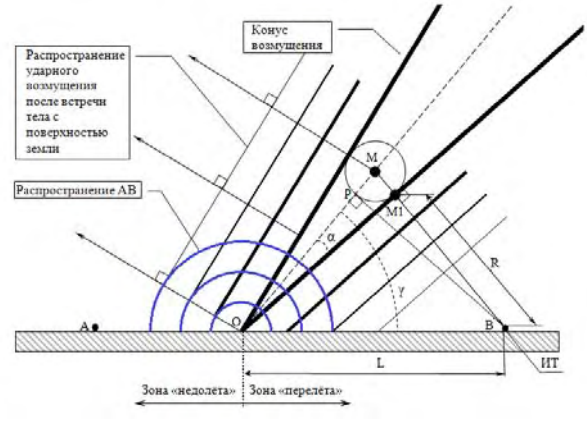


Рис. 5. Схема распространения воздушных волн при подходе и встрече сверхзвукового изделия с преградой

После встречи изделия с преградой БУВ распространяется в пространстве за первоначальные пределы конуса возмущения по нормали к его поверхности со скоростью звука. В следствие наклона оси конуса к поверхности преграды БУВ регистрируется датчиками только в «перелетной» зоне (точка В на рис. 5), в «недолетную» зону (точка А на рис. 5) она в «чистом» виде не доходит, распространяясь вдоль поверхности в виде сферической дифрагированной

волны. АВ в отличие от БУВ распространяются в воздушной среде сферично, поэтому регистрируются датчиками, как в «перелетной», так и в «недолетной» зонах.

По результатам измерений параметров АВ и БУВ можно выполнить расчет времени встречи изделия с преградой.

Момент встречи изделия с преградой $T_{\text{вс.АВ}}$ по результатам регистрации АВ от встречи изделия с преградой может быть определен по формуле

$$T_{\text{вс.АВ}} = T_{\text{рег.АВ}} - \frac{L}{V_{\text{зв}}}, \qquad (1)$$

где $T_{\text{рег.АВ}}$ – время регистрации АВ в ИТ, L – расстояние от точки встречи изделия с преградой до датчика, вычисляется по координатам датчика и воронки, $V_{\text{зв}}$ – скорость звука при соответствующих метеоусловиях.

Момент времени встречи изделия с преградой $T_{\text{вс.БУВ}}$ по результатам регистрации БУВ может быть определен по формуле [3]

$$\Delta T_{\text{вс.БУВ}} = \Delta T_{\text{рег.БУВ}} - \frac{R}{V_{\text{зв}}}, \qquad (2)$$

где $T_{\text{рег.БУВ}}$ – время регистрации БУВ в измерительной точке, R – расстояние от поверхности конуса возмущения (точка М1) до ИТ (точка В) в момент встречи изделия с преградой, вычисляется с использованием данных о траектории движения изделия, описываемой на финишном участке параметрическим уравнением прямой, включающим значения углов между траекторией и осями выбранной локальной прямоугольной системы координат и значение скорости ОИ.

Скорость и направление ветра в расчетах по формулам (1) и (2) учитываются в величине скорости звука следующим образом

$$V_{\text{зв}} = V_{\text{зв}} + V'_{\text{в}}, \qquad (3)$$

где $V'_{\text{в}}$ – величина проекции вектора скорости ветра на линию распространения воздушной волны, $V_{\text{зв.изм}}$ – скорость звука, для соответствующей температуры воздуха $T_{\text{в}}$.

Каждый из способов имеет свои преимущества. Преимущества способа определения момента встречи изделия с преградой по результатам регистрации БУВ определяются свойствами БУВ и условиями ее распространения (сверху-вниз):

– относительно большая амплитуда и малая длина волны на одинаковом удалении (по сравнению с АВ);

– характерная, легко идентифицируемая форма профиля давления;

– способность распространяться на большие расстояния без значительного изменения формы профиля давления.

Способ определения момента времени встречи изделия с преградой по результатам регистрации возбуждаемой этим процессом АВ имеет следующие достоинства:

– инвариантность, обеспечиваемая распространением волны во все стороны от точки падения изделия;

– меньшее количество данных, необходимых для выполнения расчетов (нужны лишь координаты датчика и воронки), что обеспечивает меньшую погрешность.

Описанные способы определения момента времени встречи изделия с преградой основаны на измерении воздушных волн, регистрация которых может быть осуществлена одной измерительной системой. Поэтому в основу разрабатываемой методики положены оба способа, что обеспечит надежность получения результата.

В разрабатываемой методике определены требования к размещению датчиков на мишенной площадке и их координированию, используемые средства измерений, включая датчики, согласующие устройства и регистраторы, требования к синхронизации результатов измерений с системой единого времени эксперимента, способы расчета момента времени встречи изделия с преградой и определения погрешностей обоих методов.

При размещении датчиков на мишенной площадке выполняется их геодезическая привязка к локальной системе пространственных прямоугольных координат мишенной площадки (рис. 6). В этой же системе определяются координаты фактической точки встречи изделия с преградой.

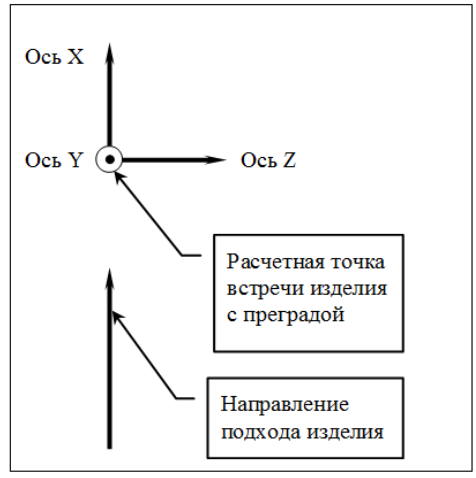


Рис. 6. Локальная система прямоугольных пространственных координат

Центром локальной системы прямоугольных пространственных координат является расчетная точка встречи изделия с преградой. Первая горизон-

тальная ось X системы координат находится в плоскости полета изделий, а ее положительное направление совпадает с направлением подхода изделия к мишенной площадке. Ось Y системы направлена вертикально вверх. Ось Z дополняет систему координат до правой. С помощью электронного тахеометра, например TRIMBLE M5", в этой локальной системе координат мишенной площадки определяются координаты каждого датчика давления. С использованием этого оборудования в полигонных условиях обеспечивается погрешность геодезической привязки не более ±0,1 м по каждой из координат, что существенно меньше погрешности определения координат точки встречи изделия с преградой.

Система акустических измерений включает в себя как минимум одну измерительную точку и систему управления и синхронизации (СУиС). В ИТ размещается датчик давления, который устанавливается на уровне подстилающей поверхности. С учетом возможного отклонения фактической точки попадания изделия измерительная точка может оказаться как в «перелетной», так и в «недолетной» зоне. Если ИТ окажется в «перелетной» зоне, то датчиком давления будут зарегистрированы ударные волны, вызванные полетом изделия на сверхзвуковой скорости и акустические волны, вызванных взаимодействием изделия с преградой. Если ИТ окажется в «недолетной» зоне, то датчиком давления будут зарегистрированы акустические волны, вызванные взаимодействием изделия с преградой.

В качестве первичного измерительного преобразователя используется пьезорезистивный датчик избыточного давления. Сигналы с датчика через предусилители передаются по измерительным линиям на регистраторы, размещаемые в непосредственной близости от датчиков. В качестве регистраторов применяются системы MIC-300M, MIC-355M производства отечественной фирмы НПП «МЕРА» (реализующие функции самописца с возможностью регистрации длительных минутных интервалов времени). При отсутствии электрической сети используются регистраторы в полевом исполнении, оснащенные энергонезависимой памятью.

Измерительные системы обеспечивают регистрацию сигналов в течении необходимой длительности, обусловленной условиями испытаний, с частотой дискретизации сигналов датчиков не менее 12,5 кГц. Требование по частоте опроса датчиков определены частотным диапазоном регистрируемых сигналов и условием не превышения расстояния, преодолеваемого акустической волной за период дискретизации (составляющем для 12,5 кГц менее 0,03 м) погрешности геодезической привязки датчика к локальной системе координат (±0,1 м). Запуск регистраторов должен быть синхронизирован с системой единого времени эксперимента.

СУиС предназначена для приема управляющих команд и сигналов системы единого времени, поступающих от синхронизирующей аппаратуры. На мишенной площадке СУиС размещается в непосредственной близости от внешней аппаратуры синхронизации и управления, либо от приемной аппаратуры сигналов системы единого времени.

В перспективе система акустических измерений будет дополнена регистраторами в полевом исполнении, оснащенными модулем ГЛОНАСС/GPS для привязки измерений к системе единого времени эксперимента по сигналам спутников, и объединенными в единую сеть, обеспечивающую радиоуправление режимами работы и синхронизацию измерений.

При выполнении расчетов используется информация о параметрах атмосферы. Поэтому в процессе проведения испытаний в окрестности испытательной площадки должны выполняться измерения следующих метеоусловий:

– температура воздуха с абсолютной погрешностью ±0,5 °С;

– скорость ветра – $V_{\text{в}}$, [м/с] с относительной погрешностью $\delta = \pm 10$ %;

– направление ветра с абсолютной погрешностью ±15° по азимуту.

В зависимости от характеристик испытываемой системы вооружений ИТ могут быть размещены на значительных расстояниях друг от друга с целью охвата наибольшей площади. Один комплект из четырех ИТ позволяет регистрировать воздушные волны на площади до 2 км^2.

Опишем погрешности определения момента времени встречи изделия с преградой по результатам измерений АВ $\left(\Delta T_{\text{вс.АВ}}\right)$ и БУВ $\left(\Delta T_{\text{вс.БУВ}}\right)$.

Основными составляющими погрешности $\Delta T_{\text{вс.АВ}}$ определения момента времени встречи изделия с преградой по результатам измерений АВ являются погрешности величин, составляющих формулу (1):

$\Delta T_{\text{рег.АВ}}$ – погрешность времени регистрации момента достижения АВ датчиком, определяется частотой дискретизации сигнала F_d, нестабильностью задающего генератора измерительной системы $n_{\text{г}}$, длительностью регистрации $T_{\text{рег.АВ}}$;

ΔL – погрешность определения расстояния от воронки до датчика, определяется погрешностью определения координат датчика и воронки;

$\Delta V_{\text{зв}}$ – погрешность определения скорости звука, определяется погрешностями измерения температуры воздуха, скорости и направления ветра.

Результирующую погрешность расчета времени встречи изделия с преградой можно рассчитать согласно [4] по следующей формуле

$$\Delta T_{\text{вс.АВ}} = \pm\sqrt{\left(\Delta T_{\text{рег.АВ}}\right)^2 + \left(\Delta T_{\text{распр.АВ}}\right)^2} = \\ = \sqrt{\left(\frac{2}{F_d} + n_{\text{г}} \cdot T_{\text{рег}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta L}{V_{\text{зв}}}\right)^2 + \left(\frac{L \cdot \Delta V_{\text{зв}}}{V_{\text{зв}}^2}\right)^2} \qquad (4)$$

Рассчитаем величину погрешности с использованием следующих исходных данных:

– частота дискретизации сигнала с датчика F_d = = 25000 Гц;

– относительная нестабильность генератора АЦП $n_г = 10^{-4}$;

– время регистрации АВ $T_{рег.}$* = 1 с;

– температура воздуха в окрестности измерительной площадки $T_в$ = 13 °С;

– расстояние от воронки до датчика 330 м;

– погрешность измерения расстояния от воронки до датчика ΔL = 1 м.

Скорость и направление ветра в расчетах не учитывались.

Значение погрешности $\Delta T_{рег.АВ}$ времени регистрации АВ составляет $\Delta T_{рег.АВ} = \pm 0{,}00018$ с.

Значение погрешности $\Delta T_{распр.АВ}$ времени распространения АВ от точки встречи изделия с преградой до датчика составляет $\Delta T_{распр.АВ} = \pm 0{,}0045$ с. Основной вклад в эту величину вносит погрешность ΔL определения координат воронки от встречи изделия.

Величина $\Delta T_{распр.АВ}$ вносит определяющий вклад в результирующую погрешность которая составит $\Delta T_{вс.БУВ} = \pm 0{,}0045$ с.

Погрешность определения момента времени встречи изделия с преградой по результатам измерений БУВ имеет инструментальную и методическую составляющие.

Инструментальная составляющая погрешности определения момента времени встречи изделия с преградой по результатам измерений БУВ зависит от погрешности величин, составляющих формулу (2):

$\Delta T_{рег.БУВ}$ – погрешность времени регистрации фронта БУВ датчиком давления в ИТ (точка В на рис. 5), определяется теми же составляющими, что и $\Delta T_{рег.АВ}$;

ΔR – погрешность определения расстояния от поверхности конуса возмущения (точка М1) до ИТ в момент встречи изделия с преградой, определяется погрешностью определения углов между траекторией и осями локальной прямоугольной системы координат и значения скорости ОИ и погрешностью определения координат датчика;

$\Delta V_{зв}$ – погрешность определения скорости звука, определяется погрешностями измерения температуры воздуха, скорости и направления ветра.

Согласно [4] абсолютную инструментальную погрешность измерения момента времени встречи изделия с преградой будем рассчитывать как среднеквадратичную сумму ее составляющих

$$\Delta T_{вс.БУВ} = \pm\sqrt{\left(\Delta T_{рег.БУВ}\right)^2 + \left(\Delta T_{распр.БУВ}\right)^2}. \quad (5)$$

Погрешность определения времени регистрации фронта БУВ в ИТ, определяется аналогично, как и для регистрации АВ по формуле

$$\Delta T_{рег.БУВ} = \frac{2}{F_d} + n_г \cdot T_{рег.}. \quad (6)$$

Погрешность времени распространения БУВ определяется по формуле

$$\Delta T_{распр.БУВ} = \sqrt{\left(\frac{\partial T_{распр}}{\partial R}\cdot\Delta R\right)^2 + \left(\frac{\partial T_{распр}}{\partial V_{зв}}\cdot\Delta V_{зв}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{V_{зв}}\cdot\Delta R\right)^2 + \left(\frac{R}{V_{зв}^{\,2}}\cdot\Delta V_{зв}\right)^2}. \quad (7)$$

Расчет погрешности выполнялся с использованием тех же исходных данных, что и расчет по формуле (4). В результате расчетов было получено значение основной погрешности времени встречи изделия с преградой, равное $\Delta T_{вс.БУВ} = \pm 0{,}0052$ с.

Методическая составляющая погрешности $\Delta T_{вс.м.}$ обусловлена нелинейностью головной части конуса возмущения. Это хорошо видно на теневой фотографии, приведенной на рис. 7 [5]. Источником методической погрешности является принятие в расчетах абсолютной линейности образующей конуса возмущения, тогда как в зависимости от скорости и формы изделия она может иметь заметную кривизну на расстоянии до ~10 калибров изделия. В результате расчеты момента встречи изделия с преградой относятся к точке N′, а носовая часть изделия находится в точке N на расстоянии d_1. Величина этой погрешности определяется из соотношения $d_1/V_{изд.}$. Для условий описанных испытаний величина этой методической погрешности составила $\Delta T_{вс.м.} = 0{,}001$ с. Эта погрешность имеет систематический характер и учитывается в расчетах.

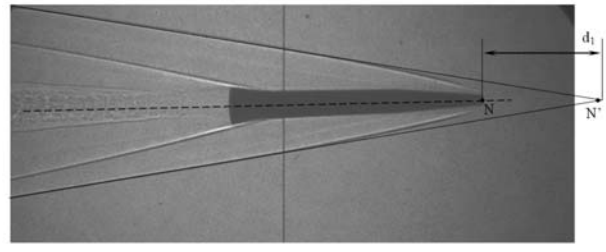


Рис. 7. Теневая фотография обтекания модели изделия [5]

* Синхронизация измерений высокостабильными секундными метками СЕВ позволяет исключить влияние нестабильности задающих генераторов системы акустических измерений – нестабильность генератора учитывается лишь на интервале между соседними метками (1 с).

В результате выполненных работ разработаны и опробованы способы определения момента времени встречи изделия с преградой. Эти способы основаны на измерении параметров двух различных видов воздушных волн, создаваемых изделием при подходе и встрече с преградой. Данные, получаемые в результате измерений, позволяют рассчитать момент времени встречи с преградой двумя способами с сопоставимой точностью. Эти факты обеспечивают высокую надежность получения результата. Разработанные способы положены в основу соответствующей методики. Методика унифицирована по средствам измерений (измерения параметров волн различных типов выполняются одной системой измерений), средства измерений масштабируемы, что позволяет скомплектовать их состав для получения надежного результата с учетом характеристик испытываемого изделия. Математические модели погрешностей позволяют получить ее конкретное значение в зависимости от условий испытаний.

Литература

1. Красильников В. А. Звуковые волны в воздухе, воде и твердых телах. М.: Наука, 1954.

2. Фабрикант Н. Я. Аэродинамика. М.: Наука, 1964.

3. Пат.2547839, РФ // Бюллетень изобретений.2015. № 10.

4. Тейлор Дж. Введение в теорию ошибок. Пер. с англ. М.: Мир, 1985. С. 272, ил.

5. Герасимов С. И., Файков Ю. И. Теневое фотографирование в расходящемся пучке света // Монография. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2010. С. 344, ил.

КАМЕРА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Т. А. Гусакова, Р. А. Ильин, В. Г. Колесников

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

В настоящее время в РФЯЦ-ВНИИЭФ разрабатывается лазерная установка нового поколения [1], одной из основных частей которой является камера взаимодействия, предназначенная для экспериментов по управляемому инерциальному термоядерному синтезу (подобная камера используется в мировых аналогах [2], [3]). Основными составными частями камеры взаимодействия являются, камера вакуумная и опора специальная при помощи которой, камера взаимодействия устанавливается на опору-фундамент в проектное положение с высокой точностью. На нижнем полюсе камеры размещен люк технологический, который обеспечивает доступ обслуживающего персонала во внутренний объем камеры в процессе ее эксплуатации. Общий вид камеры взаимодействия представлен на рис. 1.

Описание конструкции и технологии изготовления камеры взаимодействия

Камера вакуумная представляет собой вакуумную сферическую оболочку (рабочее давление в камере составляет 1×10^{-6} мм. рт. ст.) с наружным диаметром 10000 мм, сваренную из лепестков толщиной 100 мм в виде штампованных частей сферы (рис. 2).

Сборка алюминиевых лепестков происходила на специально спроектированных позиционерах (рис. 3) при помощи которых, обеспечивалось точное позиционирование двух свариваемых деталей между собой. Лепестки сварены встык по уникальной технологии при помощи механизированной сварки в смеси газов Аргон (Ar) / Гелий (He). Сварные швы вакуумно-плотные, провар выполнен на всю толщину материала, общая длина сварных стыков оболочки камеры

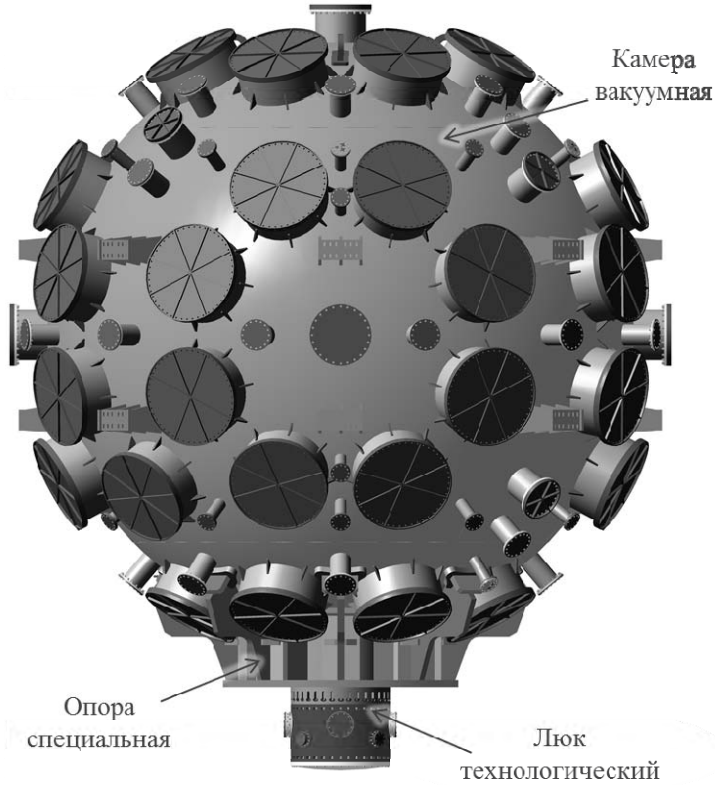


Рис. 1. Общий вид камеры взаимодействия лазерной установки

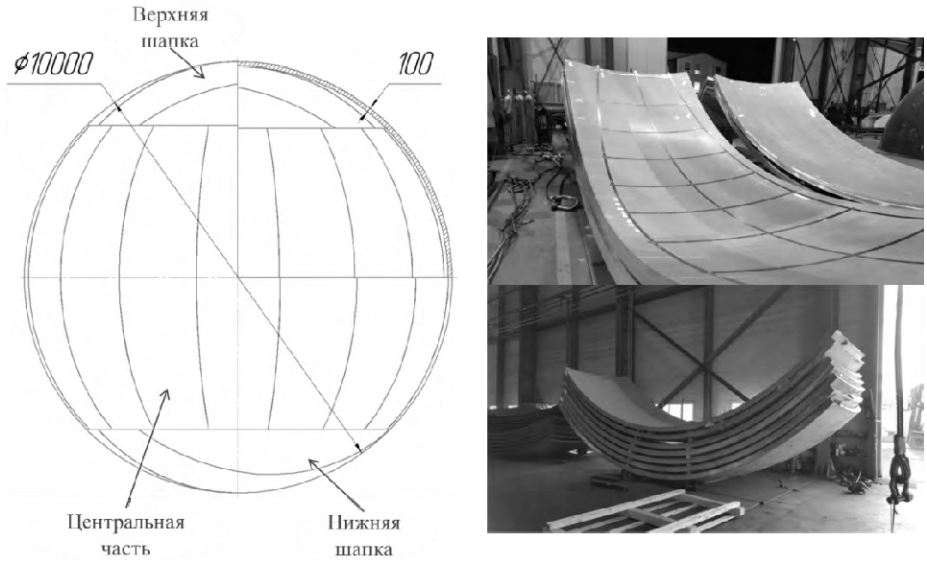


Рис. 2. Геометрия оболочки камеры взаимодействия

Рис. 3. Сборка алюминиевых лепестков на позиционерах

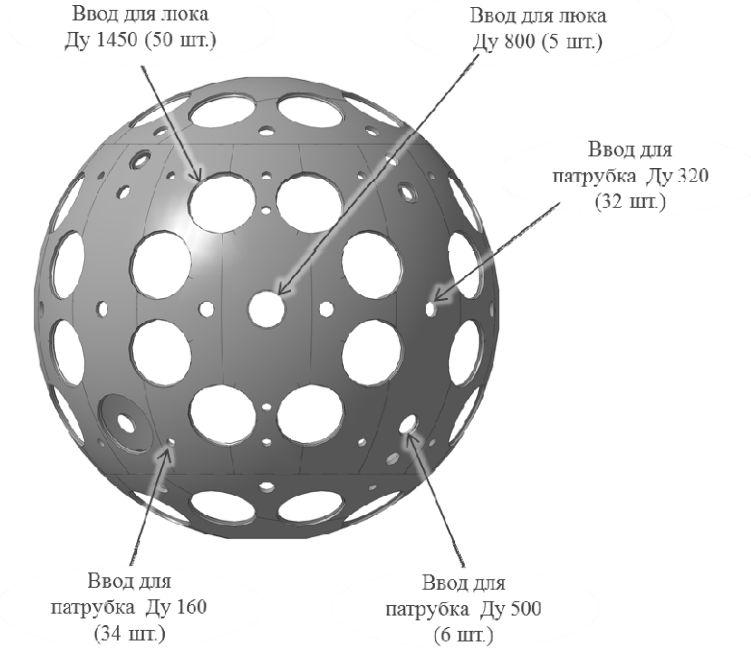
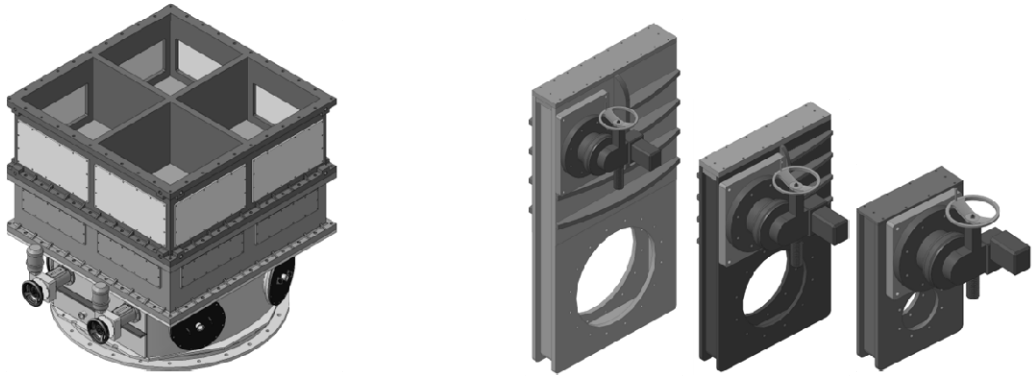


Рис. 4. Отверстия – вводы для приварки люков и патрубков

Рис. 5. Люки Ду 1450, Ду 800 и патрубки Ду 500, Ду 320, Ду 160



а б

Рис. 6. Функциональное оборудование: а – ФОМ, б – вакуумные затворы Ду 500, Ду 320, Ду 160

составила около 200 м, а сварных проходов более 13 км, при этом все сварные швы прошли аттестацию методом ультразвукового контроля, цветной дефектоскопии и рентгенографии.

Внутренние поверхности камеры (поверхности, ограничивающие вакуумный объем) имеют шероховатость не грубее Ra 2,5, наружные – не грубее Rz 80.

В оболочке камеры имеются более 120 отверстий – вводов (рис. 4), оснащенных соответствующими люками и патрубками (рис. 5), предназначенными для герметичной установки на них функционального оборудования. Максимальное значение допуска пересечения осей отверстий для ввода люков Ду 1450 с мнимым центром внутренней поверхности камеры составляет – 2,5 мм, а для остальных отверстий – 5 мм. Общий вес камеры, все элементы которой изготовлены из алюминиевого сплава, составляет более 100 тонн.

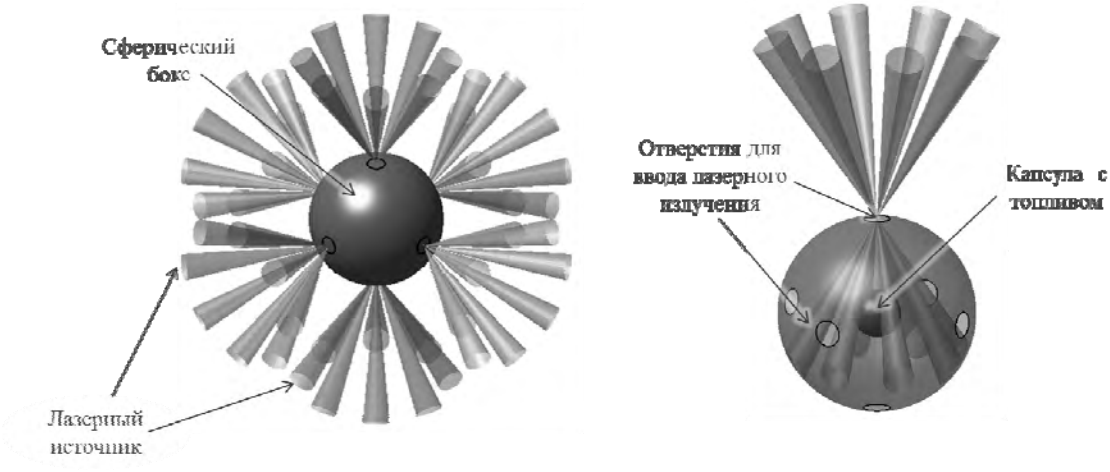
В состав функционального оборудования, размещаемого на камере взаимодействия, входят: финальные оптические модули (ФОМ) (рис. 6а), оборудование системы вакуумирования (рис. 6б), устройства ввода мишеней, приборы диагностики, контрольно-измерительная аппаратура.

Люки Ду 1450, предназначенные для установки ФОМ (48 шт.), размещены на камере таким образом, что конфигурация системы лазерного облучения позволяет достичь высокой однородности воздействия лазерного излучения на мишень, корпус которой выполнен сферическим. Оси заведения люков размещены по граням воображаемого куба, вписанного в сферу, причем количество люков для заведения излучения выбраны кратным двум по каждой оси заведения, а центральная ось заведения излучения взаимно перпендикулярна каждой грани воображаемого куба. При этом угол между центральной осью заведения каждой грани и осями люков для заведения лучей, лежащих на этой грани, одинаковый (рис. 7).

Схема «обжатия» мишени (число отверстий для ввода лазерного излучения в сферический бокс) выбиралась исходя из требования максимально возможной и в то же время наиболее целесообразной однородности воздействия поля излучения на мишень.

Рассматривалось несколько типов пространственной симметрии схемы «обжатия» мишени: симметрия тетраэдра, симметрия октаэдра (куба) и симметрия додекаэдра (икосаэдра). Из ряда проанализированных вариантов наиболее оптимальной оказалась схема симметрии куба с 6 отверстиями для ввода лазерного излучения. Данная схема позволяет эффективно использовать конфигурацию лазерных источников из 192 лазерных каналов, объединенных в 48 кластеров, с суммарной величиной, доставляемой к мишени лазерной энергии 2,8 МДж. Также, данная схема проста в инженерной реализации в силу наличия симметрии куба (система симметрична относительно трех взаимно перпендикулярных плоскостей, содержащих оси координат) и одинаковых углов ввода лазерных пучков в отверстия. Схема ввода 48 лазерных кластеров в сферический бокс-конвертор представлена на рис. 8.

Рис. 7. Геометрическое размещение осей заведения люков предназначенных для установки ФОМ



а б

Рис. 8. Лазерная засветка сферического бокса-конвертора: а – схема ввода 48 кластеров лазерных пучков, б – 8 лазерных кластеров, вводимых через одно отверстие

В зоне нижнего полюса камеры имеется опорная конструкция, обеспечивающая необходимую точность ориентации камеры и ее установку на опору-фундамент в камерном зале.

В зоне верхнего полюса камеры имеются строповые устройства (проушины) с помощью которых происходил подъем и перемещение камеры взаимодействия из специального ангара, в котором проводилось изготовление камеры, в камерный зал на опору-фундамент. При этом внутренняя полость камеры взаимодействия находилась под вакуумом.

В средней зоне камеры имеются опорные элементы (кронштейны), предназначенные для обеспечения ее стабильного положения в процессе дальнейшей эксплуатации.

Опора-фундамент представляет собой несущую конструкцию с закладной опорной плитой оснащенной специальными силовыми юстировочными элементами, позволяющими осуществить точное позиционирование камеры. Схема установки камеры взаимодействия на опору-фундамент представлена на рис. 9.

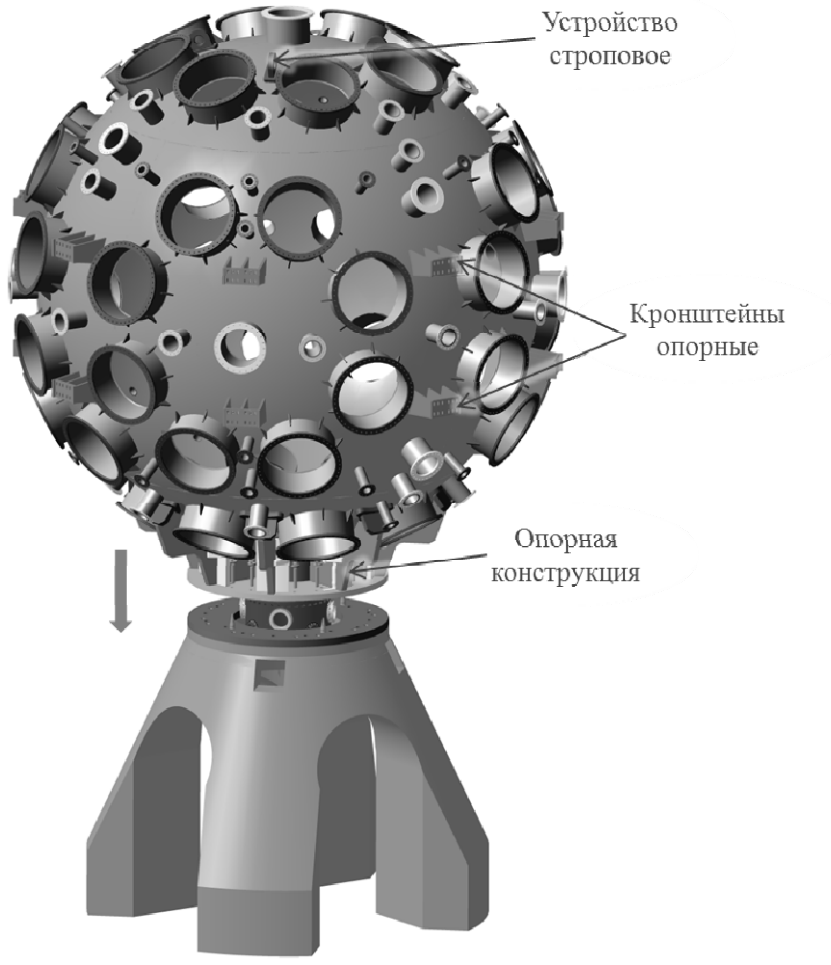


Рис. 9. Схема установки камеры взаимодействия на опору-фундамент

В настоящее время ведутся работы по разработке моделей защитной облицовки внутренней поверхности камеры взаимодействия, которая обеспечивает защиту поверхности камеры от продуктов распада мишени.

Расчеты камеры взаимодействия и ее конструктивных элементов на прочность

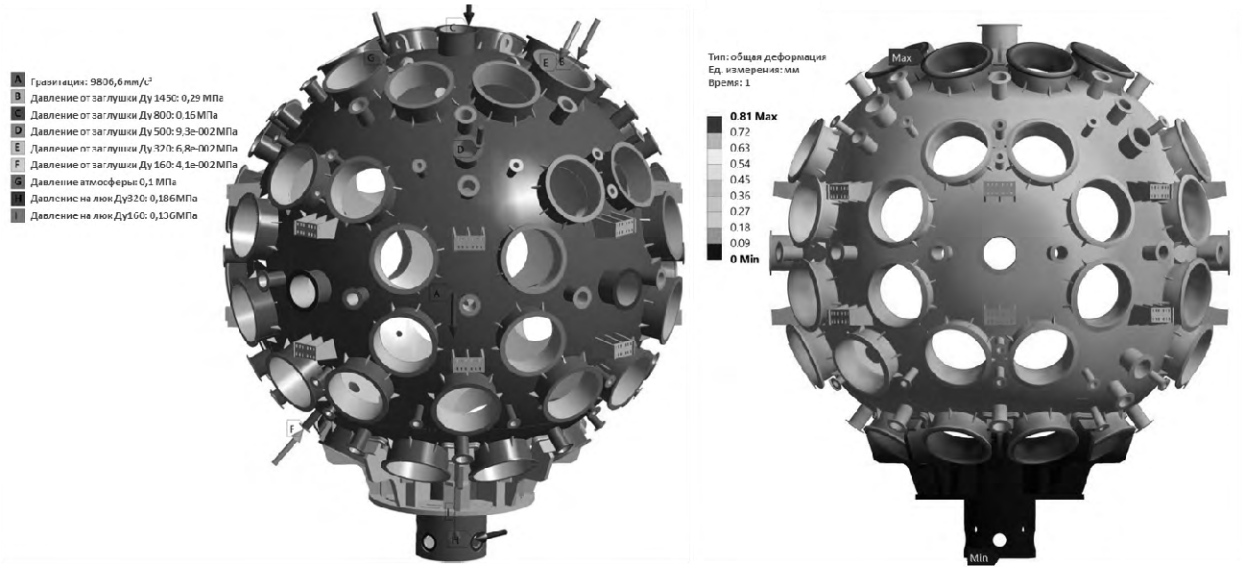
При разработке изделия были проведены необходимые оценочные прочностные расчеты наиболее нагруженных элементов конструкции, которые были подтверждены расчетами, проведенными рядом сторонних организаций. Задача определения напряженно-деформированных состояний решалась с помощью численного метода – метода конечных элементов.

Толщина стенки камеры вакуумной для проведения расчетов была выбрана с учетом наихудшего сочетания допуска на изготовление заготовки, а также с учетом возможной усадки при штамповке. Основным материалом для изготовления деталей конструкции является алюминиевый сплав.

Был произведен расчет камеры взаимодействия, рис. 10, при следующих сочетаниях нагрузок: нагружение от массы камеры и давления наружного атмосферного воздуха, действующего на нее при вакуумировании. При этом камера установлена на опорную поверхность. Схема нагружения камеры для рассматриваемого этапа с обозначением нагрузок и граничных условий показана на рис. 10а. По результатам расчета величина перемещений в вертикальном направлении камеры составила менее 1 мм (рис. 10б).

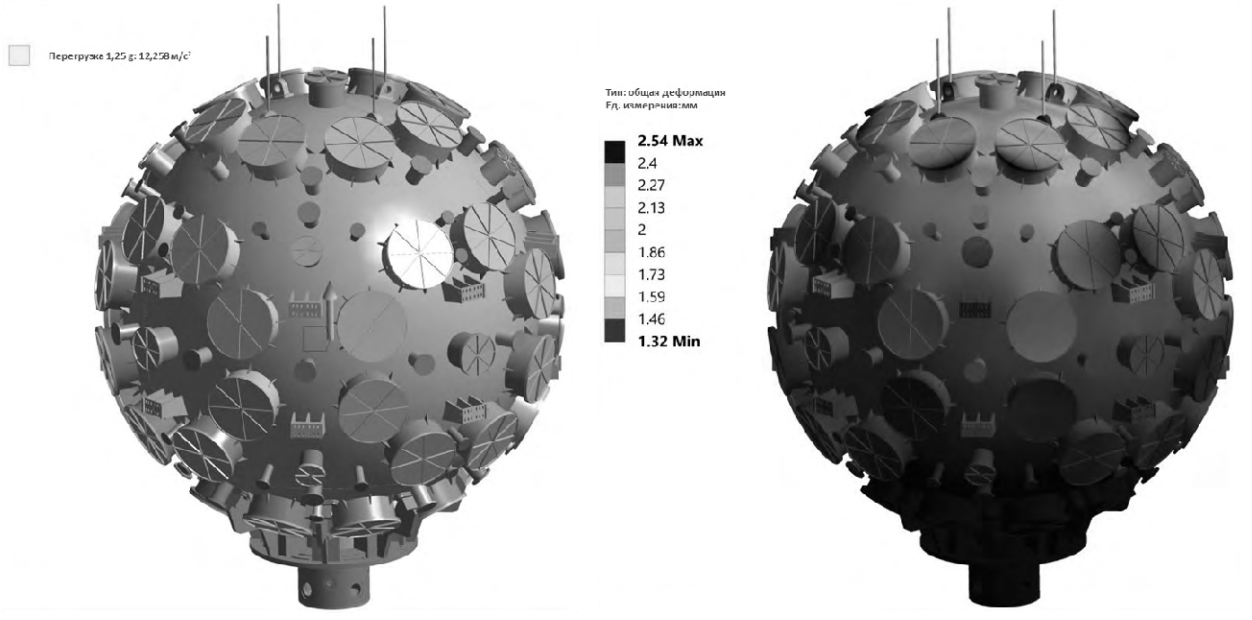
С помощью метода конечных элементов были получены значения максимальных эквивалентных напряжений в материале деталей и сварных швови соответствующие коэффициенты запаса статической прочности. Таким образом, согласно полученным результатам расчета, на рассматриваемом этапе эксплуатации, при нагружении от масс камеры и наружного атмосферного давления воздуха, действующего на нее при вакуумировании, все условия статической прочности выполняются.

Также, был произведен расчет камеры взаимодействия при ее монтаже (грузоподъемных работах), рис. 11, при следующем сочетании нагрузок: нагружение от массы камеры при ее подъеме за проушины, размещенные на верхней шапке камеры. Инерционные нагрузки при монтаже камеры при-



а б

Рис. 10. Схема нагружения камеры взаимодействия и ее перемещения при вакуумировании: а – схема нагружения, б – суммарные перемещения



а б

Рис. 11. Расчетная схема камеры взаимодействия и распределение ее перемещений при грузоподъемных работах: а – расчётная схема, б– распределение перемещений

нимались, равными $h_x = h_y = h_z = 1,25$. Таким образом, в данном расчетном случае, принималось, что камера закреплена четырьмя тросами через проушины при воздействии ускорения в вертикальном направлении, равного $1,25 \cdot g$. Подъем осуществляется посредством траверсы так, что тросы от проушин до траверсы идут вертикально, вследствие чего минимизируется нагрузка, приходящаяся на тросы и, соответственно, проушины. При этом люки и патрубки камеры закрыты крышками по фланцам с помощью болтовых соединений. Общий вес камеры при монтаже с крышками составляет порядка 123,1 тонн. Расчетная схема камеры для рассматриваемого этапа эксплуатации показана на рис. 11а. По результатам расчета величина вытяжения камеры в вертикальном направлении, составила 1,22 мм (рис. 11б).

Были получены значения максимальных эквивалентных напряжений в материале деталей и сварных швов, и соответствующие коэффициенты запаса статической прочности соединения проушины с корпусом. Таким образом, согласно полученным результатам расчета, на рассматриваемом этапе эксплуатации камеры, все элементы конструкции камеры удовлетворяют условиям статической прочности.

Выводы

Важнейшим результатом при конструировании камеры взаимодействия лазерной установки нового поколения является то, что разработанная конструкция камеры взаимодействия по сравнению с мировыми аналогами позволяет достичь высокой однородности воздействия поля лазерного излучения на мишень.

Проведены прочностные расчеты для оценки прочности и геометрической неизменяемости камеры взаимодействия находящейся под вакуумом в статическом положении.

Определены напряжения конструктивных элементов камеры взаимодействия и грузозахватных устройств, при действии нагрузок от сил тяжести и инерции, возникающих в процессе проведения грузоподъемных работ. Вышеперечисленные расчеты показали, что камера взаимодействия обладает достаточным запасом прочности.

По результатам проведенных работ камера взаимодействия была успешно изготовлена и смонтирована с помощью кранов на опору-фундамент в камерном зале.

Литература

1. Гаранин С. Г., Бельков С. А., Бондаренко С. В. Концепция построения лазерной установки нового поколения / XXXIX Международная конференция по физике плазмы и УТС // Сборник докладов. Москва, 2012. С 17.

2. Fleurot N., Cavailler C., Bourgade J. L. The Laser Megajoule (LMJ) Project dedicated to inertial confinement fusion: Development and construction status // Fusion Engineering and Design. 2005. N 74. P. 147–154.

3. Edward I. Moses, National Ignition Facility: 1.8 MJ, 750 TW Ultraviolet Laser // Proc. of SPIE. 2004. Vol. 5341. doi: 10.1117/12.538463. P. 13–24.

МОДЕЛИРОВАНИЕ В СРЕДЕ ZEMAX И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОТРАБОТКА ЧЕТЫРЕХКАНАЛЬНОЙ ТЕЛЕЦЕНТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ЦИФРОВЫХ ГОЛОГРАММ

Н. А. Каменева, В. Г. Каменев

ФГУП «ВНИИА им. Н. Л. Духова», Москва

Введение

Для регистрации дисперсной фазы во время ударно-волнового нагружения оптическая система должна обеспечивать перенос голограммы без искажения пропорций и с одинаковым оптическим увеличением в пределах глубины регистрируемой области. Данный эффект обеспечивается в телецентрических системах.

Поскольку оптическая система предназначена для газодинамических опытов, существует необходимость удаления регистрирующей аппаратуры от зондируемого объема. Однако телецентрические системы имеют ограничения на соотношение увеличения изображения и области его формирования. Поэтому для обеспечения одновременного переноса и увеличения изображения целесообразно использовать две телецентрические подсистемы. Таки образом, в системе присутствуют уничтожаемый узел, располагаемый в непосредственной близости от исследуемого объекта и увеличивающий изображение в 10–20 раз для регистрации на ПЗС-камеру, и сохраняемый узел, расположенный в защищенном помещении и переносящий увеличенное изображение на расстояние нескольких метров (оптимальное расстояние переноса 2,5–7 метров).

Одним из методов регистрации пыления является цифровая динамическая голография. Цифровая обработка регистрируемого изображения с помощью вычисления интеграла Френеля – Кирхгофа позволяет получить информацию о трехмерном расположении микроскопических объектов в пределах зондированного объема.

Итак, разрабатываемое устройство должно обеспечивать:

– телецентрический ход лучей;

– отсутствие аберраций, влияющих на запись голограмм;

– пространственное разрешение объектов до 1 мкм;

– увеличение изображение не менее чем в 10 раз;

– перенос изображения на расстояние 2,5–7 метров.

Моделирование оптического тракта предлагаемой системы в среде проектирования ZEMAX

Для анализа телецентричесого эффекта и для проверки на наличие аберраций в системе в среде ZEMAX была создана решетка с источниками излучения. Шаг решетки составляет 100 мкм, а сборка в целом представляет собой куб, содержащий 3×3×3 источника.

Было решено использовать в качестве моделей объективов линзы с эквивалентным фокусным расстоянием. В качестве линз были использованы дуплеты из стекол BK7 и SF3 с компенсацией сферической аберрации. Была смоделирована телецентрическая система, состоящая из двух телецентрических подсистем – подсистемы увеличения и оптического ретранслятора (рис. 1). В подсистеме увеличения телепозитив и теленегатив моделировались с помощью линзовых дуплетов.

Телепозитив в оптическом ретрансляторе представляет собой телескоп-рефлектор со снятым окуляром и с фокусом вогнутого зеркала 1200 мм и апертурой 250 мм. Поскольку излучение в данный телескоп вводилось со смещением от оси вогнутого зеркала (прямо на оси расположено поворотное зеркало, выводящее излучение из трубы телескопа), то данная конструкция не заменялась эквивалентной линзой, а моделировалась целиком. Теленегатив оптического ретранслятора моделировался с помощью тонкой длиннофокусной двояковыпуклой линзы.

Область источников излучения, а также области построения промежуточного и конечного изображений были просканированы с помощью прямоугольного детектора размером 4×4 мм и разрешением 500×500 пикселей. Также детектором контролировались фокусировка лучей и расстояние переноса изображений. На рис. 2 представлены полученные детектором изображения смоделированных источников. Можно отметить, что на данных изображениях не наблюдаются дисторсия и кривизна поля зрения.

На рис. 3 представлены координаты точек исходного объекта, промежуточного и конечного изображений. Промежуточное изображение, помимо того что было увеличено в 10 раз за счет увеличения смоделированного первого узла, было вытянуто вдоль оптической оси в 39 раз по сравнению с разме-

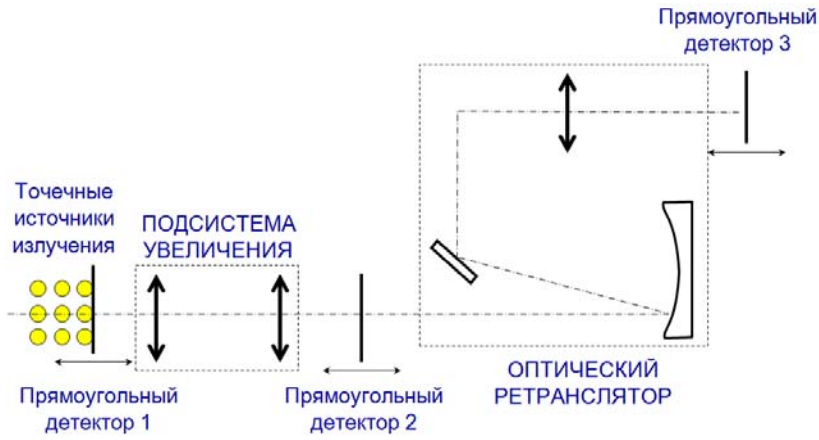


Рис. 1. Схематическое изображение моделируемой оптической системы, состоящей из двух телецентрических подсистем, в среде ZEMAX

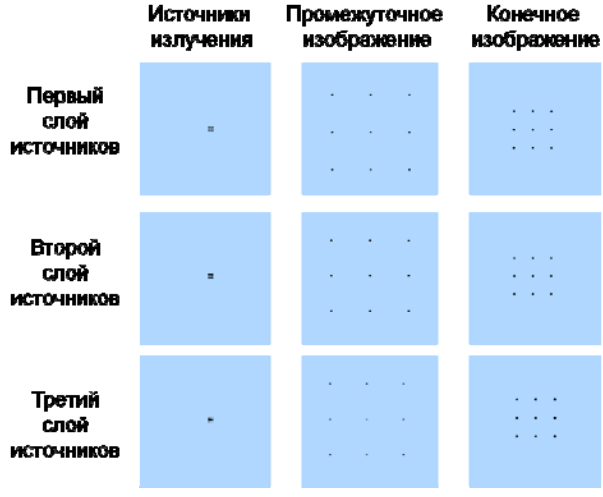


Рис. 2. Изображения слоев трехмерной сетки источников излучения, промежуточного изображения и окончательного изображения источников, представленные в одном масштабе

рами в других плоскостях. Данный эффект достаточно характерен для телецентрических систем [1]. Также следует отметить, что порядок расположения слоев в промежуточном изображении оказывается «вывернутым на изнанку» – плоскости, находящиеся ближе к системе увеличения, переносятся дальше, и наоборот.

Конечное изображение по сравнению с промежуточным было сжато в 4 раза вдоль оптической оси и увеличено в 10 раз по сравнению с исходными размерами решетки.

Приведенные на рис. 3 трехмерные графики показывают, что слои изображения источников переносятся линейно, с одинаковым увеличением и без искажений.

Также было промоделировано влияние расстояния между оптическим ретранслятором и объектом на оптическое увеличение системы в целом. В модели варьировалось данное расстояние и фокус тонкой линзы – теленегатива оптического ретранслятора. Параметры подбирались так, чтобы изображение формировалось практически вплотную к линзе. По мере удаления от объекта изображение формировалось все ближе к заднему фокусу зеркала ретранслятора, что создавало ограничение на максимальный фокус линзы, а значит – на увеличение системы. Поскольку зеркало и линза ретранслятора образуют телецентрическую систему, ее увеличение определяется формулой (1):

$$\Gamma_{\text{рет}} = \frac{F_{\text{л}}}{F_{\text{з}}}, \qquad (1)$$

где $\Gamma_{\text{рет}}$ – увеличение ретранслятора, $F_{\text{л}}$ – фокусное расстояние теленегатива оптического ретранслятора, $F_{\text{з}}$ – фокусное расстояние зеркала оптического ретранслятора.

Общее увеличение системы оценивается второй формулой (2):

$$\Gamma_{\text{общ}} = \frac{F_{\text{л}}}{F_{\text{з}}} \cdot \Gamma_{\text{ув}}, \qquad (2)$$

где $\Gamma_{\text{ув}}$ – увеличение увеличивающей подсистемы.

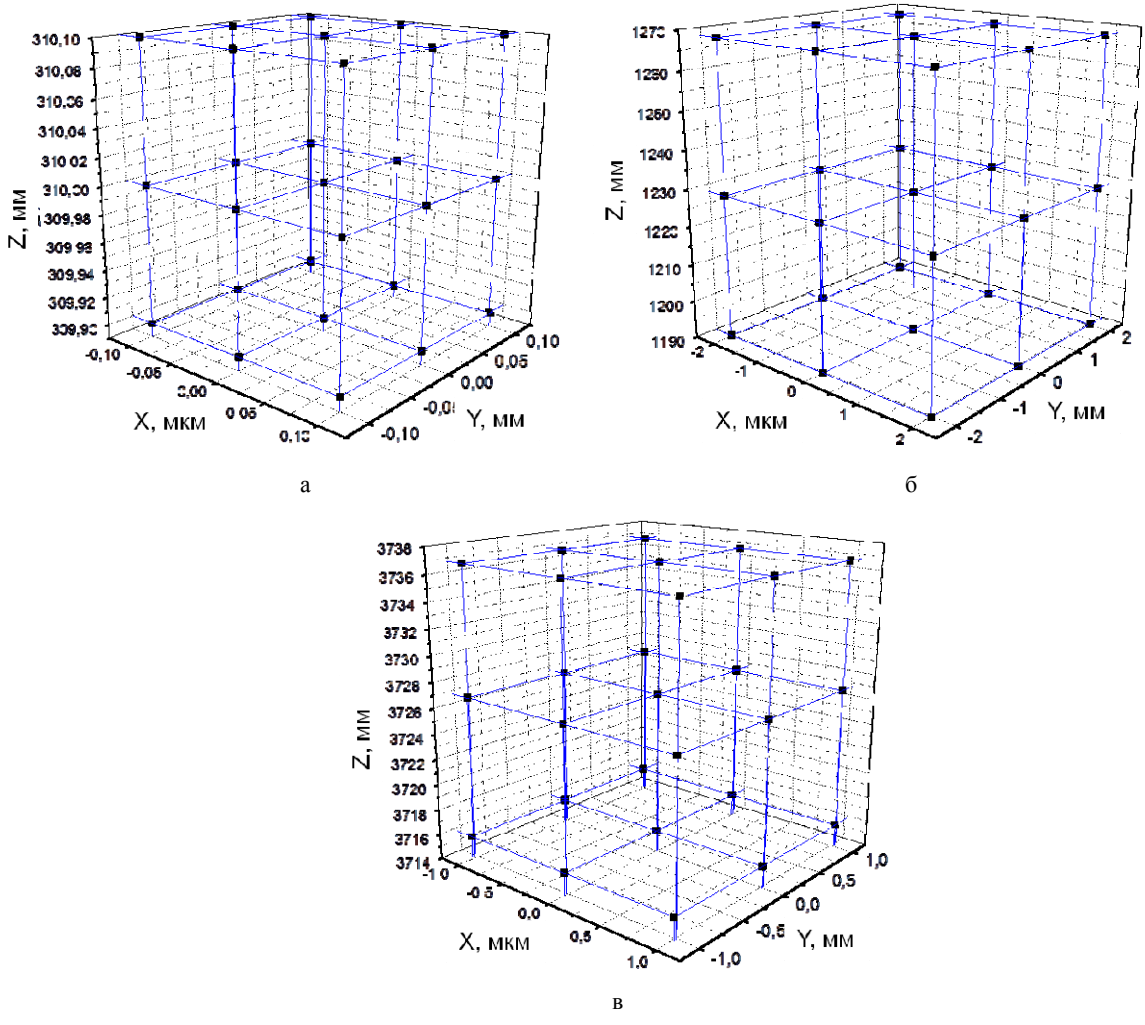


Рис. 3. Трехмерные графики: а – исходной решетки, б – промежуточного изображения, в – окончательного изображения

Таким образом, на основе зависимости предельного фокуса линзы от расстояния можно установить связь между увеличением системы и расстоянием до объекта. Эта зависимость показана на рис. 4.

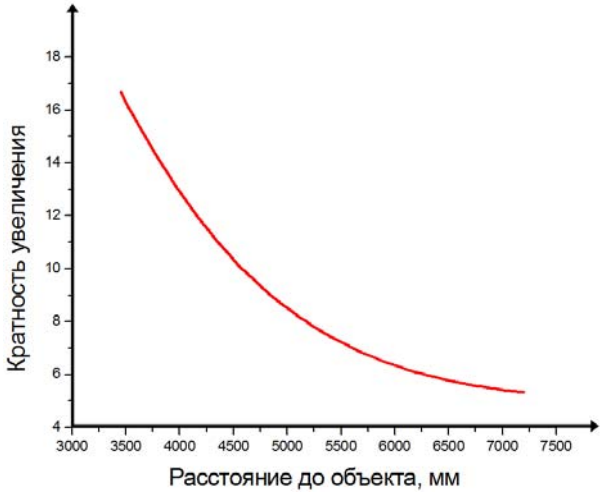
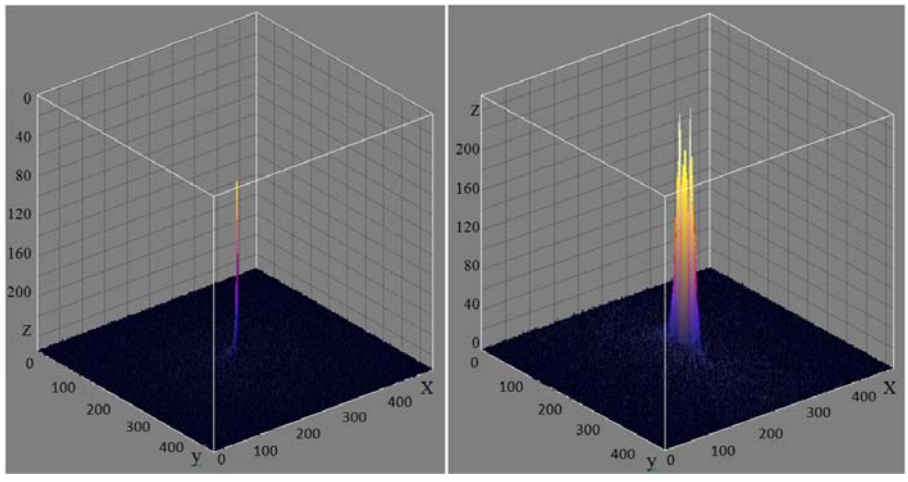


Рис. 4. Зависимость увеличения системы от расстояния до объекта

Для проверки на наличие в системе аберраций была рассчитана функция рассеяния точки (ФРТ) для промежуточного и конечного изображений. На рис. 5а приведена ФРТ для промежуточного изображения. Ширина на полувысоте для полученного пика составляет около 300 нм – величину, меньшей длины волны излучения (532 нм). Следовательно, увеличивающая система в данной модели является дифракционно ограниченной. На рис. 5б показана ФРТ для конечного изображения. В данном случае наблюдается астигматизм, приводящий к растягиванию пятна рассеяния в вертикальном направлении. Ширина на полувысоте в горизонтальном направлении – 300 нм, и здесь разрешение ограничивается дифракцией. В вертикальном направлении ширина на полувысоте составляет около 2 мкм. Однако поскольку на оптический ретранслятор передается уже увеличенное изображение, а размер пиксела используемой ПЗС-матрицы составляет 6 мкм, то такой астигматизм не будет зарегистрирован камерой.



а б

Рис. 5. ФРТ (цена деления по x и y – 0,02 мкм, z – усл. ед.): а – для промежуточного изображения, б – для конечного изображения

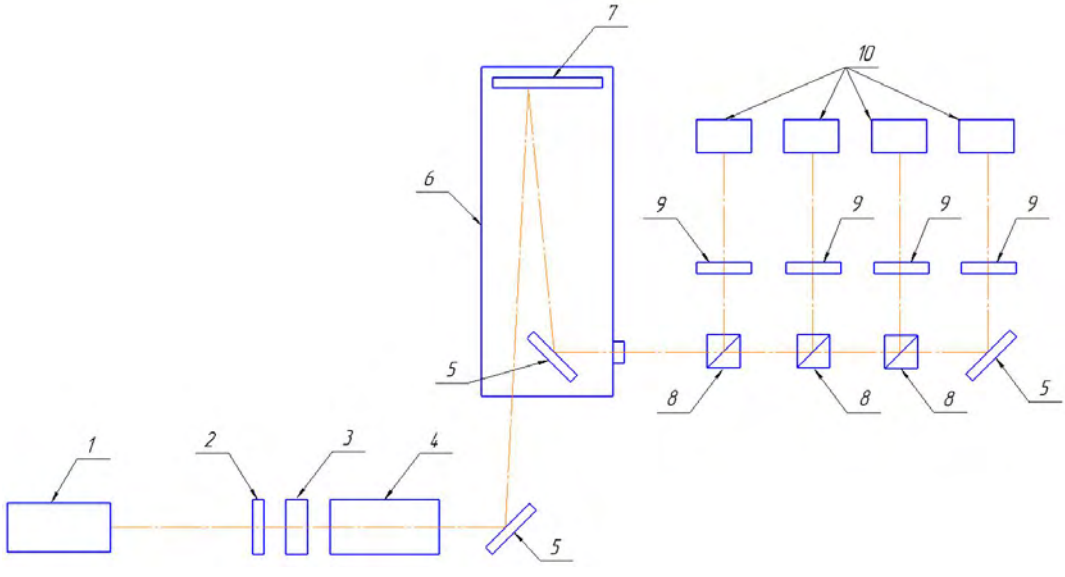


Рис. 6. Схема оптической телецентрической системы для регистрации цифровых голограмм: 1 – система подсветки; 2 – мира USAF 1951; 3 – микрообъектив; 4 – объектив; 5 – поворотное зеркало; 6 – телескоп; 7 – вогнутое зеркало телескопа; 8 – светоделительный куб; 9 – линза с фокусным расстоянием 1000 мм; 10 – ПЗС-камера

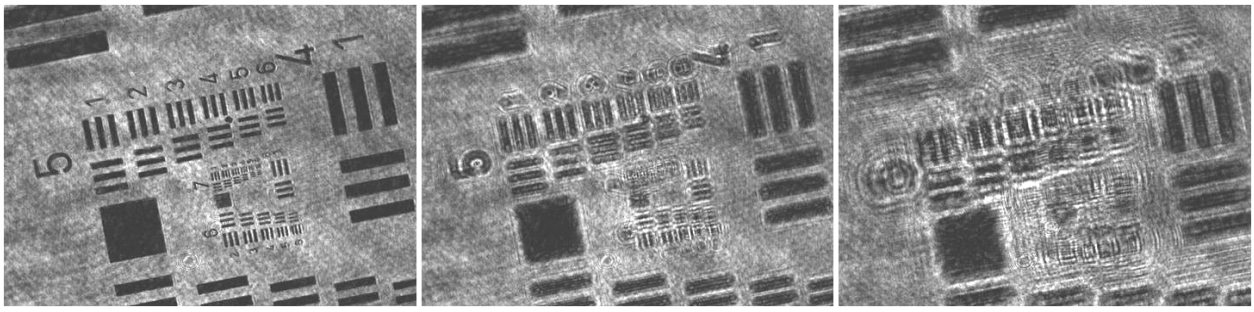
Экспериментальная отработка телецентрической системы

Для проведения экспериментов был собран макет по представленной на рис. 6 схеме. На схеме представлены две телецентрические подсистемы. Подсистема увеличения состоит из микрообъектив и телеобъектива, расположенных вблизи исследуемого объекта. Оптический ретранслятор состоит из собирающего зеркала телескопа и линз с фокусными расстояниями 1000 мм. В серии экспериментов вместо исследуемого объекта устанавливалась мира USAF 1951.

Многоканальность может быть использована для расширения динамического диапазона регистрируемого сигнала, для многокадровой съемки с разделением во времени, а также для снижения уровня шумов за счет усреднения сигналов.

В экспериментах телецентричность тоже контролировалась. На рис. 7 представлены кадры миры при ее смещении вдоль оптической оси. На первом кадре мира находится в объектной плоскости, на втором она смещена на 2 мм, на третьем – на 5 мм. Заметно, что разрешение изображение падает, однако его размер не меняется.

Для получения графика зависимости телецентрического эффекта от расположения миры последняя регистрировалась с перенастройкой регистратора. Затем были выбраны контрольные точки в одних и тех же местах на всех полученных изображениях миры, по значениям которых строился трехмерный график (рис. 8). По графику можно заметить, что размер изображения не зависит от расстояния до объекта. Таким образом доказано достижение телецентрического эффекта системой.



0 мм 2 мм 5 мм

Рис. 7. Регистрация миры USAF 1951 при ее смещении вдоль оптической оси

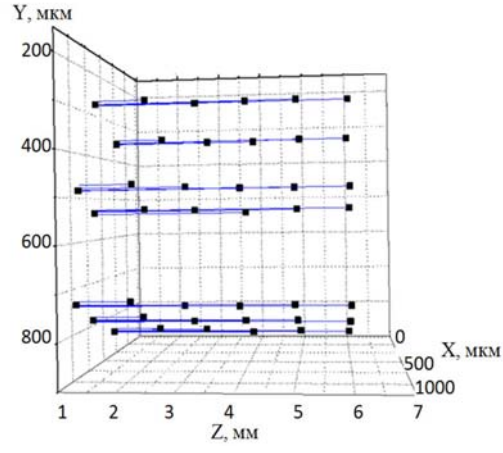
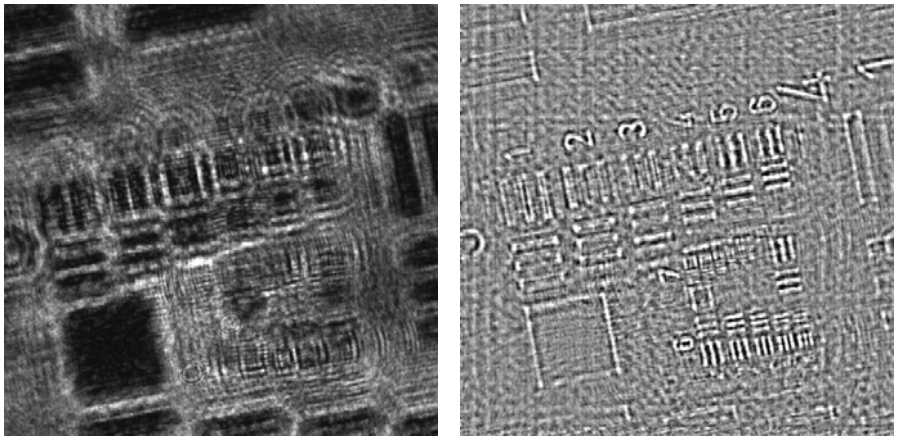


Рис. 8. Регистрация телецентрического эффекта



а б

Рис. 9. Голограмма: а – миры, б – результат восстановления изображения [4]

Для определения предельных характеристик по разрешению, производилась регистрация цифровых голограмм миры при различных её положениях относительно фокальной плоскости и неизменных настройках системы. Использовалось когерентное коллимированное излучение с длиной волны 532 нм.

На рис. 9а показана цифровая голограмма миры, зарегистрированная на расстоянии 4 мм от плоскости построения изображения. На рис. 9б показан результат восстановления изображения из цифровой голограммы. Следует отметить, что на восстановленном изображении идентифицируются все позиции миры, хотя исходная голограмма зарегистрирована на таком расстоянии от плоскости построения изображения, на котором при использовании некогерентного источника зарегистрировать позиции миры было бы невозможно. Таким образом, цифровая голография позволяет расширить область резко изображаемого пространства почти на порядок с сохранением разрешения до 225 п.л./мм [4].

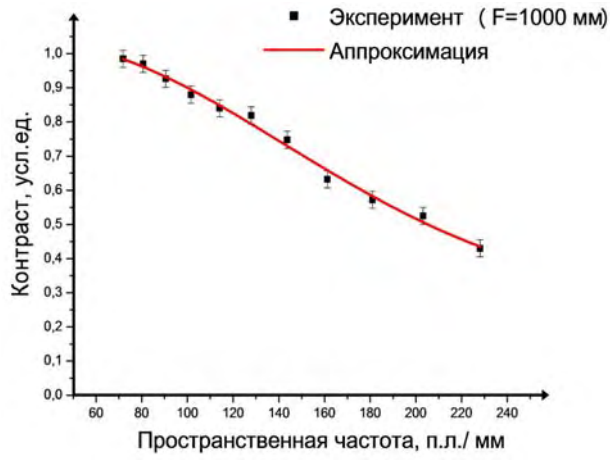


Рис. 10. Кривая ЧКХ исследуемой системы с оптическим увеличением 20^x

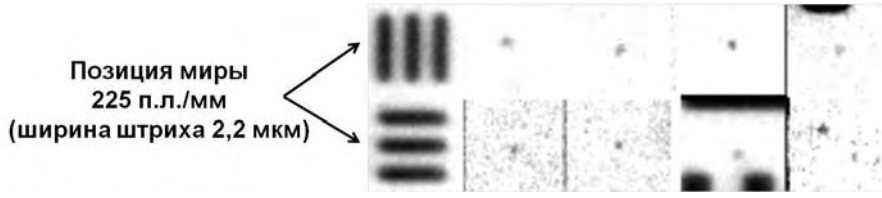


Рис. 11. Микронные частицы, зарегистрированные исследуемой системой

Для оценки способности оптической системы передавать тонкую интерференционную структуру, необходимо иметь данные о частотно-контрастной характеристике (ЧКХ) системы. На рис. 10 представлена ЧКХ с использованием в подсистеме увеличения микрообъектива, увеличивающего в 20 раз. Для наименьшей позиции миры наблюдается контраст 0,4. Используемая мира не позволяет установить предел по разрешению.

На мире было обнаружено значительное количество пылинок и загрязнений размером около 1 мкм. На рис. 11 они приведены в одном масштабе с наименьшей позицией миры USAF 1951.

Выводы

1. Предложен и обоснован вариант схемы телецентрической системы для цифровой голографии, содержащий две телецентрические подсистемы – подсистему увеличения и оптический ретранслятор.

2. Моделирование показало, что наиболее оптимальное расстояние оптического ретранслятора от объекта исследования – до 5000 мм.

3. Расчетамии экспериментально показано обеспечение телецентрического эффекта;

4. Расчетами и экспериментально показано обеспечение пространственного разрешения объектов до 1 мкм.

5. Расчетами и экспериментально показано отсутствие аберраций, влияющих на запись голограмм.

6. Продемонстрировано увеличение изображения в 20 раз.

Литература

1. Ejecta Particle-Size Measurements in Vacuum and Helium Gas using Ultraviolet In-Line Fraunhofer Holography / Sorenson D. S., Pazuchanics P., Johnson R., at al. // LA-UR-14-24722 2014-06-25 (URL: http://permalink.lanl.gov/object/tr?what=info:lanl-repo/lareport/LA-UR-14-24722).

2. Sorenson, D. Particle Distribution Measurements Using in–line Fraunhofer Holography / D. Sorenson, R. Malone, B. Frogget, C. Ciarcia, T. Tunnell, R. Flurer // SPIE, Santa Fe, NM – October 1996. P. 10035.

3. Sorenson D. S., Minich R. W., Romero J. L., Tunnel T. H., Mallone R. M. Ejecta particle size distribution for shock loaded Sn and Al metals // J. Appl. Phys. 2002. Vol. 92, N 10. P. 5830.

4. Каменева Н. А. Устройство для регистрации цифровых голограмм быстропротекающих газодинамических процессов на основе телецентрической оптической системы: Магистр. дис.: 12.04.02. Москва, 2019. С. 76.

ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ПОРОШКОВ СТАЛИ 316L И СПЛАВА INCONEL 718, ПРИМЕНЯЕМЫХ В АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ, С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ

М. В. Царев, В. В. Мокрушин, И. А. Царева, О. Ю. Забродина, К. В. Коршунов, А. Е. Канунов, И. Ф. Кашафдинов, И. Л. Малков

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Металлические порошки, применяемые в аддитивных технологиях, обладают рядом особых свойств, обусловленных их назначением и технологиями получения, как правило, включающими в себя стадию атомизации расплава [1]. В результате частицы этих порошков имеют почти идеальную сферическую форму, характеризуются минимальным количеством поверхностных дефектов и низким содержанием примесей, а также обладают достаточно узким диапазоном распределения частиц по размерам. Целью настоящей работы являлось получение дополнительной информации о состоянии поверхности частиц порошков, применяемых в аддитивных технологиях, необходимой для разработки новых подходов к контролю качества данных материалов применительно к целевому использованию.

Материалы и методы исследования

Также как и в работе [2], в настоящей работе объектами исследования являлись мелкодисперсные порошки нержавеющей стали 316L и жаропрочного сплава Inconel 718, используемые в аддитивных технологиях, а также образцы деталей, изготовленных из этих материалов методом послойного лазерного сплавления. Порошки были переданы для проведения исследований сотрудниками НИФТИ Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского (Н. Новгород), и анализировались после их хранения в негерметичной таре в течение двух месяцев. Детали, изготовленные из указанных порошков в НИФТИ ННГУ методом послойного лазерного сплавления, исследовали после их испытаний на растяжение, которые были проведены в РФЯЦ-ВНИИЭФ [2].

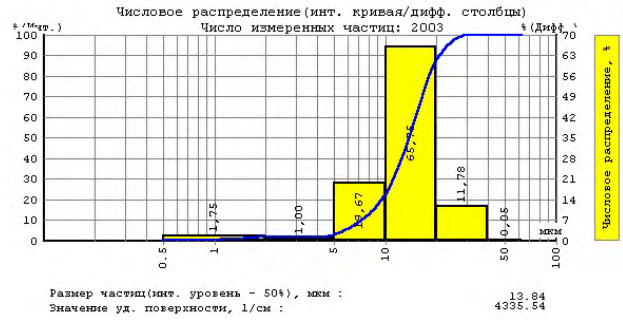
Электронно-микроскопические (ЭМ) исследования и рентгеновский спектральный микроанализ (РСМА) проводили на комплексе для электронной микроскопии и анализа Quanta 200 3D в режиме высокого вакуума при остаточном давлении менее $\sim 1{,}0\times10^{-3}$ мм рт. ст. и ускоряющем напряжении 10,0 кВ. Распределения частиц по размерам получали методом оптической микроскопии путем обработки проекционных изображений порошков, полученных на анализаторе «Микан» с использованием объектива $40^{\times}$. Удельную поверхность $S_{БЭТ}$ определяли по многоточечному алгоритму метода БЭТ на анализаторе «Сорбтометр-М002» путем измерения объема газа, адсорбированного навеской порошка при температуре жидкого азота. Насыпную плотность $\vartheta_{нас}$, плотность после утряски $\vartheta_{утр}$ и уплотняемость У определяли в соответствии с [3] путем засыпания порошка в матрицу калиброванного объема. Резистометрические измерения порошков проводили с использованием подходов, описанных в работах [4, 5]. Измерения импеданса порошков при разных плотностях сжатия проводили по методике, описанной в [6, 7], с использованием специально разработанного контактного устройства [8] и автоматизированного измерительного комплекса на базе диэлектрического спектрометра BDS40.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены числовые распределения частиц порошков стали 316L и сплава Inconel 718 по размерам, полученные на оптическом микроскопе. Как видно из рисунка, диапазон размеров частиц обоих порошков составляет от ~5 до ~40 мкм с присутствием небольшого количества более мелкой фракции. Из представленных данных следует, что по сравнению с порошком сплава Inconel 718 порошок стали 316L чуть более мелкий.

Средние размеры частиц, определенные по 50-% уровню интегральных кривых числового ($d_{числ}$), поверхностного ($d_{пов}$) и массового ($d_{масс}$) распределений по размерам, также полученных на анализаторе «Микан» путем обработки проекционных изображений, для обоих порошков мало отличаются друг от друга (см. табл. 1). Это косвенно свидетельствует о том, что форма частиц обоих порошков в значительной степени близка к сферической.

Полученные данные по фракционному составу исследуемых порошков хорошо согласуются с данными по значениям их удельной поверхности, определенной по методу БЭТ на анализаторе «Сорбтометр-М002» (см. табл. 2). Как видно из таблицы, чуть более мелкий порошок стали 316L имеет чуть большую удельную поверхность по сравнению с по-



а

б

Рис. 1. Числовые распределения частиц порошков по размерам, полученные методом оптической микроскопии: а – стали 316L, б – сплава Inconel 718

Таблица 1

Средний размер частиц, определенный по 50-% уровню интегральной кривой соответствующего распределения частиц по размерам

Средний размер частиц, мкм	Сталь 316L	Сплав Inconel 718
$d_{\text{числ}}$ (числовое распределение)	13,8	15,6
$d_{\text{пов}}$ (поверхностное распределение)	15,7	17,7
$d_{\text{масс}}$ (массовое распределение)	16,5	19,7

Таблица 2

Удельная поверхность порошков стали 316L и сплава Inconel 718

Параметр	Сталь 316L	Сплав Inconel 718
$S_{\text{уд.}}$ («Микан»), м^2/г	0,048 ± 0,001	0,041 ± 0,001
$S_{БЭТ}$ («Сорбтометр-М002»), м^2/г	0,037 ± 0,002	0,032 ± 0,003
K_S, отн. ед.	0,771	0,781

рошком сплава Inconel 718. При этом экспериментально определенные значения $S_{БЭТ}$ очень хорошо согласуются с теоретическими значениями, рассчитанными по данным анализатора «Микан», исходя из предположения о том, что все частицы являются идеальными шарами с размером, соответствующим 50-% уровню интегральной кривой поверхностного распределения (см. табл. 2). Соответственно значения коэффициентов K_S, представляющих собой отношение значений $S_{БЭТ}$, определенных на анализаторах «Сорбтометр-М002» и «Микан», для обоих порошков близки к единице. Это говорит о том, что реальная площадь поверхности исследуемых порошков примерно соответствует значениям данного параметра для модельных систем с частицами аналогичного размера, имеющими сферическую форму и гладкую ровную поверхность. Следует отметить, что для подавляющего большинства металлических порошков, в технологии получения которых отсутствует стадия атомизации расплава, значения K_S, как правило, значительно больше единицы.

Полученные электронно-микроскопические изображения порошков стали 316L и сплава Inconel 718 (см. рис. 2) доказывают предположения, высказанные на основе анализа данных, полученных на приборах «Микан» и «Сорбтометр-М002». Из рисунка видно, что частицы исследуемых порошков, в большинстве своем, действительно, имеют правильную сферическую форму и обладают гладкой ровной поверхностью, что является необходимым условием для их использования в аддитивных технологиях [1].

Далее для исследуемых порошков стали 316L и сплава Inconel 718 были получены зависимости удельного электрического сопротивления от относительной плотности, представленные на рис. 3. Для каждого порошка приведены две экспериментальные кривые, соответствующие двум параллельным измерениям. После обработки данных зависимостей с использованием подхода, изложенного в работах [4, 5], были определены резистометрические параметры исследуемых порошков, некоторые из которых приведены в табл. 3. В этой же таблице представлен и ряд других физических и структурно-механических характеристик исследуемых материалов, связанных с их проводящими свойствами.

Как следует из рис. 3, структурно-механические характеристики сравниваемых порошков довольно близки, причем параметры уплотняемости У, характеризующие относительное изменение объема порошков при переходе от насыпной плотности к плотности после утряски [3], для них полностью совпадают. Оба порошка достаточно плохо прессуются, вследствие чего кривые, представленные на рис. 3,

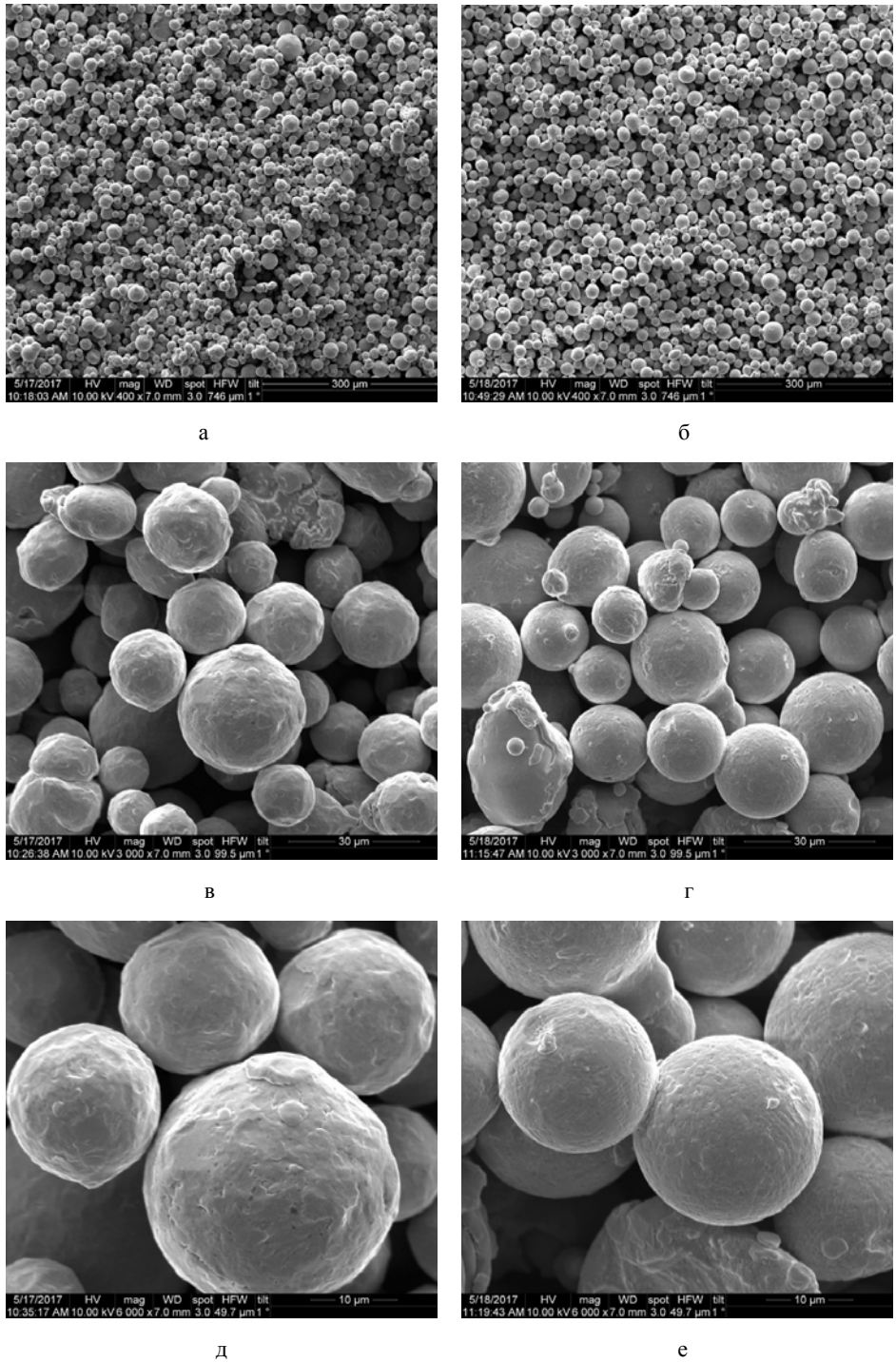


Рис. 2. Электронно-микроскопические изображения частиц порошков стали 316L (слева) и сплава Inconel 718 (справа), полученные при разных увеличениях: а, б – 400×; в, г – 3000×; д, е – 6000×

были получены в относительно узком диапазоне сжатия, доступном для использованного в работе контактного устройства [8]. Плохая прессуемость навесок обусловлена высокой равномерностью заполнения объемов исследуемыми порошками при достижении $\vartheta_{утр}$, что достигается за счет сферической формы и гладкой поверхности частиц, узкого диапазона изменения их размеров, а также достаточно высокой кристаллической плотности материалов порошков (см. табл. 3). Еще одним фактором, затрудняющим прессуемость, является достаточно высокая твердость стали 316L и, особенно, сплава Inconel 718 (см. табл. 3).

Отрицательные значения относительного порога перехода порошков в электропроводное состояние τ_c, введенного в работе [9], и рассчитываемого с учетом их структурно-механических характеристик, свидетельствуют о том, что оба порошка начинают про-

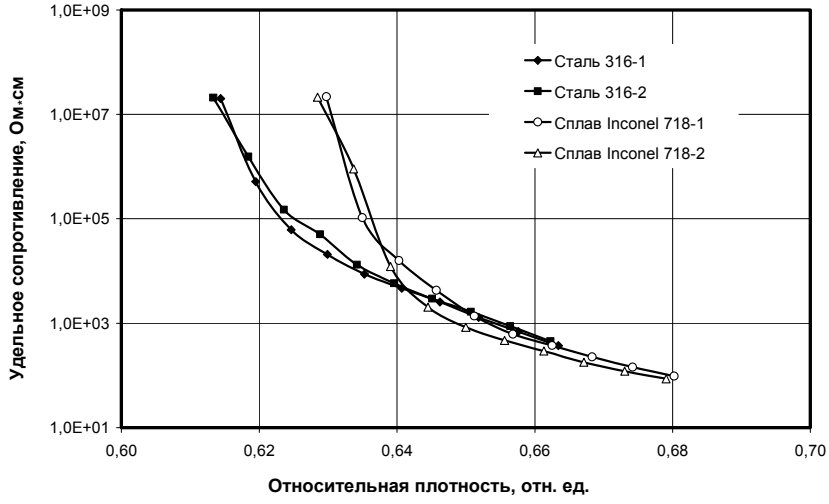
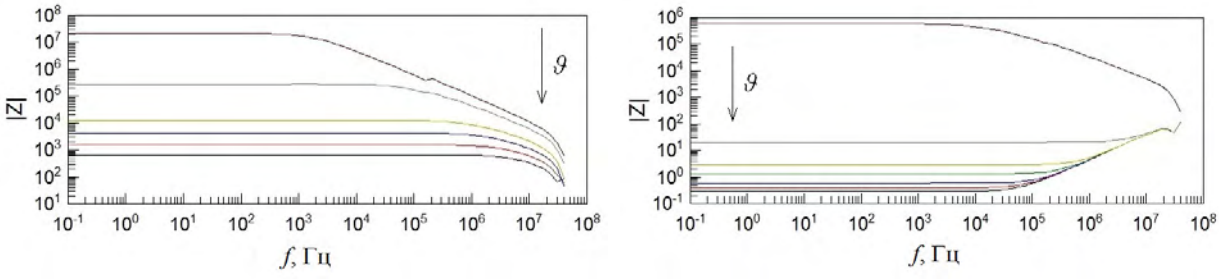


Рис. 3. Зависимости удельного электрического сопротивления σ порошков стали 316L (черные значки) и сплава Inconel 718 (белые значки) от относительной плотности ϑ

Таблица 3

Некоторые физические свойства порошков стали 316L и сплава Inconel 718

Параметр	Сталь 316L	Сплав Inconel 718
ϑ_c (относительная критическая плотность), отн. ед.	0,612	0,628
$\vartheta_{нас}$ (относительная насыпная плотность), отн. ед.	0,562	0,550
$\vartheta_{утр}$ (относительная плотность после утряски), отн. ед.	0,672	0,657
У (уплотняемость), отн.ед.	0,164	0,164
τ_c, (относительный порог перехода порошка в электропроводное состояние), отн. ед.	–0,183	–0,085
$\sigma_{бп}$ (удельное сопротивление порошка в беспористом состоянии), Ом×см	$6{,}7\times10^{-2}$	$7{,}3\times10^{-2}$
ρ (удельное сопротивление материала), Ом×м [10]	$0{,}75\times10^{-6}$	$1{,}25\times10^{-6}$
$\rho_{кр}$ (кристаллическая плотность материала), г/см^3 [11]	7,89	8,19
HB (твердость материала по Бринеллю) [11]	165 макс.	331 мин.



а б

Рис. 4. Зависимости модуля импеданса /*Z*/ от частоты *f* переменного тока, полученные для порошков при разных степенях сжатия: а – сталь 316L, б – сплав Inconel 718

водить ток без приложения внешнего уплотняющего усилия. Гипотетические значения электрического сопротивления предельно сжатых проб $\sigma_{бп}$, полученные экстраполяцией кривых, приведенных на рис. 3, на беспористое состояние, хорошо согласуются с имеющимися сведениями об удельном сопротивлении ρ материалов, из которых изготовлены исследуемые порошки (см. табл. 3). Оба этих фактора свидетельствуют об отсутствии определяющего влияния вероятных поверхностных пленок на удельное сопротивление порошков на постоянном токе и, соответственно, позволяют сделать заключение о достаточно высокой степени чистоты поверхности их частиц.

Для получения дополнительной информации о проводящих свойствах межчастичных контактов и поверхностных покрытий на частицах исследуемых порошков в настоящей работе были проведены измерения их комплексного сопротивления методом импедансной спектроскопии [6–8]. Полученные зависимости модуля импеданса /*Z*/ от частоты *f* переменного тока приведены на рис. 4.

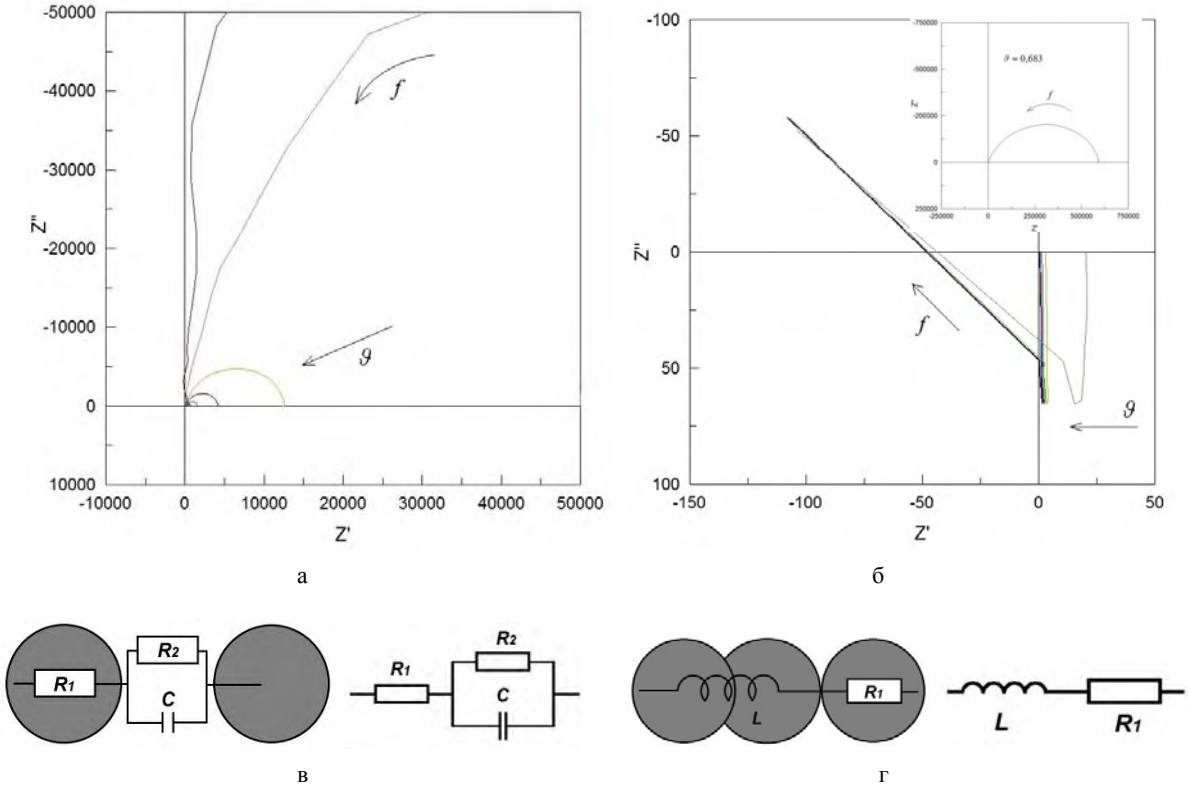


Рис. 5. Годографы импеданса порошков, полученные при разных степенях сжатия (вверху) и соответствующие им элементарные ячейки токопроводящей структуры порошков и эквивалентные электрические схемы замещения (внизу): а, в – сталь 316L; б, г – сплав Inconel 718

Как видно из рис. 4, частотные зависимости модуля импеданса, полученные для порошков стали 316L и сплава Inconel 718 в близком диапазоне относительных плотностей сжатия, принципиально отличаются между собой. Для порошка стали 316L для всего набора частотных зависимостей, полученных в диапазоне сжатия, доступном с использованием контактного устройства [8], при увеличении f выше определенного значения модуль импеданса начинает снижаться (см. рис. 4а). При этом с ростом плотности порошка значение f, при котором начинается снижение, закономерно сдвигается в высокочастотную область. В случае порошка сплава Inconel 718 аналогичная картина наблюдается только на начальном этапе уплотнения (см. рис. 4б). Частотные зависимости, получаемые при дальнейшем сжатии, характеризуются уже ростом модуля импеданса, начиная с некоторого значения f, которое, наоборот, сдвигается в низкочастотную область с ростом степени уплотнения.

Наборы годографов импеданса исследуемых порошков, представляющие собой зависимости реактивной (Z'') составляющей импеданса от ее активной составляющей (Z'), приведены на рис. 5. Из рис. 5а видно, что для порошка стали 316L все полученные годографы представляют собой полуокружности, расположенные на оси абсцисс, с центром, немного смещенным вниз относительно данной оси. При этом отрезок, отсекаемый правой (низкочастотной) составляющей годографа на оси абсцисс, закономерно уменьшается с увеличением степени сжатия порошка, тогда как отрезок, отсекаемый левой (высокочастотной) составляющей, остается постоянным. Как показано, например, в [7, 12], такой тип годографа хорошо описывается эквивалентной схемой, приведенной на рис. 5, которая включает в себя два активных сопротивления R_1, R_2 и емкость C. В данном случае R_1 отвечает сопротивлению зерна частиц стали 316L; R_2 соответствует сопротивлению межчастичных контактов в порошке, а C характеризует электрическую емкость, образуемую между соседними частицами, поверхность которых играет роль обкладок конденсатора [12]. С увеличением степени уплотнения значение R_2 закономерно снижается, что выражается в уменьшении диаметра получаемых полуокружностей (см. рис. 5а), тогда как значение R_1 остается постоянным, что выражается в постоянстве точки пересечения левой части получаемых полуокружностей с осью абсцисс. Следует также отметить, что результаты, полученные для порошка стали 316L, хорошо согласуются с данными работы [13], в которой изучалась коррозия пористых образцов именно этой марки стали путем измерения их импеданса. Годографы импеданса образцов, исследованных в работе [13], также имели вид, аналогичный годографам порошка стали 316L, полученным в настоящей работе (см. рис. 5а).

Для порошка сплава Inconel 718 такой тип годографа характерен только на самом начальном этапе уплотнения (см. вкладку на рис. 5б). Как показали проведенные измерения, годографы, полученные при дальнейшем сжатии порошка, имеют принципиально другой вид, и представляют собой линии, с ростом f уходящие в область положительных значений реактивной составляющей импеданса Z'' (см. рис. 5б). При еще большем увеличении f на годографах последовательно появляются два характерных «излома».

С учетом сведений, изложенных в работе [12], низкочастотная составляющая годографов такого типа в первом приближении может быть описана эквивалентной схемой, представленной на рис. 5г, которая включает в себя активное сопротивление R_1 и индуктивность L. Эти параметры характеризуют проводящие свойства перколяционного кластера, пронизывающего весь объем порошка, который образован непосредственно контактирующими между собой зернами частиц сплава Inconel 718.

Смена типа годографа в процессе сжатия порошка сплава Inconel 718 свидетельствует о наличии качественного изменения в его токопроводящей структуре, связанного с образованием перколяционного кластера при достижении плотности $\vartheta = 0{,}685$ отн. ед. Причины появления «изломов» при дальнейшем росте f в настоящее время неизвестны. Их наличие может быть связано как со свойствами исследуемого порошка, так и с особенностями используемой схемы измерений. Для достоверного установления этих причин в будущем будут запланированы и проведены дополнительные исследования.

Таким образом, результаты измерений импеданса порошков стали 316L и сплава Inconel 718, имеющих достаточно близкие характеристики проводимости на постоянном токе (см. рис. 3), наглядно проиллюстрировали наличие существенных различий в их токопроводящей структуре на переменном токе (см. рис. 4 и 5). В частности, установлено, что при сжатии порошка Inconel 718 до плотности $\vartheta = 0{,}685$ отн. ед. происходит образование перколяционного кластера, образованного непосредственными контактами между зернами частиц сплава, тогда как для порошка стали 316L в исследованном диапазоне степеней уплотнения образования такого кластера не происходит. Данный результат может быть вполне закономерным, если принять во внимание известные данные [14] о том, что механизм электрической проводимости различных марок сталей и сплавов существенно зависит от целого ряда факторов. Такими факторами могут являться содержание кремния, углерода, других легирующих добавок, особенности микроструктуры и взаимного расположения зерен, величины контактного сопротивления межкристаллитных границ, наличие макродефектов структуры, включений интерметаллидных фаз и так далее [14]. Следует отметить, что информация, полученная в данной работе методом импедансной спектроскопии, является важной с точки зрения возможного практического использования методов резистометрии и импедансной спектроскопии для контроля качества порошков, применяемых в аддитивных технологиях.

Учитывая важность влияния химического состава поверхностных слоев на частицах порошков, применяемых в аддитивных технологиях, на микро- и макроструктуру получаемых из них деталей, отдельное внимание в настоящей работе было уделено изучению данного вопроса. Для этого методом РСМА был определен состав поверхностных и приповерхностных слоев частиц порошков стали 316L и сплава Inconel 718, и поверхности слома деталей, изготовленных из этих порошков методом послойного лазерного сплавления. Детали были изготовлены в соответствии с ГОСТ 1497-84, имели цилиндрическую форму, и исследовались методом РСМА в местах разрушения, произошедшего во время их испытаний на растяжение [2]. ЭМ изображения поверхности слома деталей, полученные при разных увеличениях, приведены на рис. 6. Результаты РСМА поверхности частиц порошков стали 316L и сплава Inconel 718, сломов деталей, изготовленных из этих порошков, после их испытаний на растяжение, а также табличные данные о химическом составе исследуемых материалов хорошо согласуются как между собой, так и с литературными данными о химическом составе исследуемых материалов [11]. ЭМ изображения сломов деталей, полученные при больших увеличениях (см. рис. 6д и 6е), свидетельствуют о том, что «ячеистая» структура материала обоих образцов достаточно схожа, что обусловлено использованием исходных порошков, имеющих близкий фракционный состав. При этом следует отметить, что на ЭМ изображениях поверхностей слома обоих деталей четко видны вкрапления инородных включений, которые, согласно результатам РСМА, представляют собой либо оксиды металлов, входящих в состав исходных сплавов, либо привнесенные извне фазы органического происхождения.

Заключение

1. Исследованы свойства поверхности частиц мелкодисперсных порошков нержавеющей стали 316L и жаропрочного сплава Inconel 718, используемые в аддитивных технологиях. Доказана правомерность использования при описании свойств данных порошков моделей их структуры, основанных на предположении о сферической форме частиц и отсутствии поверхностных дефектов.

2. Методом импедансной спектроскопии показано, что годографы импеданса порошков стали 316L и сплава Inconel 718 описываются разными эквивалентными схемами замещения, что иллюстрирует различия в токопроводящей структуре данных материалов на переменном токе.

3. Проведенные исследования поверхности слома образцов, изготовленных из стали 316L и сплава

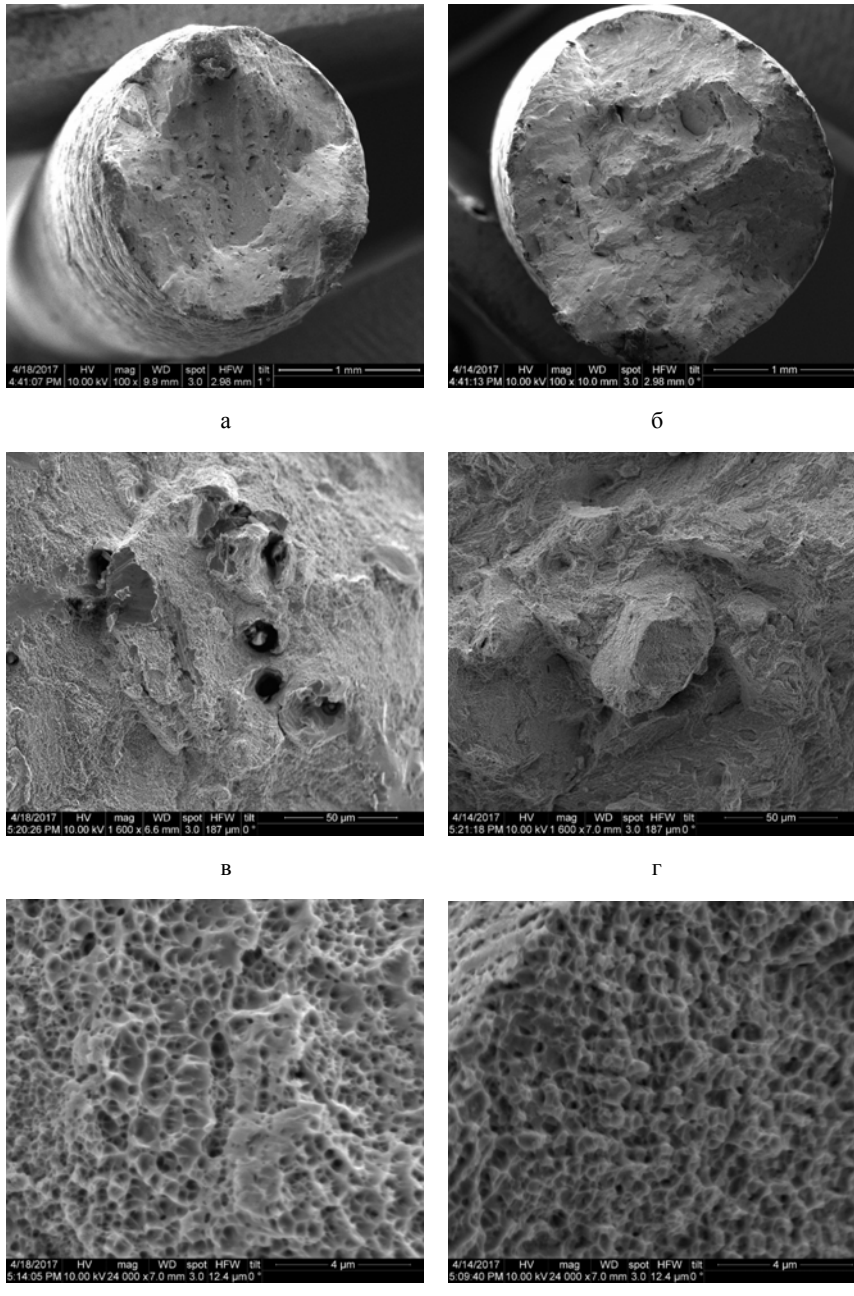


Рис. 6. Электронно-микроскопические изображения поверхности слома деталей, изготовленных методом послойного лазерного сплавления из порошков стали 316L (слева) и сплава Inconel 718 (справа), полученные при разных увеличениях: а, б – 100×; в, г – 1600×; д, е – 24000×

Inconel 718 методом послойного лазерного сплавления, подтвердили идентичность химического состава поверхности исходных порошков и поверхности слома изготовленных из них деталей.

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам РФЯЦ-ВНИИЭФ А. А. Юхимчуку и И. П. Максимкину за содействие в организации данной работы, а также сотрудникам НИФТИ Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского (г. Н. Новгород) в лице В. Н. Чувильдеева за предоставление образцов для исследований.

Литература

1. https://extxe.com/9838/additivnye-tehnologii-i-poroshkovaja-metallurgija

2. Максимкин И. П., Юхимчук А. А., Малков И. Л. и др. Исследование взаимодействия с водородом стали 316L и сплава Inconel 718, полученных методом послойного лазерного сплавления / 16-я научно-техническая конференция «Молодежь в нау-

ке» // Сборник докладов. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2018. Т. 2. С. 50–57.

3. Андриянов Е. И. Методы определения структурно-механических характеристик порошкообразных материалов. М.: Химия, 1982. С. 256.

4. Царев М. В., Мокрушин В. В. Влияние гранулометрических свойств порошка металлического скандия на его электропроводность // Журнал технической физики. 2007. Т. 77, Вып. 3. С. 80–86.

5. Mokrushin V. V., Tsarev M. V. Resistivity Measurements for Characterization of SHS Powders // International Journal of SHS. 2007. Vol. 16, N 2. P. 96–104.

6. Mokrushin V. V., Tsarev M. V., Korshunov K. V., Postnikov A. Yu., Tsareva I. A. Resistometry and Impedance Spectroscopy for Characterization of Powders Used in SHS Reactions // International Journal of SHS. 2014. Vol. 23, N 1. P. 26–35.

7. Korshunov K. V., Tsarev M. V., Mokrushin V. V., Shapovalov A. M., Zabavin E. V. Application of impedance spectroscopy to study oxidized powders of titanium hydride // Journal of Alloys and Compounds. 2015. Vol. 645. P. 140–143.

8. Пат. 2546994, РФ. Контактное устройство для определения электрического сопротивления порошкового материала при его сжатии / Шаповалов А. М., Мокрушин В. В., Коршунов К. В. и др. // Бюллетень изобретений. 2015. № 10.

9. Царев М. В., Мокрушин В. В., Забавин Е. В. Исследование электропроводящих свойств порошков гидрида циркония с различным размером частиц // Журнал функциональных материалов. 2008. № 5. С. 192–197.

10. https://dpva.ru/Guide/GuidePhysics/ Electricity And Magnethism

11. https://emk24.ru/wiki

12. Поклонский Н. А., Горбачук Н. И. Основы импедансной спектроскопии композитов. Курс лекций. Минск: БГУ, 2005. С. 132.

13. Кичигин В. И., Полякова М. В., Сюр Т. А. и др. Применение метода электрохимического импеданса к исследованию коррозии пористой порошковой стали 316L // Защита металлов. 2002. Т. 38, № 6. С. 1–8.

14. Справочник металлиста / Под ред. Н. С. Ачеркана. М.: Машиностроение, 1965. Т. 1.

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРАМИ ПЕЧЕЙ КАПРОЛОНОВОГО УЧАСТКА

Е. С. Китаева, М. В. Некрасов, М. Ю. Барсукова

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Установка предназначена для получения блоков-заготовок капролона (полиамид 6 блочный (капролон В)) из капролактама методом термической блочной полимеризации. Данный материал используется для изготовления изделий конструкционного и антифрикционного назначения, так как он обладает низким коэффициентом трения, имеет высокую прочность и износостойкость.

Идентификация объекта управления

Для обеспечения устойчивой работы системы автоматического управления (САУ) с удовлетворительными показателями качества управления требуется рассчитать оптимальные значения параметров регулирующего устройства. Для этого, в первую очередь, необходимо определить характеристики объекта управления [1].

Выходная координата $y(t)$ является управляемой величиной объекта управления, рассматриваемого как звено, имеющее также управляющее воздействие $x(t)$, являющееся входной переменной.

Выражение, определяющее зависимость между выходной и входной переменными, является математической моделью объекта [2]:

$$y(t) = F\left[x(t)\right] \tag{1}$$

Модель объекта может быть представлена его передаточной функцией:

$$W_0(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} \tag{2}$$

где s – оператор Лапласа, $X(s)$ – изображение входной переменной в операторной форме, $Y(s)$ – изображение выходной координаты в операторной форме.

В данном случае входным воздействием является процент мощности нагревательного элемента. Значение температуры в градусах, получаемое на выходе объекта, является выходной переменной. Кривая разгона представлена на рис. 1.

Таким образом, по экспериментальной кривой, путем вычислений [3], определили, что объект управления может быть описан передаточной функцией:

$$W_0 = \frac{8{,}16\left[\dfrac{^\circ C}{\%P}\right]\cdot e^{-3[\text{мин}]\cdot s}}{\left(182{,}5[\text{мин}]\cdot s + 1\right)} \tag{3}$$

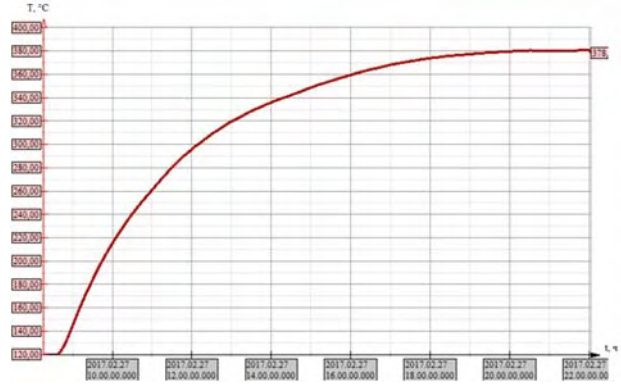


Рис. 1. Кривая разгона

Была проведена оптимизация параметров объекта управления с учетом среднеквадратичной погрешности. Объект управления описывает следующая передаточная функция:

$$W_0 = \frac{8{,}16\left[\dfrac{^\circ C}{\%P}\right]\cdot e^{-6[\text{мин}]\cdot s}}{\left(175[\text{мин}]\cdot s + 1\right)} \tag{4}$$

Для проверки правильности определения характеристик провели сравнение кривой переходного процесса и кривой, вычисленной в ходе идентификации (рис. 2).

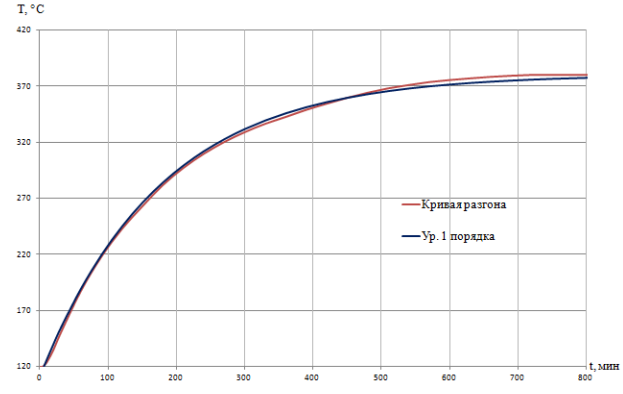


Рис. 2. Сравнение переходного процесса и вычисленной кривой

Функциональная и структурная схемы САУ

Функциональная схема САУ отражает состав системы и характер взаимодействия ее элементов с точки зрения их назначения, т. е. выполняемых функций [4].

Объектом управления является электрический нагреватель, входная координата которого электрическая мощность. Изменение мощности нагрева выполняется при помощи регулирующего органа (РО). Широтно-импульсная модуляция позволяет преобразовать сигнал с контроллера в мощность нагрева ТЭНа. Для контроля температуры печи используется термопара типа ТХК (хромель-копель). Задающее устройство (ЗУ), регулятор, а также формирователь сигнала рассогласования выполнены программно в управляющем контроллере. Функциональная схема САУ представлена на рис. 3.

Для расчета параметров настройки регулятора проектируемой САУ необходимо составление структурной схемы САУ, в которой все функционально необходимые элементы представлены своими передаточными функциями.

На рис. 4 представлена структурная схема САУ, в которой $G(s)$ – уставка температуры, $E(s)$ – ошибка рассогласования, $U(s)$ – управляющее воздействие, $X(s)$ – выходная величина, $W_{\text{Рег}}(s)$ – передаточная функция регулятора, $W_{\text{РО}}(s)$ – передаточная функция регулирующего органа, $W_{\text{ДТ}}(s)$ – передаточная функция датчика температуры, $W_{\text{об}}^{U}(s)$ – передаточная функция объекта по управлению.

Объект управления описывается уравнением 1 порядка. Передаточная функция нагревателя имеет вид (5).

При синтезе САУ вводится понятие обобщенного объекта управления (в отличие от технологического объекта управления), который включает в себя технологический объект управления и все остальные функционально-необходимые элементы (исполнительные, измерительные устройства, промежуточные преобразователи и т. д.), кроме управляющего устройства – регулятора. На рис. 5 представлена обобщенная структурная схема САУ.

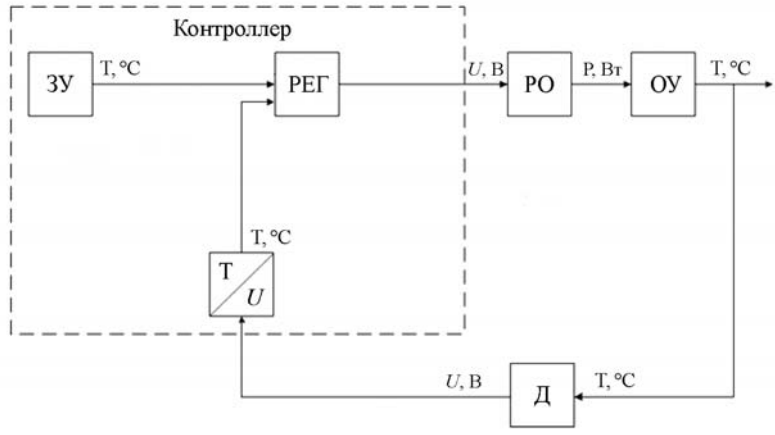


Рис. 3. Функциональная схема САУ

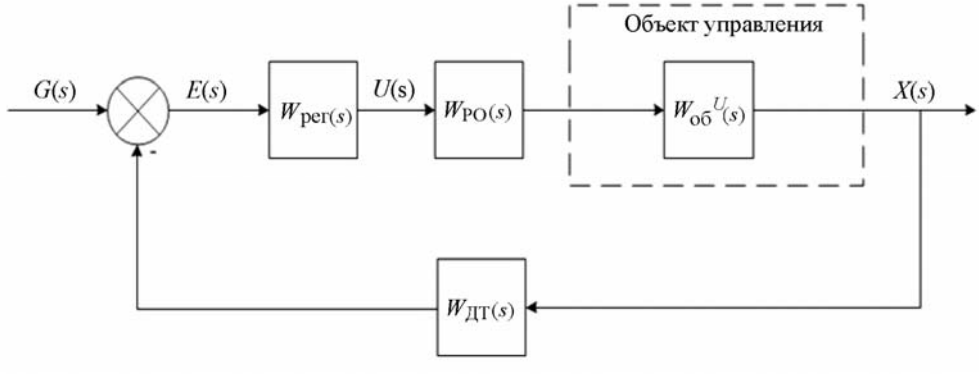


Рис. 4. Структурная схема САУ

Рис. 5. Обобщенная структурная схема САУ

Объект управления описывается уравнением 1 порядка. Передаточная функция имеет вид:

$$W^U_{\text{Обоб}}(s) = W^U_{\text{Об}}(s) \cdot W^U_{\text{РО}}(s) \cdot W^U_{\text{ДТ}}(s) = \\ = \frac{K_{\text{Об}} \cdot K_{\text{РО}} \cdot K_{ДТ} \cdot e^{-\tau_0 s}}{T_0 s + 1} \quad (5)$$

$$W^U_{\text{Обоб}}(s) = \frac{6{,}42 \cdot e^{-6s}}{175s + 1} \quad (6)$$

Расчет параметров настройки регулятора

В качестве регулятора выбирается один из типовых регуляторов, И, П, ПИ или ПИД. Наилучшие показатели качества регулирования, в данном случае, дает применение ПИ-регуляторов. Данный тип регуляторов подходит для одноемкостного объекта с запаздыванием.

Уравнение ПИ-регулятора:

$$y(t) = K_R \left[\varepsilon(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon(t)\, dt \right] \quad (7)$$

Передаточная функция ПИ-регулятора:

$$W_{ПИ}(s) = K_R \frac{T_i s + 1}{T_i s} \quad (8)$$

Для расчета параметров настройки регулятора вводятся обозначения:

– $T = \dfrac{T_{\text{обоб}}}{\tau}$ – относительная постоянная времени,

– $I = \dfrac{T_i}{\tau}$ – относительное время изодрома (время интегрирования),

– $K = K_R K_{\text{обоб}}$ – коэффициент усиления разомкнутой системы.

Расчет производится по методу, основанному на критерии оптимального модуля [1]:

$$K = \frac{6T^3 + 6T^2 + 3T + 1}{4\left(3T^2 + 3T + 1\right)} \quad (9)$$

$$\frac{1}{I} = \frac{6T^2 + 6T + 3}{6T^3 + 6T^2 + 3T + 1} \quad (10)$$

Параметры ПИ-регулятора: $K_R = 2{,}27$; $T_i = 175$.

Цифровые системы управления

Для моделирования и управления с использованием управляющих вычислительных машин (УВМ) необходимо применять специальные цифровые методы, основанные на дискретном представлении непрерывных функций и рекуррентных соотношениях, позволяющих производить вычисления управляющих воздействий в реальном масштабе времени. Рекуррентные соотношения позволяют упрощать вычисление последовательности значений, где каждое новое текущее значение функции вычисляется на базе текущего и предыдущих значений аргумента и предыдущих значений функции.

Преобразование сигналов – это термин, который применяется в теории дискретных систем и относится к преобразованию сигнала из дискретного вида в непрерывный. Данное преобразование необходимо для описания предположения (экстраполяции) о поведении непрерывного сигнала представленного дискретной последовательностью в промежутках между моментами дискретизации, когда его значение неизвестно. Практическая реализация преобразователей дискретных сигналов приводит к новым непрерывным сигналам, которые отличаются от исходных, но в то же время достаточно близки к ним по своим параметрам для решения большинства инженерных задач. Структурная схема процесса с использованием экстраполятора представлена на рис. 6.

Рис. 6. Структурная схема с экстраполятором

Цифровое представление ПИ-регулятора

Рекуррентное соотношение, описывающее регулятор, имеет вид:

$$u(k) = u(k-1) + q_0 e(k) + q_1 e(k-1) + \\ + q_2 e(k-2) + \ldots + q_v e(k-v) \quad (11)$$

Для аналоговой функции рекуррентное соотношение рассчитывается с помощью метода дискретно-аналогового моделирования, используя *z*-преобразования разных экстраполяторов.

Путем вычислений получено рекуррентное соотношение для ПИ-регулятора с использованием экстраполятора нулевого порядка:

$$u_i = u_{i-1} + k_R \left(e_i + q_1 e_{i-1} \right) \quad (12)$$

$$q_1 = \frac{T_o}{T_i} - 1 \quad (13)$$

где, U – управляющее воздействие, e – ошибка рассогласования, T_o – время цикла объекта, T_i – интегральная составляющаяся ПИ-регулятора.

Разработка системы автоматического управления (САУ)

Входными сигналами для контроллера ICPCON – i7188EA являются сигналы с термопар типа ТХК, передающиеся через блок АЦП AI-8TC по интерфейсу RS-485.

На выходе с контроллера формируется сигнал широтно-импульсной модуляции (ШИМ) с амплитудой 220 В, с помощью которого задается мощность нагревательного элемента.

Для получения широтно-импульсного модулированного сигнала заданной величины, необходимо использовать устройство, которое осуществляет гальваническую развязку. Таким устройством является твердотельное реле. Для защиты системы от перегрузки использован предохранитель для цепи переменного тока. Для сигнализации замыкания реле к управляющему контакту подключен трансформатор тока. Для питания схем и устройств необходимо использовать преобразователь сигналов промышленной сети. С этой задачей будет справляться блок питания для получения напряжения плюс 24 В, который подсоединен к сети 220 В 50 Гц. Данное напряжение необходимо для питания микроконтроллера, АЦП и твердотельного реле. Последовательность функциональных процессов представлена на рис. 7.

Назначение программы управления САУ

ПО предназначено для решения следующих задач:

− задачи по контролю температуры объекта управления на входе в систему автоматического регулирования;

− задачи по расчету мощности нагревательного элемента печи и управлению работой цифрового регулятора: включение/отключение твердотельного реле;

− задачи по проверке работоспособности электрических составляющих системы автоматического регулирования температуры.

Программа позволяет выполнить следующие процедуры:

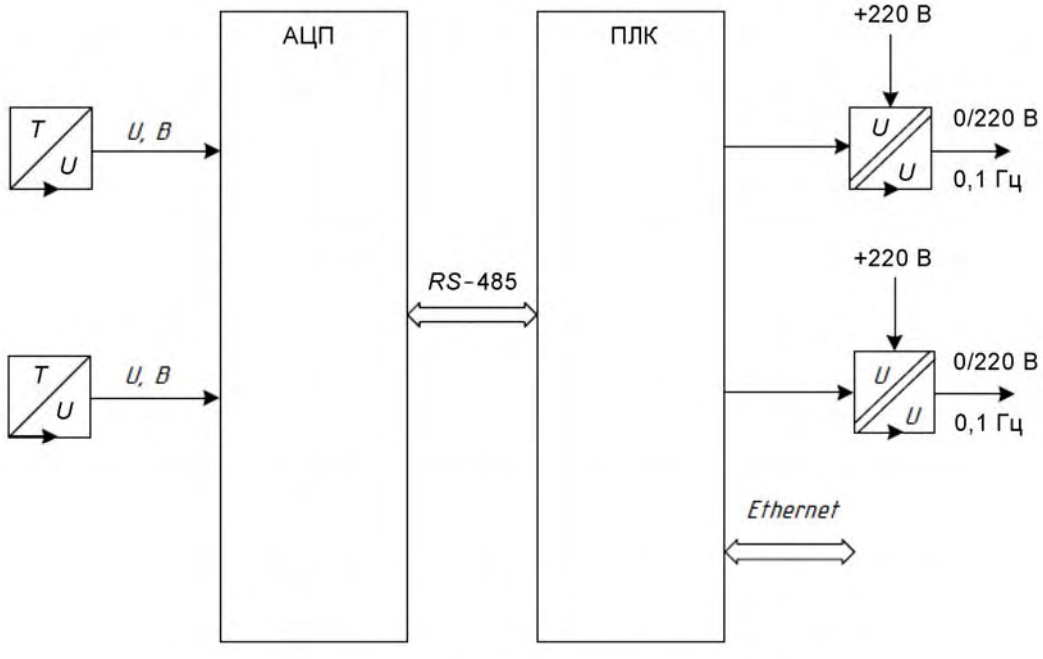


Рис. 7. Схема электрическая функциональная

− задать температуру нагрева, время выдержки и скорость охлаждения печи;

− сформировать сигнал рассогласования между заданной температурой и текущем значением, полученным с термопары;

− осуществить расчет значения управляющего воздействия (мощности);

− реализовать ШИМ сигнал, управляющий мощностью нагревательного элемента;

Алгоритм программы управления САУ представлен на рис. 8.

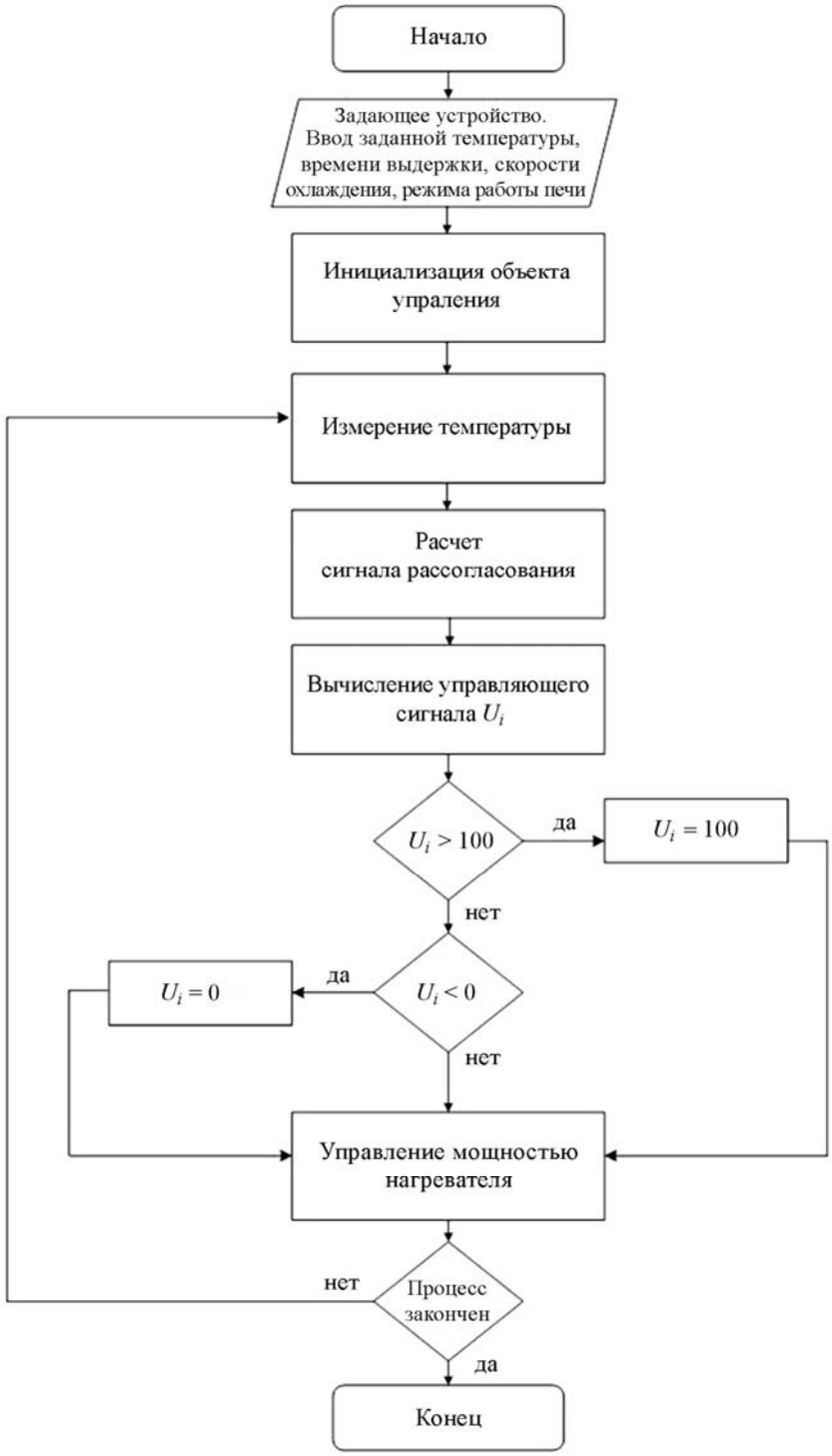


Рис. 8. Алгоритм программы

Разработка интерфейса оператора

Разработанное программное обеспечение состоит из OPC-сервера (объектно-ориентированная программная технология) для опроса конечных устройств и ПО верхнего уровня, написанного с помощью SCADA-системы MasterSCADA. Управление и настройками осуществляется с мнемосхемы программы верхнего уровня (рис. 9). MasterSCADA обеспечивает графическое представление хода выполнения техпроцесса, а также управление техпроцессом с помощью графических средств [5].

Экспериментальное подтверждение работоспособности САУ

По завершению создания программного обеспечения было проведено тестирование, позволяющее проверить адекватность работы системы автоматического регулирования.

Сигнал, поступающий с выхода ПИ-регулятора, должен быть преобразован в сигнал, «понятный» для исполнительного устройства. Релейный выход позволяет использовать соотношение между длительностями включенного и выключенного состояний управляющего выхода, которое меняется пропорционально величине мощности (в процентах), при этом период переключения фиксирован. Для электрических печей с большой инерционностью оптимальная длина импульса ШИМ сигнала составляет от 10 до 30 с. Исходя из этого, время цикла системы совпадает с длиной импульса ШИМ.

Было рассмотрено влияние коэффициентов ПИ-регулятора на показатели качества системы. Требования к управлению печи представлены в табл. 1.

Полученные параметры объекта использовались для расчета параметров настройки регулятора по методу оптимального модуля. Данные параметры регулятора позволили определить область для даль-

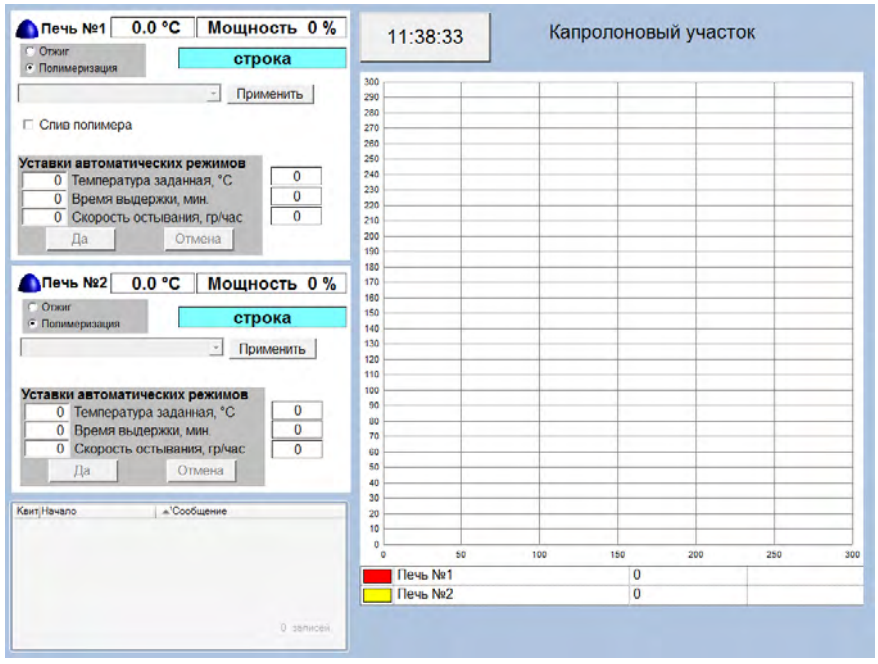


Рис. 9. Интерфейс оператора

Таблица 1

Требования к управлению печи

Для режима полимеризации и отжига	Время регулирования < 90 мин, Отклонение температуры ± 3 °C
Для режима остывания	Скорость остывания ≤ 6 °C/ч

Таблица 2

Результаты исследования

	Время регулирования	Перерегулирование
Печь полимеризации K_R = 1,1; Ti = 55 мин	40 мин	1,3 %
Печь отжига K_R = 0,935; Ti = 64 мин.	70 мин	1,5 %

нейшей настройки системы регулирования. Для оценки качества системы было определено время регулирования и перерегулирование, значения показаны в табл. 2.

На рис. 10 и рис. 12 отображен полный цикл работы печи полимеризации и отжига, а именно: нагрев, выдержка и остывание. Заданная температура 160 °С для печи полимеризации и 180 °С для печи отжига. Скорость остывания 4 °С/ч. На рис. 11 и рис. 13 представлено изменение мощности нагревательного элемента в процессе работы печи отжига. Температура находится в допустимых пределах требований к управлению печью.

Рис. 10. Переходный процесс печи полимеризации

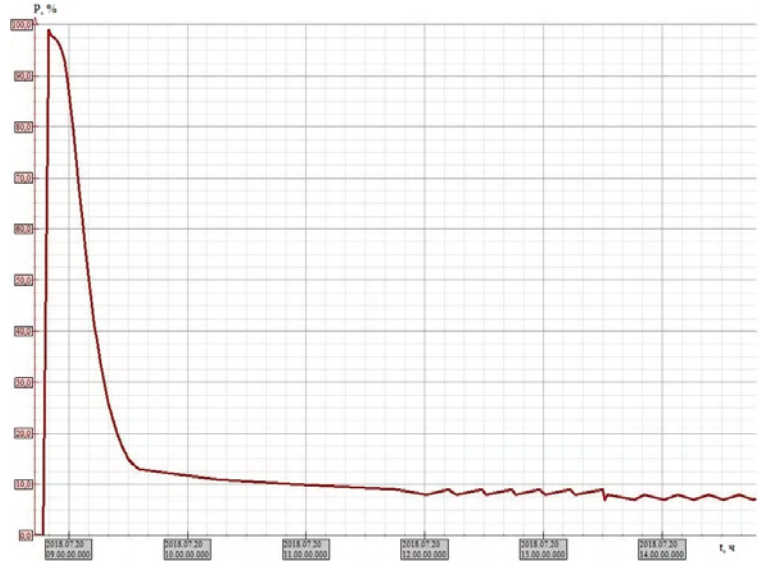


Рис. 11. Изменение мощности печи полимеризации

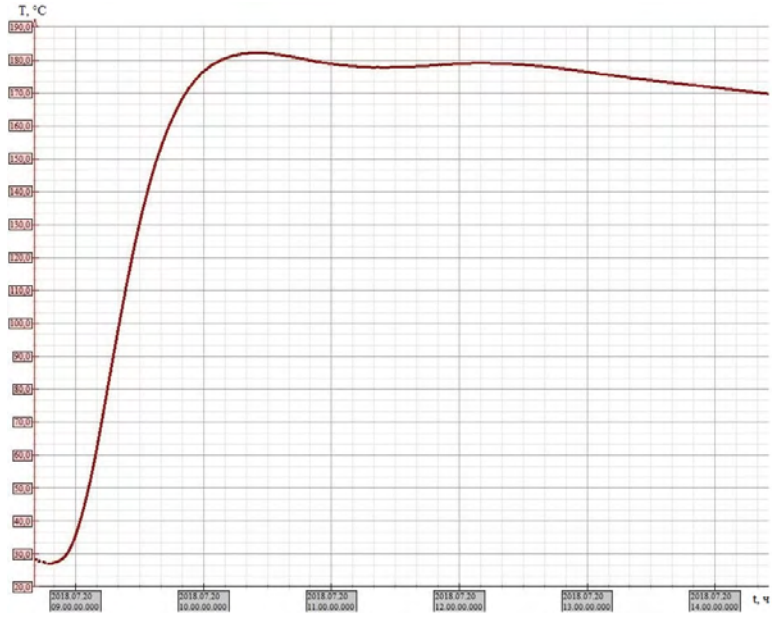


Рис. 12. Переходный процесс печи отжига

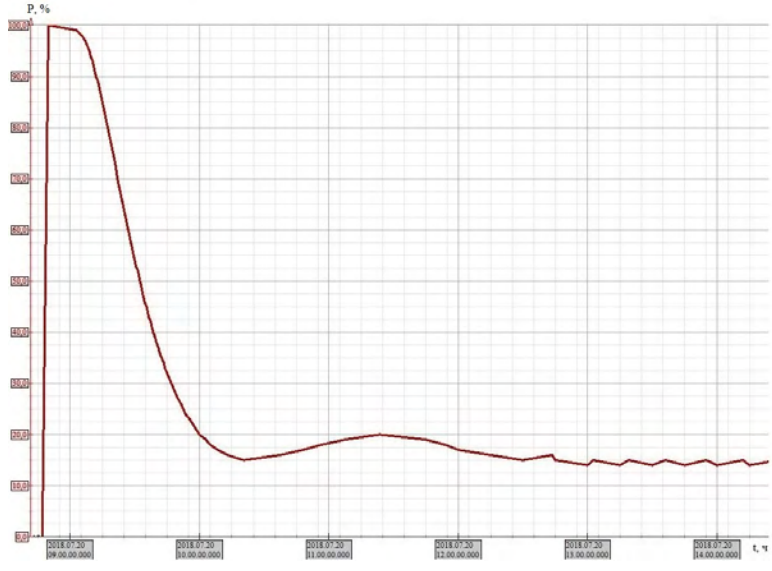


Рис. 13. Изменение мощности печи отжига

Литература

1. Гурецкий Х. Анализ и синтез систем управления с запаздыванием. М.: Машиностроение, 1974.

2. Расчет автоматических систем / Под ред. Фатеева А. В. М.: Высшая школа, 1973.

3. Дядик В. Ф., Ливенцов С. Н. Руководство по определению характеристик технологических объектов управления и настройке параметров регуляторов. Томск: ТПУ, 2006.

4. Дядик В. Ф., Байдали С. А., Криницын Н. С. Теория автоматического управления: Учебное пособие. Томск: ТПУ, 2011. С. 197.

5. SCADA-система MasterSCADA. [Электронный ресурс]: - Режим доступа: http://insat.ru/products/?category=9

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ СОВРЕМЕННЫХ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ МИКРОСХЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕСТЕРА FORMULA HF3

Е. П. Коянкина

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Современные принципы построения радиоэлектронной аппаратуры базируются на применении быстродействующих микросхем с высокой степенью интеграции. Рост сложности задач ведёт к увеличению количества выводов, частоты работы, росту функциональности микросхем.

С целью контроля электрических параметров применяемых интегральных схем производилось исследование возможности применения тестера FORMULA HF3 в маршруте разработки программ параметрического и функционального контроля (ПФК).

Для достижения лучших показателей габаритно-массовых характеристик в разрабатываемых приборах применяемая электронная компонентная база (ЭКБ) постоянно увеличивает степень интеграции и быстродействия, все больше задач решается в рамках одного корпуса.

Центр проектирования КБ-2 занимается разработкой радиационно-стойкой ЭКБ. Одной из задач центра проектирования является разработка тестовых решений для контроля характеристик разрабатываемых микросхем. Параметрический и функциональный контроль необходим на протяжении всего маршрута, от разработки опытных образцов до испытаний в составе прибора (рис. 1).

Контроль характеристик микросхем строго регламентирован нормативной документацией:

– ГОСТ 16504-81 «Испытания и контроль качества продукции»,

– ГОСТ 18725-83 «Микросхемы интегральные. Общие технические условия» (с изменениями № 1, 2, 3, 4 от 1991 г.),

– ОСТ 11 073.013-2008 «Микросхемы интегральные. Методы электрических испытаний» (с изменениями от 2011 г.) [1].

К программам ПФК выдвигаются следующие требования:

- автоматизация;
- соответствие требованиям стандартов на методы измерения;
- для цифровых ИС – измерение основных электрических параметров:

– тока потребления,

– входных токов (токов утечки),

– выходного напряжения,

– выходных токов.

Рис. 1. Маршрут разработки элементов ЭКБ

Имея большой опыт по созданию программ ПФК с применением тестера российского производства FORMULA 2K, имеющего 64 измерительных канала и частоту проверки 4 МГц, для решения задачи контроля современных быстродействующих микросхем, имеющих большое количество выводов, высокую частоту работы, из доступного оборудования было выбрано новое поколение тестеров FORMULA HF3. Тестеры этой модели предназначены для контроля микросхем с количеством выводов до 256 на частоте до 200 МГц.

Принципы построения программ в тестере FORMULA HF3 отличны от принципов в тестере FORMULA 2K. Поэтому потребовалось изучение возможности конфигурирования информационных каналов тестера, встроенной библиотеки функций и пользовательского интерфейса настройки проекта.

Маршрут разработки программ параметрического и функционального контроля.

1. Анализ исходных данных:
– измерительное оборудование и оснастка,
– таблица соответствия выводов,
– тест функционального контроля,
– перечень контролируемых параметров.
2. Разработка измерительной программы.
3. Проверка системы тестирования.

На этапе анализа исходных данных структурируются данные об объекте контроля с целью определения необходимого измерительного оборудования и оснастки, объема контролируемых параметров и методов контроля.

На этапе разработки измерительной программы решается задача реализации методов контроля параметров на измерительном оборудовании.

Проверка системы тестирования – это подтверждение корректной работы разработанной измерительной программы

Процесс разработки измерительной программы рассмотрим на примере программных средств тестера FORMULA HF3. В программном обеспечении тестера используется принцип «единого окна» проекта. Основа проекта – файл конфигурации выводов, предназначенный для задания соответствия между выводами испытуемого объекта контроля и каналами тестера.

Мастер тестовой последовательности предназначен для создания и редактирования тестовой последовательности входных сигналов и ожидаемых откликов.

В основном модуле – мастере измерительных программ – реализуются конкретные методы контроля микросхемы. Есть встроенная библиотека функций и процедур, которые позволяют реализовать предписанные методы измерения и контроля параметров. Программные модули-обертки обеспечивают совместимость тестера с конкретным языком программирования и с конкретной средой разработки. По сравнению с тестером FORMULA 2K в тестере FORMULA HF3 имеются более широкие возможности применения языков программирования высокого уровня – Pascal, C++ [2].

Измерительная оснастка для тестера FORMULA HF3 отличается от оснастки для тестера FORMULA 2K и представляет собой многослойную печатную плату с необходимым контактирующим устройством. Её можно разработать и изготовить своими силами, или же заказать у производителя. Сложность состоит только в том, что проектировать высокочастотную оснастку надо с учетом правил для высокочастотных схем.

На данный момент центром проектирования КБ2 подготовлено тестовое решение для контроля новых разработанных микросхем 5511БЦ3Т-020 (НИИИС), содержащее плату адаптерную с необходимым контактирующим устройством на 240 выводов и программу параметрического и функционального контроля этих микросхем с применением тестера FORMULA HF3 (рис. 2).

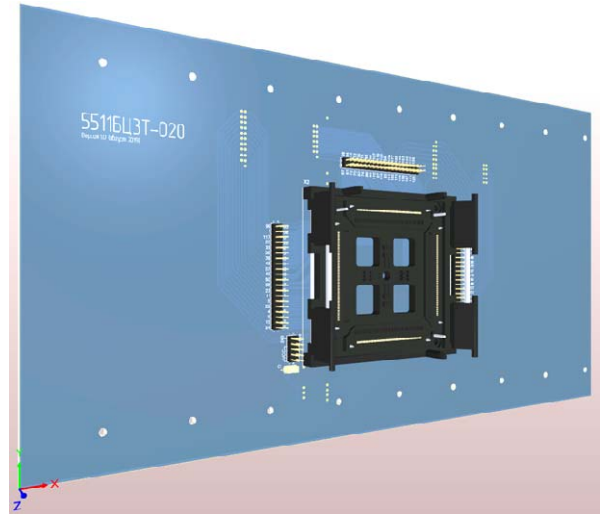


Рис. 2. Проект платы адаптерной для тестера FORMULA HF3

Заключение

Тестер FORMULA HF3 опробован в маршруте разработки программ параметрического и функционального контроля интегральных схем. В процессе изучения возможностей тестера FORMULA HF3 были созданы программы контроля микросхем серии 5517БЦ2У и 5511БЦ3Т-020 (НИИИС). Разработаны модели элементов измерительной оснастки – платы адаптерной – для проектирования в САПР Altium Designer, которые можно в дальнейшем использовать для других проектов.

Создан задел для применения тестера FORMULA HF3 для контроля современных быстродействующих микросхем.

Литература

1. Тестер FORMULA 2K. Руководство по эксплуатации, ООО «ФОРМ», редакция 13.

2. Тестер FORMULA HF3. Руководство по эксплуатации, ООО «ФОРМ», редакция 2.

ПРИМЕНЕНИЕ ПЛИС В ЗАЩИЩЕННЫХ СИСТЕМАХ СВЯЗИ И КОНТРОЛЯ ФИЗИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

В. Е. Куликов, В. В. Поляков, В. И. Стигунов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Для подтверждения и получения новых характеристик исследуемых объектов, наряду с математическим моделированием процессов, присущих работе изделия, проходит экспериментальное макетирование команд управления и контроля сигналов о работе зарядно-аппаратурных комплексов. Развитие отечественной элементной базы радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) и увеличение количества контролируемых параметров объекта потребовало разработки новых устройств, обеспечивающих высокую надежность всей системы, а также защиту внутреннего программного обеспечения от несанкционированного доступа.

В рамках развития системы автоматизации и контроля можно выделить три временных этапа, связанных с развитием отечественной радиоэлектронной аппаратуры:

1 этап. Зарождение систем связи и контроля физических объектов, первые опыты (40–60-е гг. XX в.);

2 этап. Переход на полупроводниковую аппаратуру, повышение класса точности (70-е гг. XX в.);

3 этап. Использование высокоскоростных программируемых систем контроля (80-е гг. – наст. вр.).

Основой устройства, контролирующего параметры системы, ранее являлась релейно-контакторная логика (РКЛ). Устройства, основанные на данной концепции, отличаются простотой разработки и монтажа, но требуют точных расчетов электромагнитных параметров системы для предотвращения возникновения сбоев. Также, такие системы имеют защиту информации от преднамеренного воздействия. Фотография устройства, собранного на РКЛ, представлена на рис. 1.

Система связи и контроля решает следующие задачи:

– обеспечение выдачи команд управления при одной возможной неисправности;

– обеспечение защиты от преждевременной выдачи команд управления на аппаратуру контроля;

– обеспечение работы в полуавтоматическом режиме.

Релейно-контакторные схемы управления имеют ряд преимуществ, таких как гальванически изолированные цепи управления от цепей питания (т. н. «сухой контакт») и управление большими токами (до 3А). Электромагнитные реле устойчивы к броску тока при запуске мощных потребителей, в отличие от электроники, а особенно при внезапном отключении электропитания. Недостатками релейно-контакторной логики являются массогабаритные показатели, контактная коммутация, ограничивающая ее срок службы, искрение, высокое энергопотребление. Эти параметры оказывают большое влияние на исследуемый объект, и с развитием технологий, возникла необходимость модернизировать систему автоматики. Параллельно с развитием исследуемого объекта, происходило увеличение параметров контроля и требования к их точности, что неизменно вело за собой усложнение самой системы.

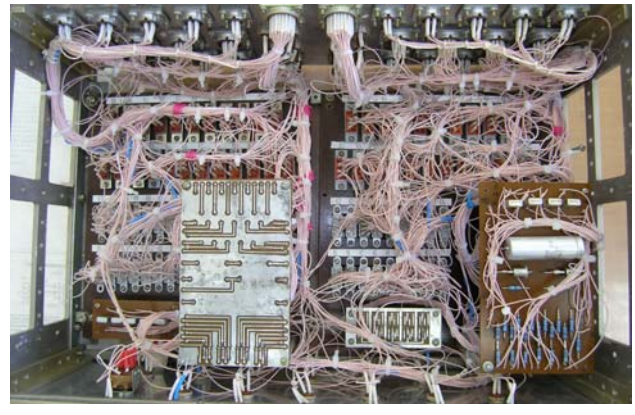


Рис. 1. Устройство, выполненное на релейно-контакторной логике

С середины 70-х годов XX века появляются устройства, собранные на интегральных логических элементах, или, как еще принято называть, интегральные микросхемы (ИМС). Это, в свою очередь, резко сократило энергопотребление, массогабаритные показатели и привело к увеличению функционала и быстродействия системы. Устройства, основанные на ИМС, позволили расширить спектр исследований во всех областях науки и техники. Фотография платы ЭВМ, выполненной на интегральных схемах, представлена на рис. 2. Интегральные микросхемы получили достаточно широкое применение в лабораторном макетировании системы исследования объекта, соответствовали требованиям по защите информации от утечки и преднамеренного воздействия, но практически не были применены на испытательных площадках, так как не отвечали требованиям испытаний по электрическим параметрам и тепловому режиму работы. Кроме того, интегральная микросхема имеет высокую зависимость формы сигналов

выдачи от питающей сети и наводимых электромагнитных помех от различной аппаратуры, если устройство не экранировано. Стоимость системы, собранной на интегральных микросхемах была в 3–5 раз ниже стоимости системы, собранной на релейно-контакторной логике, но вышеописанные проблемы стали причиной отказа от использования данных схем в целом.

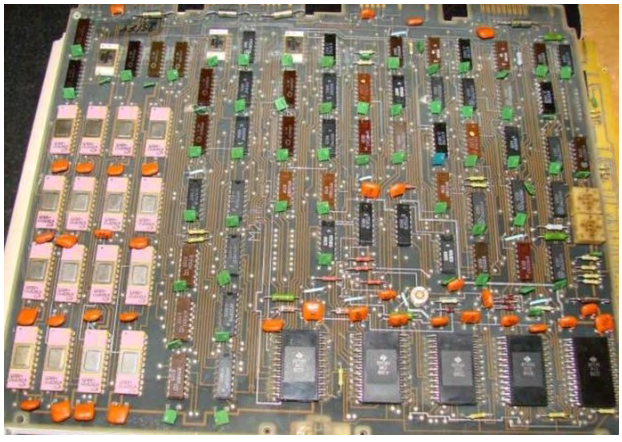


Рис. 2. Плата ЭВМ, выполненная на интегральных микросхемах

На третьем этапе развития электроники произошли изменения, вызвавшие большую модернизацию объекта исследования. Данный этап рассматривается как естественное развитие аппаратуры второго. Научно-техническая революция 60–80-х годов XX века привела к появлению новых типов оборудования: микроконтроллеры, микропроцессоры, программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС), базовые матричные кристаллы (БМК).

Из-за того, что различные системы автоматизации настроены на получение разных параметров, существует большое количество микроконтроллеров, в которых в разной степени коллаборации связаны размеры и стоимость с одной стороны, и гибкость и производительность с другой. Этим объясняется существование широкой номенклатуры микроконтроллеров, отличающихся архитектурой процессорного модуля, размером и типом встроенной памяти, набором периферийных устройств, типом корпуса и т. д. В отличие от микропроцессоров, используемых в компьютерах, в микроконтроллерах часто используется гарвардская архитектура памяти, то есть раздельное хранение данных и команд в ОЗУ и ПЗУ. Фотография микроконтроллера с обвязкой представлена на рис. 3.

Широкие возможности микроконтроллеров позволяют использовать различные устройства под разные задачи. Как правило, их стоимость невысока и они доступны практически каждому разработчику какого-либо оборудования. Невысокая стоимость и широкие возможности позволяют применять устройства, основанные на микроконтроллерах в самых разных областях науки и техники, начиная от сельского хозяйства до авто- и авиастроения. Кроме того, микроконтроллер кроме физической защиты информации имеет возможность криптографической защиты информации для противодействия непреднамеренного воздействия и для противодействия доступа разведки. Отрицательными сторонами использования микроконтроллеров являются сложный подбор оборудования под определённую задачу из-за чрезвычайно широкой номенклатуры со специфичными способами программирования и высокие требования к разработчику программного обеспечения. Низкая надежность из-за наводимых электромагнитных помех приводит к частым сбоям в работе микроконтроллера, а низкое программное быстродействие системы не позволяет использовать данное устройство в высокоточных системах связи и контроля.

Рис. 3. Микроконтроллер с обвязкой

Для выполнения сложных задач, современные системы выдачи и контроля сигналов требуют высокой надежности, точности, а также быстродействия отклика всех узлов. В качестве современного оптимального варианта может использоваться ПЛИС.

ПЛИС – специальные электронные компоненты, используемые для создания цифровых интегральных схем. Логика таких объектов, в отличие от микросхем, не определяется при изготовлении, а определяется посредством проектирования или программирования в специализированном программном обеспечении. Для программирования ПЛИС используются программатор и отладочная среда, позволяющая создать желаемую структуру устройства, основанного на различных языках программирования, таких как AHDL, VHDL, Verilog. По сравнению с другими микроэлектронными технологиями, в том числе и другими классами интегральных схем (ИС), технология ПЛИС обеспечивает рекордно-короткий проектно-технологический цикл (несколько часов/дней), минимальные затраты на проектирование, максимальную гибкость при модификации аппаратуры. При этом весь проектно-технологический цикл выполняется разработчиком РЭА на одном рабочем месте.

В рамках научно-исследовательской деятельности были рассмотрены программируемые логические

интегральные схемы основных зарубежных производителей – Xilinx и Altera. Разработки этих компаний занимают большую часть рынка ПЛИС (более 60 %), поэтому в первых прототипах перспективных устройств связи и контроля были использованы ИС этих фирм. Согласно государственной программе № 320 «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности», Правительством РФ было рекомендовано приступить к плавной замене импортных товаров на элементы, производимые на территории Российской Федерации и Республики Беларусь и прошедшие государственную оборонную комиссию. Результатом этой программы стал запуск тестового производства ИМС нового типа на двух заводах в Российской Федерации. Основным предприятием, выпускающим ПЛИС для оборонной промышленности в Российской Федерации, является АО «Воронежский завод полупроводниковых приборов – сборка», реализующий 8 типов ПЛИС, различающихся между собой количеством логических элементов, количеством пользовательских выводов, технологией программирования и спецстойкостью. Устройства с маркировкой 1Т, 6Т и 7Т включены в перечень ЭКБ, разрешенной для применения при разработке военной и специальной техники.

Сравнение ПЛИС отечественного и зарубежного производства

Наименование	Intel Altera Cyclone V ST	Xilinx Spartan 7	5576ХС4Т
Объем ОЗУ, кбит	5140	4320	98
Типовая логическая емкость, вент.	166036	102400	200000
Количество эквивалентных логических элементов	41509	16000	9984
Количество пользовательских выводов	183(256)	400(512)	171 (256)
Защита от копирования	+	+	+
Технология изготовления	28нм	28нм	28нм

В таблице представлены основные параметры сравнимых по параметрам семейств ПЛИС, производимых на территории РФ и устройств, выпускаемых на заводах Xilinxи Intel (Altera) на июль 2019 года. Все устройства выполнены по технологии 28 нм, но отечественное устройство показывает общую неконкурентоспособность зарубежным устройствам, исключая типовую логическую ёмкость. В частности, это объясняется тем, что устройства, выпускаемые ВЗПП-С, являются функциональным аналогом изделий устаревшей серии EPF10K, производимые фирмой Altera в начале XXI века.

Изделия серии 5576ХС, имеют больший функционал, чем устройства на цифровых микропроцессорах параллельной обработки сигналов. Такие микропроцессоры дороги в обслуживании и не имеют возможности «горячего резервирования» при нештатной ситуации. Кроме того, увеличение контролируемых параметров повлечет за собой увеличение количества микропроцессоров с уменьшением общей надежности устройства. Применение ПЛИС целесообразно при разработке оригинальной аппаратуры, требующей нестандартных схемотехнических решений, а также при проектировании малогабаритных устройств. ПЛИС обычно заменяют на плате от 8–10 до 50–70 корпусов стандартной логики. При этом значительно уменьшаются размеры оборудования, а вследствие сокращения количества ИС снижается потребление схемы и повышается ее надежность. При специальных воздействующих внешних факторах (СВВФ), микропроцессор подвержен несанкционированному изменению состояния ячейки, от чего защищена ПЛИС. Устройства имеют такую уникальную технологическую особенность, как перемычка или бит секретности. Если после программирования ПЛИС ее внутреннюю конфигурацию можно считать и полученный шаблон использовать для тиражирования схемы, то после разрыва бита секретности содержимое ПЛИС становится недоступным для чтения. Благодаря этому, ПЛИС могут применяться в качестве электронного ключа для защиты аппаратных и программных средств от несанкционированного доступа и копирования. Изделия, основанные как на технологии однократного программирования, так и на технологии Flash, имеют защиту от СВВФ и позволяют обеспечить бесперебойную работу устройства в различных климатических условиях.

Рис. 4. Макет узла устройства, собранного на ПЛИС

Однократно программируемая ПЛИС серии 5576ХС – программируемая логическая матрица (ПЛМ) 5576ХС7Т, обеспечивает физическую защиту информации, загруженной в устройство от преднамеренного воздействия и действий разведки. Такое устройство имеет ряд преимуществ перед устройствами на РКЛ, ИС и микроконтроллерах, а именно:

- не требуется дополнительное ПЗУ, устройство готово к работе сразу после подачи питания;

• аппаратное быстродействие системы, не более 20 нс;

• малые массогабаритные показатели с большим количеством логических элементов (до 2000);

• низкое энергопотребление $\left(U_{\text{пит}}^{\text{я}} = 1{,}8\ B,\ U_{\text{пит}}^{\text{п}} = 3{,}3\ B\right)$;

• низкая цена перед устройствами, основанными на РКЛ;

• широкий температурный диапазон работы и стойкость к воздействию специальных факторов.

ПЛИС широко используется для реализации различных цифровых устройств, нуждающихся в высокой скорости и точности:

• цифровая аудио- видеоаппаратура (изготовление цифровых фильтров, схем обработки сигналов и изображений);

• системы телекоммуникации (ПЛИС применяются в аппаратуре уплотнения телефонных каналов, изг. контроллеров шин, адресных дешифраторов и др.);

• моделирование квантовых вычислений (процессоры быстрого преобразования Фурье);

• криптографические устройства. Применение 1–2 ПЛИС средней степени интеграции является достаточным для надежной защиты информации;

• проектирование специализированных больших интегральных схем (СБИС).

ПЛИС широко применяется в стендовом оборудовании, на этапах разработки и производства опытных партий новых изделий, а также для эмуляции схем, подлежащих последующей реализации на другой элементной базе, в частности, БМК.

Процесс отладки ПЛИС и ПЛМ прост для инженера-разработчика систем связи и контроля и не требует пересмотра всей печатной платы с изменением загруженного программного обеспечения, как этого требует микроконтроллер или микросхема. Внутренний набор логических ячеек позволяет быстро переконфигурировать порты ввода-вывода под измененную программу (если устройство позволяет это сделать) без изменения обвязки, что крайне важно на удаленных испытательных площадках. При программировании устройства, согласно стандарту IEEE 1149.1 проходит структурное тестирование печатной платы, называемое периферийным сканированием. Результат омпериферийного сканирования является информация о наличии в электроцепях типичных неисправностей, возникающих при производстве печатных плат: коротких замыканий, непропаек, ошибок при включении (залипаний) на нижний или верхний регистры, обрывов дорожек.

Благодаря большому количеству портов ввода-вывода, доступно увеличение контролируемых параметров, что позволит с высокой точностью управлять объектами и исключить возможность нештатной ситуации. Альтернативой ПЛМ являются более дорогие БМК и СБИС. Фотография макета, собранного на ПЛИС, представлена на рис. 4.

Программируемые логические интегральные схемы, а так же ПЛМ имеют недостатки, аналогичные простым ИС: неустойчивостью к броску тока, а также высокой зависимостью выходного сигнала в неэкранированных устройствах. Кроме того, высокая цена изделия с категорией качества «ВП» определяет отказ от ПЛИС в пользу микроконтроллеров в разработках малых устройств. Отсутствие единого стандарта интерфейса программирования ПЛИС разных компаний-производителей искусственно увеличивает количество разных программ для разработки с одинаковыми функциями, что влечет за собой дополнительные затраты.

В настоящее время в отделении 14 идет разработка конструкторской документации на устройства, реализованные на ПЛИС и ПЛМ для замены устаревшего оборудования на изделия, построенные на современной отечественной элементной базе. По разрабатываемой конструкторской документации был собран макет устройства, основанный на изделии ВЗПП-С 5576ХС1Т. На макете были подтверждены требуемые параметры, выявлены преимущества физического исполнения изделия на ПЛИС перед изделиями, основанными на других типах радиоэлектронной аппаратуры. Расчеты электрических параметров проводились в специализированном программном обеспечении, поставляемые АО КТЦ «Электроника». Результаты расчетов показали, что макет, основанный на ПЛИС, обладает качественно высоким быстродействием по сравнению с предыдущими поколениями устройства контроля и выдачи сигналов.

Технологическое и программное отставание отечественной РЭА вносит определенные сложности в процесс разработки новых устройств. Обратная связь между разработчиками систем, основанных на ПЛИС, позволит увеличить степень интеграции производства с пользователями, что положительно скажется как на технической, так и экономической составляющей проектов.

В дальнейшем, предполагается увеличение количества устройств, используемых в РФЯЦ-ВНИИЭФ, основанных на ПЛИС и ПЛМ отечественного производства.

МЕТОДЫ РАСЧЕТНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДЛИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ

К. А. Лонин, В. А. Панов, В. Л. Патрушев, Д. В. Савчук, С. А. Соловьев, Д. Н. Шишулин

АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород

Введение

При разработке и обосновании прочности механических систем реакторной установки (РУ) с охлаждением перекачиваемой водой, необходимо иметь данные о длительных физико-механических свойствах на требуемый ресурс конструкционных материалов отдельных элементов работающих при температурах, при которых проявляется температурная ползучесть.

Одной из основных характеристик, определяющих прочность и работоспособность конструкции в условии высоких температур и длительном ресурсе, является параметр длительной прочности.

Экспериментальное обоснование длительной прочности элементов оборудования, а также определение механических характеристик и предела длительной прочности для назначенного ресурса, требует большого объема экспериментальных исследований, что оказывается нецелесообразным по экономическим причинам и по причинам безопасности вследствие возможных разрушений деталей.

Поэтому при проектировании важен вопрос о прогнозировании физико-механических характеристик конструкционных материалов путем разработки методики экстраполяции данных лабораторных испытаний материалов, полученных за ограниченное время (не менее одного временного порядка). Методика должна учитывать диапазон рабочих температур, напряжений, время прохождения режима и его цикличность. Проводимое прогнозирование значений физико-механических характеристик на значительно большее время должно предполагать достоверность последующей оценки прочности и ресурса изделий в эксплуатационных условиях.

Целью работы является выбор методики и прогнозирование значений длительных механических свойств конструкционных материалов механических систем РУ для расчетного обоснования прочности и назначенного ресурса.

Особенности конструкции

В процессе эксплуатации системы РУ на конструкцию влияют следующие факторы: разнородность конструкционных материалов с различными физико-механическими свойствами, высокий уровень напряжений в элементах, высокий назначенный ресурс системы, и высокая рабочая температура.

Механизмы разрушения при ползучести

Проблема экстраполяции данных кратковременных испытаний на длительную временную базу может решаться только на основе физически обоснованных методов преобразования экспериментальных кривых зависимости времени до разрушения от напряжения одноосного растяжения при некоторых базовых температурах к единой приведенной кривой длительной прочности. При этом необходимо учитывать изменение типов механизмов накопления повреждений в зависимости от уровня температур и величины напряжений.

В настоящее время экспериментально установлено несколько типов механизмов накопления повреждений в металлических конструкционных материалах при ползучести:

– внутризеренное накопление повреждений и разрушение (рис. 1) при высоких напряжениях, соответствующее малым долговечностям: десятки часов при высокой температуре, сотни часов при невысокой температуре;

– межзеренное накопление повреждений в виде клиновидных трещин (рис. 2) при средних напряжениях, соответствующих долговечности порядка сотен часов при высокой температуре и тысяч часов при низких температурах;

– межзеренное накопление повреждений в виде зарождения, развития и слияния пор при невысоких напряжениях и температурах, соответствующих долговечности от 10^5 до 10^6 ч;

С увеличением температуры происходит смещение зоны интеркристаллитного разрушения в сторону меньших долговечностей. Эта закономерность положена в основу известных параметрических методов экстраполяции длительной прочности таких, как методы Ларсона – Миллера, Мэнсона – Хаферда, Орра-Шерби-Дорна, Мэнсона – Бровнаи др.

Используя эти методы, в экспериментах на длительную прочность механизма при достижении накопления повреждений в виде межзеренного зарождения, развития, роста и слияния пор, реализуемых в эксплуатационных условиях, можно выполнить экстраполяционные расчеты на практически необходимые назначенные сроки службы конструктивных

Рис. 1. Внутризеренное накопление повреждений и разрушение

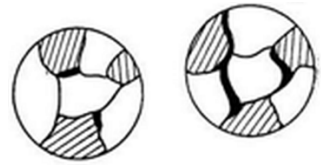


Рис. 2. Межзеренное накопление повреждений в виде клиновидных трещин

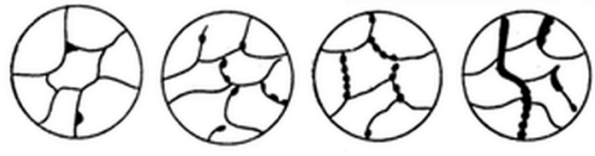


Рис. 3. Межзеренное накопление повреждений в виде зарождения и слияния пор

элементов до 10^6 ч., определив характерные для каждого метода параметры.

Параметр Ларсона – Миллера

Параметр Ларсона – Миллера рассчитывается по формуле:

$$P(\sigma) = T \cdot \left(C + \ln t_f\right), \qquad (1)$$

где T – абсолютная температура материала, K;

t_f – продолжительность нагружения (от начала нагружения до разрушения), ч.;

C – постоянная(определяется для каждого конкретного материала).

Численные значения C определяют по экспериментальным данным для двухуровней температур.

Считается, что параметр Ларсона – Миллера можно применять и для аппроксимации кривых, соответствующих заданному постоянному значению деформации ползучести, в основном соответствующему окончанию второго участка кривой ползучести.

Параметр Орра – Шерби – Дорна

Функциональная зависимость между временем до разрушения, температурой и параметром по методу Орр – Шерби – Дорна выражается формулой:

$$P(\sigma) = \lg t - \frac{D}{T}, \qquad (2)$$

где D – постоянная (характеризует угол наклона параллельных прямых одинаковых уровней напряжений в координатах «логарифм времени – обратная температура»).

Параметр Мэнсона – Хаферда

Для длительной прочности параметр Мэнсона – Хаферда рассчитывается по формуле:

$$P = \frac{T - T_a}{\ln t - \ln t_a}, \qquad (3)$$

где T_a , t_a – постоянные, определяемые как координаты точки-полюса, вкоторой пересекаются прямые линии одинаковых значений напряжений(в координатах $\ln t - T$).

Точка пересечения является случайной, поэтому получаемые решения в отдельных случаях более достоверны.

Параметр Мэнсона – Хаферда отличается удобством использования при большом объеме экспериментальных данных.

Параметр Мэнсона –Бровна

Параметр Мэнсона – Бровна рассчитывается по формуле:

$$P(\sigma) = \frac{\ln t - \ln t_a}{\left(|T - T_a|\right)^R}, \qquad (4)$$

R – учитывает форму кривых одинаковых значений напряжений в координатах $\ln t - T$ ($R < 0$ – кривые вогнутые, $R > 1$ кривые выпуклые).

Модифицированное соотношение Дорна

В работах [1–2], на основе обработки экспериментальной информации о ползучести для широкого класса конструкционных материалов, показано, что экспериментальные кривые длительной прочности могут быть описаны единой зависимостью, являющейся обобщением соотношения Дорна:

$$\lg t_* = 9T_*/T + f\left(\sigma \cdot 10^{-0{,}525T_*/T}\right),$$
$$f = A - sh\left[a\left(\sigma \cdot 10^{-0{,}525T_*/T}\right)\right]^q. \quad (5)$$

где σ– напряжение при одноосном растяжении образца;

T – абсолютная температура материала, K;

T_* – некоторая критическая температура, K;

t_* – продолжительность нагружения (время до разрушения);

A, a, q – экспериментально определяемые параметры материала.

Экспериментальные результаты могут быть описаны единой зависимостью во всем диапазоне температур и напряжений (экспериментальные кривые длительной прочности могут быть приведены к некоторой фиксированной температуре $T_{\text{пр}}$), если принять соотношение:

$$\lg t_{*\text{пр}} = 9T_*/T_{\text{пр}} + A - sh[a]\left(\sigma_{\text{пр}} \cdot 10^{-0{,}525T_*/T_{\text{пр}}}\right)^q.$$

Параметрические методы прогнозирования

Прогнозирование механических характеристик по представленным методам возможно не более чем на 1–1,5 порядка по времени относительно экспериментальной базы.

Значения расчетной дисперсии S^2 и корреляционного отношения p для описания температурно-временными зависимостями характеристик сопротивления многоцикловой усталости жаропрочных никелевых сплавов приведены в таблице.

Результаты расчетных работ

Используя модифицированный метод Дорна для материала Бр.КН1-3, была проведена экстраполяция длительных механических свойств на требуемую базу – 10000 ч на основе лабораторных испытаний, полученных на базе до 1000 ч.

Определены напряжения и температура испытаний с обоснованием неизменности механизма разрушения.

Проведены экспериментальные исследования при выбранных значениях времени разрушения, напряжений и температуры

Обработаны экспериментальные результаты и определены параметры, входящие в уравнения (6).

Проведена проверка адекватности выбранных критериев и экспериментально определенных параметров путем сравнения расчетной и имеющейся экспериментальной информации. Сравнение расчетных значений кривой длительной прочности и экспериментально полученных данных, показало, что погрешность в определении напряжения разрушения по использованному соотношению составляет около ~10 %, что является удовлетворительным результатом.

Построены кривые длительной прочности для материала Бр. КН1в координатах $\lg\sigma_{\text{пр}} - \lg t_{\text{пр}}$ (рис. 4) и в координатах $\sigma_{\text{пр}} - t_{\text{пр}}$ (рис. 5).

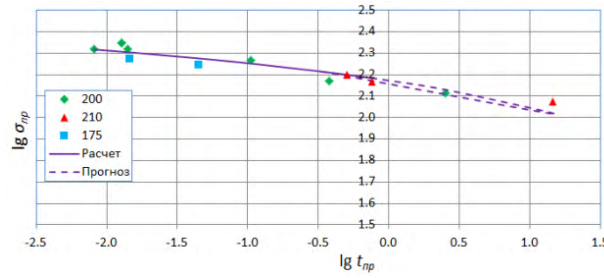


Рис. 4. Кривые длительной прочности для материала Бр. КН1

Температурно-временные зависимости характеристик сопротивления многоцикловой усталости

№ п/п	Марка сплава	T, K	Диапазон долговечностей, цикл, ч.	Вид и частота нагружения, Гц	Кол-во экспериментальных точек	Зависимости					
						Ларсона – Миллера		Шерби – Дорна		Мэнсона – Бровна	
						$\hat{s}^2$	ρ^2	$\hat{s}^2$	ρ^2	$\hat{s}^2$	ρ^2
1	ЭИ867	873, 1073, 1173, 1223, 1273	$10^5 - 10^8$ $\left(1 - 10^3\right)$	Растяжение – сжатие, 35	79	0,296	0,616	0,557	0,742	0,518	0,773
2	ВЖЛ12У	873, 1073, 1173, 1273, 1373	$10^4 - 3\cdot10^7$ $(0{,}1 - 250)$	Растяжение – сжатие, 35	85	0,46	0,60	0,45	0,62	0,39	0,65

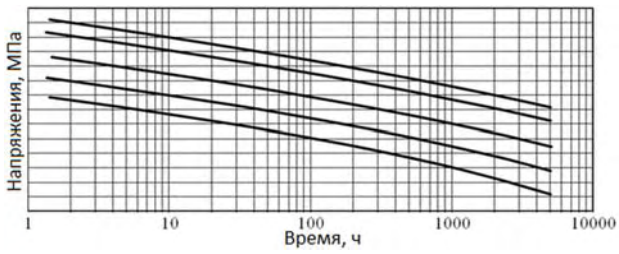


Рис. 5. Кривые длительной прочности
для материала Бр. КН1

Заключение

Использование параметрических методов прогнозирования длительных механических свойств позволяет значительно сократить объем экспериментальных исследований, что выгодно в экономическом плане.

Результаты исследований показали, что использованный метод прогнозирования длительных механических свойств материала Бр.КН1-3 можно применять в дальнейшей работе.

Литература

1. Аршакуни А. Л. К выбору температурных зависимостей длительной прочности жаропрочных металлических материалов // Изв. вузов. 1987. № 6. С. 18–21.

2. Шестериков С. А., Аршакуни А. Л., Чередеева Л. В. Метод температурно-силового прогнозирования длительной прочности металлов // Проблемы прочности. 1989. № 9. С. 6–9.

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МИКРОПОЛОСКОВЫХ СИММЕТРИРУЮЩИХ ТРАНСФОРМАТОРОВ МАРШАНДА С РАЗВЯЗЫВАЮЩИМИ ЦЕПЯМИ

Е. А. Михалицын, А. Ю. Седаков

Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю. Е. Седакова», г. Нижний Новгород

Введение

Симметрирующий трансформатор (СТ) (на англ. «*balun*» – «*balanced-unbalanced converter*») – пассивный компонент, осуществляющий преобразование небалансного сигнала на входе к двум балансным сигналам смещенным по фазе на 180º.

СТ Маршанда [1] отличается широкополосными свойствами и может быть изготовлен в микрополосковом исполнении [2], что позволяет широко применять его при построении СВЧ модулей и систем дециметрового диапазона длин волн, выполненных по гибридной технологии. Блок схема топологии симметрирующего трансформатора Маршанда на тройных связанных линиях показана на рис. 1а. Он состоит из двух секций четвертьволновых ассиметричных связанных линий, которые обеспечивают дифференциальный выходной сигнал. Противофазные сигналы на выходах образуются в результате, того что на первую и вторую ячейку связанных линий воздействуют волны входного напряжения противоположной полярности. Такая форма напряжения обусловлена режимом холостого хода на конце полуволновой входной (центральной) линии. Применение топологии с тремя, а не с двумя как в традиционном варианте СТ Маршанда, связанными линиями приводит к увеличению коэффициента связи и расширению полосы рабочих частот.

Одним из основных недостатков СТ Маршанда является невозможность согласования всех портов устройства на стандартные пятидесятиомные нагрузки, поскольку известно, что трехпортовое взаимное устройство без активных потерь не может быть абсолютно согласовано [3]. Другой не менее важный недостаток – развязка балансных выходов невелика: 4–8 дБ, что негативно сказывается на стабильности балансных усилителей мощности. Добавление развязывающей цепи [4] между балансными выходами трансформатора Маршанда позволяет преодолеть указанные недостатки и улучшить рабочие характеристики СВЧ модулей за счет применения компонентов со стандартным пятидесятиомным сопротив-

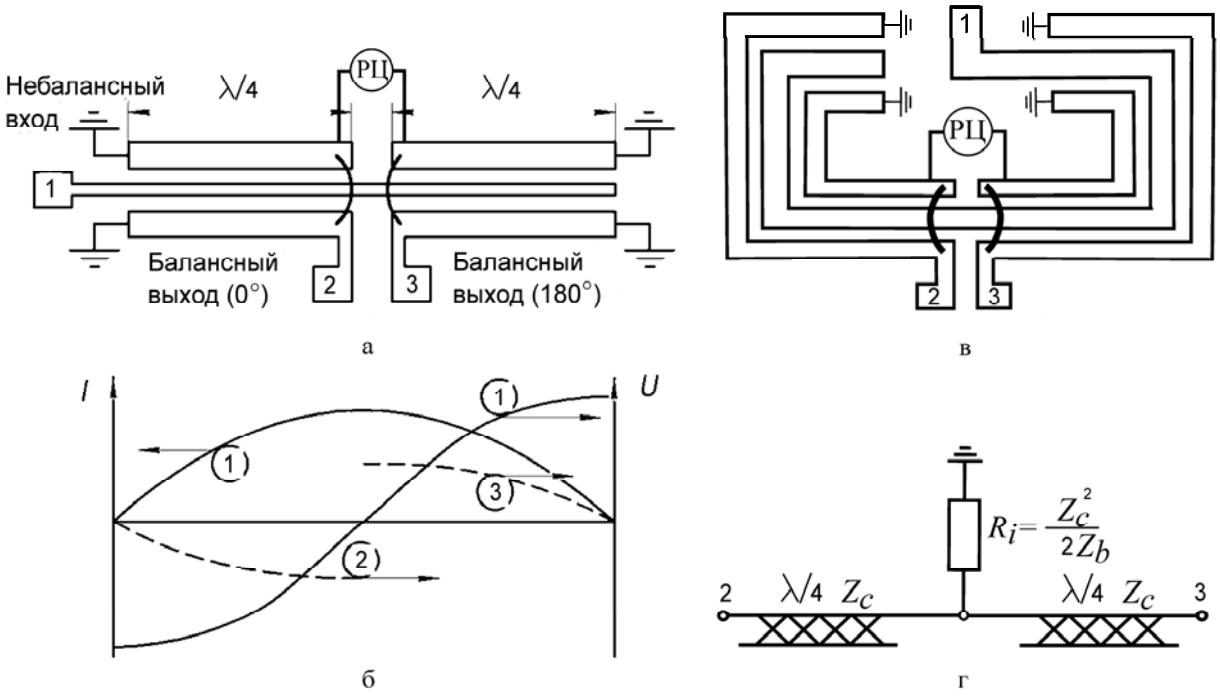
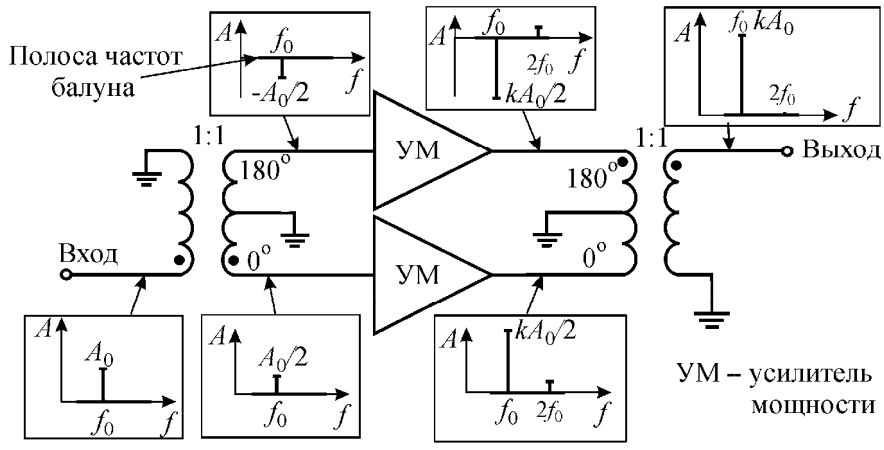


Рис. 1. СТ Маршанда: а – структурная схема, б – распределение волн тока и напряжений, в – Ω-образная топология, г – Т-образная топология РЦ



а

б

Рис. 2. Структурные схемы СВЧ модулей: а – балансного усилителя мощности, б – фазовращателя

лением и, как следствие, приводит к минимизации влияния балансных каналов распространения сигнала друг на друга. На рис. 2 показаны структурные схемы построения фазовращателя и балансного усилителя с подавлением интермодуляционных искажений второго порядка и второй гармоники на основе симметрирующего трансформатора Маршанда с развязывающей цепью (РЦ). Чем шире полоса рабочих частот, тем подавление продуктов интермодуляционных искажений более высокого порядка имеет место в балансном усилителе мощности.

В инженерной практике проектирования микрополосковых устройств на связанных линиях наиболее часто применяются подходы, основанные на схемно-топологическом моделировании и электромагнитном анализе 3D-структур с помощью сеточных методов в различных САПР СВЧ устройств. Такой подход может быть очень трудоемким, в силу значительных временных затрат на тюнинг топологических размеров.

В докладе рассматриваются некоторые интегральные характеристики симметрирующих трансформаторов Маршанда с развязывающей цепью, предварительный аналитический расчет которых позволяет повысить эффективность проектирования. Общие принципы конструирования СТ Маршанда без развязывающей цепи в определенной степени представлены в зарубежной научно-технической литературе [5–7]. К специфическим особенностям проектированиям СТ Маршанда с развязывающей цепью можно отнести:

– зависимость полосы рабочих частот от коэффициента связи имеет максимум при заданном уровне развязки;

– относительная величина фазовых скоростей распространения собственных волн эквивалентных асимметричных связанных линий задается геометрией связанных линий и определяет разбаланс фаз и амплитуд;

– расширить полосу можно введением реактивности в нагрузку РЦ.

В докладе представлены результаты учета указанных особенностей при проектировании «свернутой» конструкции СТ Маршанда (рис. 1в) с Т-образной развязывающей цепью, представленной на рис. 1г. Такая топология развязывающей цепи обеспечивает симметрию плеч, фазовый сдвиг на центральной частоте в 180º, и вводит активные потери, позволяющие обеспечить развязку и согласование балансных портов. Материал подложки – Rogers TMM 10*i* с диэлектрической проницаемостью 10. Расчеты коэффициента связи, соотношения фазовых скоростей и параметров микрополосковых линий РЦ проводятся с применением разработанной математической модели СТ Маршанда. В докладе отмечаются результаты применения математической модели и экспериментальные результаты исследования макета устройства.

Расчет коэффициента связи

На рис. 3а показана структурная схема трех связанных микрополосковых линий, составляющих СТ Маршанда. Полную ширину структуры полагаем меньше одной десятой длины волны в диэлектрике подложки. В этом случае электрические связи на краях внешних микрополосковых линий позволяют рассматривать эквивалентную модель двух ассиметричных микрополосковых линий (рис. 3б). Утверждение поясняется рис. 4

Поперечное сечение структуры показано на рис. 4а, схемная модель с погонными параметрами – на рис. 4б.

На рисунке C_m – погонная взаимная емкость связи между двумя соседними микрополосковыми линиями на диэлектрической подложке в присутствии всех остальных линий и земляной плоскости, $C_{s1,2}$ -погонные собственные емкости микрополосковых линий на землю в присутствии всех остальных линий. Для продольно однородных связанных линий, электрически связанных на концах короткими перемычками через одну, емкостью связи с несмежными полосковыми линиями можно пренебречь. Тогда исходная модель упрощается (рис. 4в) и сводится к двухпроводной модели (рис. 4г). Коэффициент связи эквивалентных микрополосковых линий рассчитывается по формуле:

$$k = \frac{C_m^{eq}}{\sqrt{C_{s1}^{eq} C_{s2}^{eq}}} = \frac{\sqrt{2} C_m}{\sqrt{C_{s1} C_{s2}}}. \qquad (1)$$

т. е. в $\sqrt{2}$ раз больше, чем для классического СТ Маршанда на двух асимметричных связанных микрополосковых линиях.

Расчет области минимальной разности фазовых скоростей

Погонные параметры C_m, $C_{s1,2}$ рассчитываются по приближенной инженерной методике [8] и од-

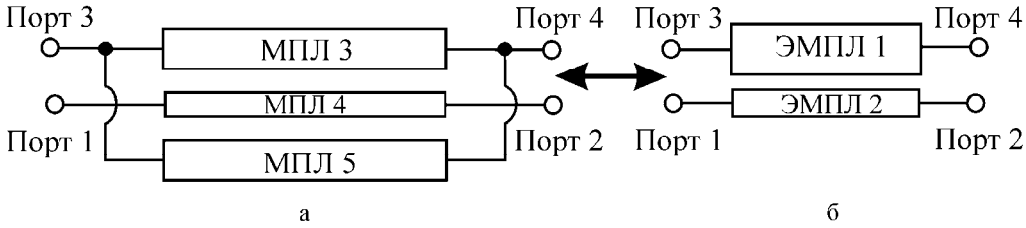


Рис. 3. Модель трехпроводниковой структуры асимметричных связанных микрополосковых линий (МПЛ): а – структурная схема, б – эквивалентная двухпроводниковая модель с эквивалентными микрополосковыми линиями (ЭМПЛ)

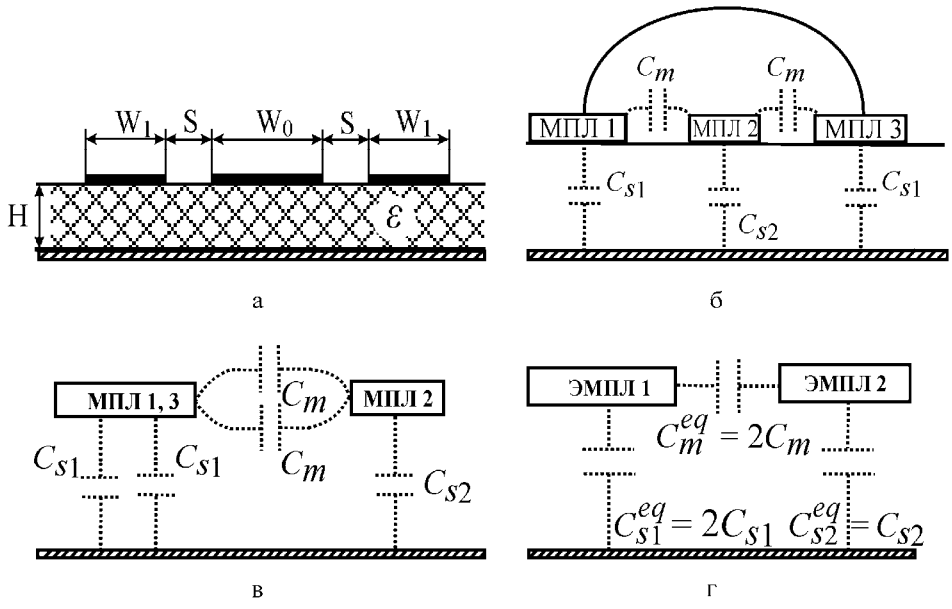


Рис. 4. Сечение трехпроводниковой структуры асимметричных связанных линий: а – геометрическая модель, б – сечение с электрическими параметрами, в – поясняющая двухпроводная модель, г – эквивалентная модель

нозначно задают электромагнитные свойства двухпроводных микрополосковых связанных линий. По ним определяются фазовые скорости распространения квази-поперечных *c*- (аналог четной) и π-волн (аналог нечетной волны): v_c и v_π, а также отношения возбуждающих каждую линию напряжений для соответствующих собственных возбуждений: R_c и R_π [9]. Физическую сущность *c*- и π- собственных волн поясняет рис. 5. На рисунке показан пример распределения напряженности электрического поля трехпроводной микрополосковой линии для *c*- (рис. 5а) и π- (рис. 5б) собственных возбуждений.

Для выбранной диэлектрической проницаемости материала подложки существует область изменения геометрических размеров топологии связанных линий, для которой разница фазовых скоростей *c*- и π-волн будет минимальна. В этой области коэффициенты емкостной и индуктивной связи приблизительно равны, и эффективный коэффициент связи [6] $k = 2\sqrt{R_c R_\pi}\,/\,(R_c + R_\pi)$. Чтобы $k \in \Re$ должны выполняться неравенства:

$$R_c > 0 \text{ и } R_\pi > 0, \qquad (2).$$

Условия (2) являются основными для предварительных инженерных оценок топологических размеров W_1, W_0, S, H.

Важным аспектом выбора толщины подложки H, ширины центральной микрополосковой линии W_0 и зазора S является необходимость обеспечения волнового сопротивления копланарного волновода, образованного тремя микрополосковыми линиями сзаземленными внешними и земляной плоскостью, близким к 50 Ом. Учет этой особенности проектирования позволяет обеспечить согласование входного порта (см. рис. 1а).

На рис. 6 представлены графики зависимости коэффициента связи и относительной разности фазовых скоростей $u = [v_\pi - v_c]/[v_\pi + v_c]$ от ширины

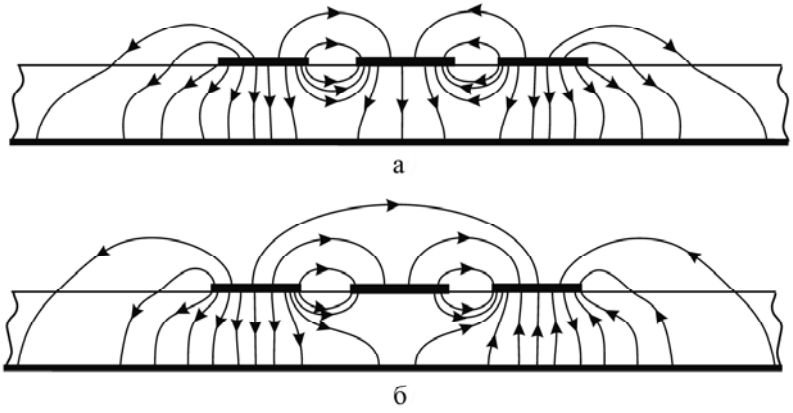


Рис. 5. Распределение напряженности электрического поля: а – с-волны, б– π-волны

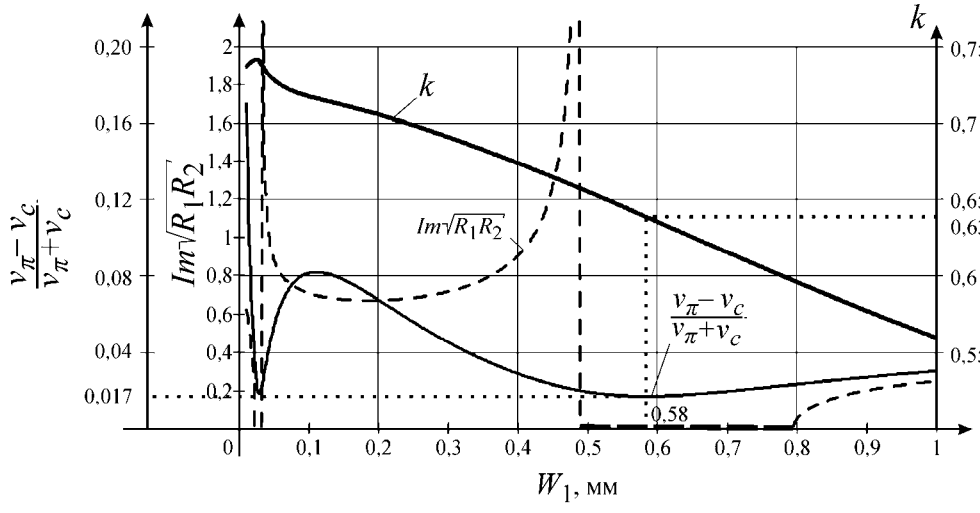


Рис. 6. Относительная разность фазовых скоростей и коэффициент связи структуры трех связанных линий в зависимости от ширины внешних МПЛ

внешней микрополосковой линии. Волновое сопротивление копланарного волновода 48 Ом. Из двух диапазонов выполнения условия (2), в которых $\mathrm{Im}\sqrt{R_c R_\pi} \equiv 0$, более приемлема с технологической точки зрения область значений $W_1 = 0{,}48\ldots0{,}79$ мм. Минимальное значение $u = 0{,}017$ достигается при $W_1 = 0{,}58$ мм, коэффициент связи $k = 0{,}63$.

Полоса рабочих частот

Для согласованного по всем портам СТ Маршанда с одинаковыми коэффициентами емкостной и индуктивной связи матрица рассеяния определяется в виде:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{21} & S_{31} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{23} & S_{33} \end{bmatrix}, \qquad (3)$$

где $S_{21} = \dfrac{xy(x^2 e^{-j4\theta u} - y^2 - z^2)e^{j\theta u}}{z^2(z^2 + y^2)}$,

$S_{31} = -\dfrac{xy(x^2 - y^2 - z^2)e^{-j\theta u}}{z^2(z^2 + y^2)}$, $S_{23} = \dfrac{y^2(z^2 + y^2 - x^2)}{z^2(z^2 + y^2)}$,

$x = \sqrt{1 - k^2}$, $y = jk\sin\theta$, $z = \sqrt{1 - k^2}\cos\theta + j\sin\theta$,

$\theta = \dfrac{\theta_c + \theta_\pi}{2}$ – электрическая длина связанных линий, линейно зависящая от частоты.

Матрица рассеяния задается в терминах падающих и отраженных волн мощности. С физической точки зрения элемент матрицы рассеяния $|S_{nm}|^2$ определяет ту часть мощности падающей *нат*-ый порт волны, которая выходит из *n*-го порта при условии согласования всех других портов. Аргумент $\angle(S_{nm})$ определяет фазу сигнала. Приняты следующие определения $|S_{11}|$, $|S_{22}|$, $|S_{33}|$ – возвратные потери соответствующих портов, $|S_{21}|$ и $|S_{31}|$ – прямые потери сигнала со входа на соответствующий выход, $|S_{23}|$ – развязки балансных портов. Для идеального согласованного устройства с РЦ $|S_{11}| = 0$, $|S_{22}| = 0$, $|S_{33}| = 0$, $S_{21} = 1/\sqrt{2}$, $S_{31} = -1/\sqrt{2}$, $S_{23} = 0$.

При $u = 0$ плечи СТ Маршанда имеют идентичные характеристики, сдвиг фазы равен точно 180°. На практике $u \neq 0$ и, чем больше u, тем больше разбаланс фаз и амплитуд. На рис. 7 приводятся аналитически рассчитанные амплитудно-частотные характеристики СТ Маршанда с $k = 0{,}64$, $u = 0{,}02$, $R_i = 50$ Ом, $Z_c = 71$ Ом.

Влияние неравенства фазовых скоростей собственных волн можно снивилировать введением компенсирующих реактивных элементов [8]. Для рассматриваемой конструкции СТ Маршанда удобно использовать компенсацию в нагрузке развязывающей цепи – последовательная с резистором индуктивность. Оптимизация величины комплексного сопротивления нагрузки для обеспечения максимальной полосы рабочих частот проводилась симплекс методом. Результаты представлены на рис. 8, где отображены графики зависимости относительной полосы от коэффициента связи при соответствую-

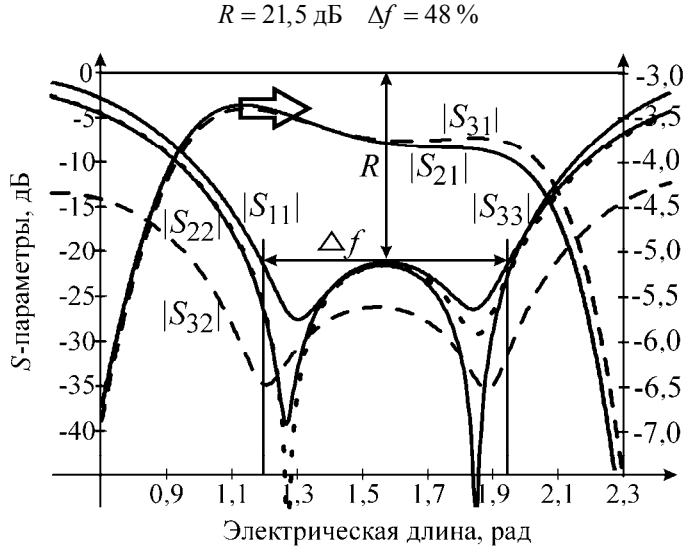


Рис. 7. S-параметры СТ Маршанда

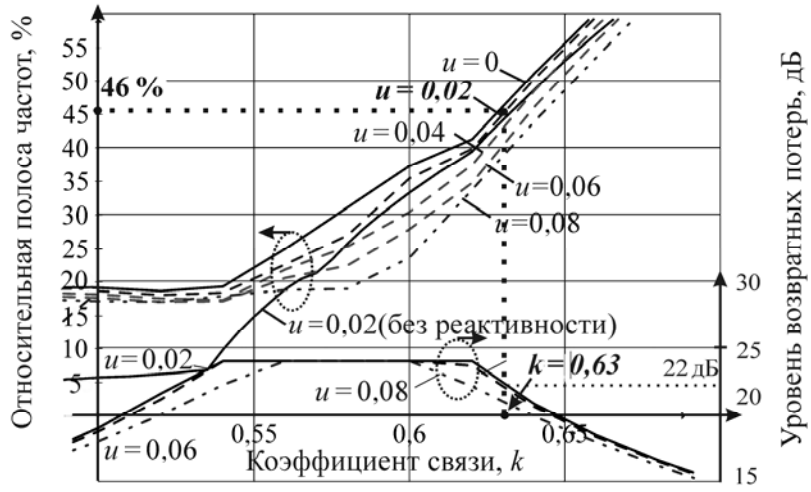
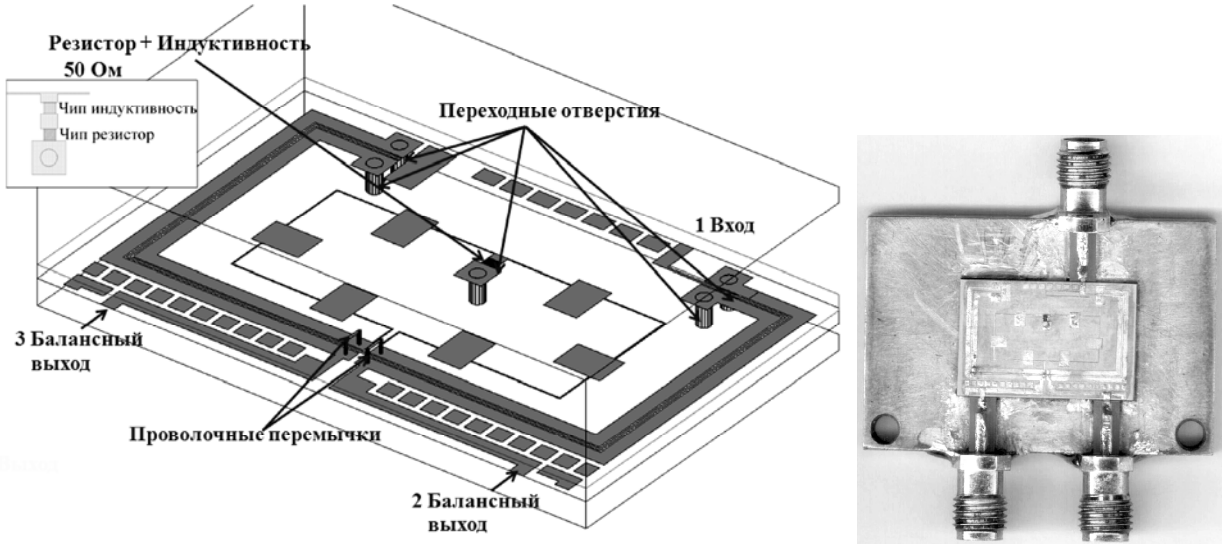


Рис. 8. Зависимость относительной полосы рабочих частот при различных значениях коэффициента связи k и параметра u



а б

Рис. 9. СУ Маршанда: а – 3D-модель, б – фото макета

щем уровне возвратных потерь и развязок при различных u. Наиболее широкополосное устройство по уровню 20 дБ имеет место для $u = 0,02$ при $k = 0,64$. СТ Маршанда с коэффициентом связи менее 0,53 с реактивной нагрузкой могут обеспечить полосу рабочих частот не превышающую 20 %, тогда как без реактивности – не более 8 %. При $k > 0,65$, на фоне увеличения полосы, соответствующий уровень возвратных потерь уменьшается, что не во всех приложениях приемлемо.

Согласно приведенному графику, рис. 8, предельно достижимая полоса рабочих частот при рассчитанных оптимальных размерах геометрии равна 46 % на уровне 22 дБ развязок и возвратных потерь (комплексный импеданс нагрузки R_i = 52+1,5j Ом). Без реактивности предельная полоса на 2 % меньше.

Инженерное проектирование СТ Маршанда с развязывающей цепью

Фото макета разрабатываемого устройства и рисунок топологии представлены на рис. 9. Габариты платы: 20×12,8×0,5 мм^3. Центральная частота 1,35 ГГц. Материал подложки – Rogers TMM10i. Четвертьволновые отрезки микрополосковых линий развязывающей цепи заменены эквивалентной схемой из трех Т-образных звеньев с микрополосковыми шлейфами. Электрическая длина последовательных микрополосковых линий $\theta_s = 21°$, волновое сопротивление Z_s = 104 Ом, что соответствует ширине 0,05 мм и длине 5,4 мм. Электрическая длина открытого шлейфа $\theta_p = 6,9°$, волновое сопротивление Z_p = 33 Ом, ширина микрополоска 1 мм, его

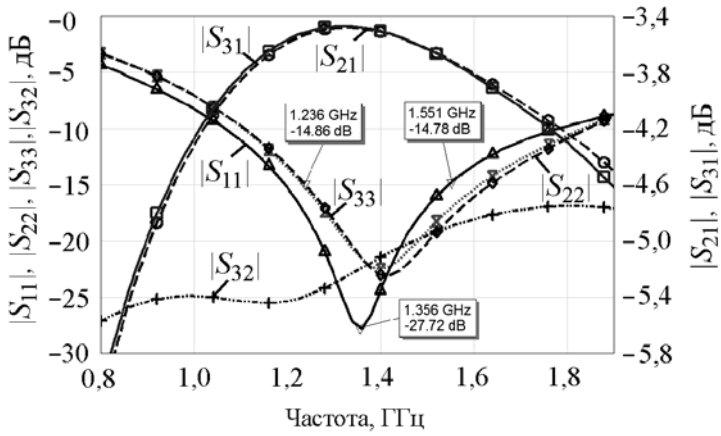


Рис. 10. Результаты 2.5D-электромагнитного моделирования

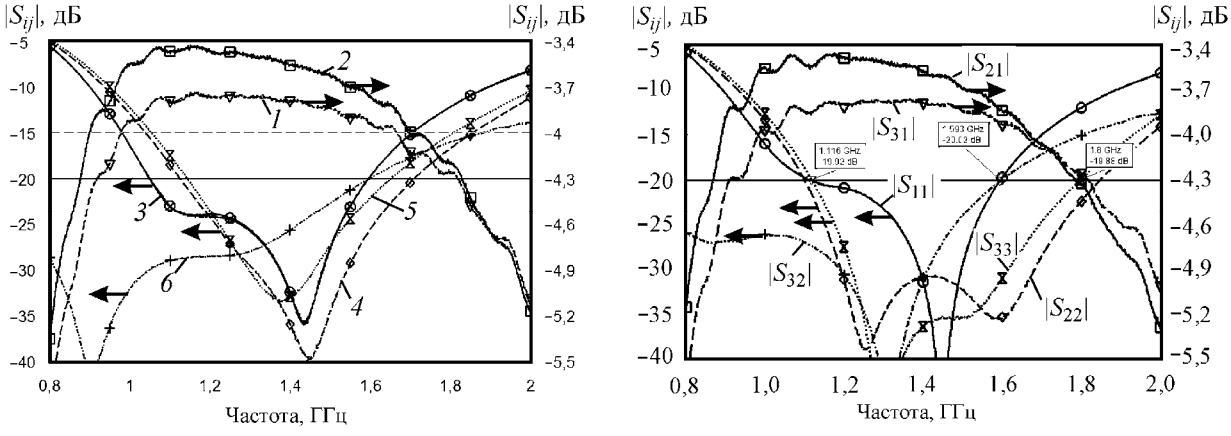


Рис. 11. Измеренные частотные характеристики СТ Маршанда: а – без последовательной индуктивности, б – с индуктивностью 1 нГн

длина 1,6 мм. Нагрузочное сопротивление развязывающей цепи R_i = 51 Ом.

Результаты электродинамического моделирования частотных характеристик представлены на рис. 10, экспериментальные результаты – на рис. 11. Частотная зависимость разбаланса амплитуд ($20\log(|S_{21}|/|S_{31}|)$) и разбаланса фаз $\left(\angle S_{21} - \angle S_{31} - 180^\circ\right)$ показаны на рис. 12 для результатов эксперимента и моделирования.

Из приведенных данных следует, что частотные характеристики |S21| и |S31| и |S22| и |S33| практически совпадают, что подтверждает оптимальность выбранных величин геометрических размеров связанных линий. Запайка индуктивности 1 нГн последовательно с нагрузочным резистором позволила увеличить полосу рабочих частот на 30 МГц (рис. 11б) в сравнении с характеристиками без индуктивности (рис. 11а) и увеличила максимальный уровень возвратных потерь до 43 дБ и развязок до 63 дБ. Полоса рабочих частот увеличилась с 33 % до 37 % по уровню 20 дБ. Появился двугорбый характер зависимости согласования по выходам, и полоса частот по выходным возвратным потерям увеличилась до 46 %, что полностью соответствует теоретически рассчитанным данным.

Основные результаты работы сведены в таблицу. Как следует из представленных данных, улучшение характеристик согласования и развязок в эксперименте в сравнении с моделированием имеет место за счет некоторого ухудшения разбаланса фаз и амплитуд. Можно отметить, что при этом уровень подавления синфазной составляющей в полосе рабочих частот в эксперименте составил величину более 30 дБ.

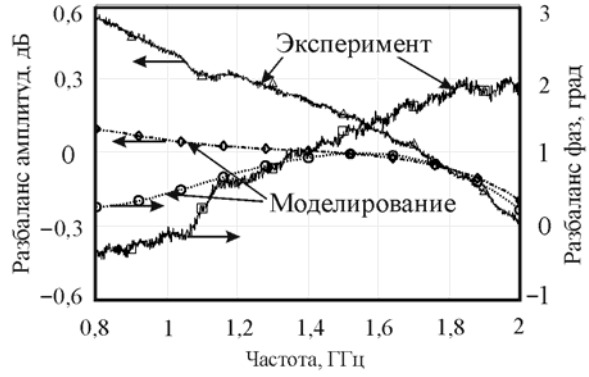


Рис. 12. Характеристики амплитудно-фазового разбаланса

Основные рабочие характеристики

Характеристика	Расчет	Моделирование	Эксперимент	
			L = 0 нГн	L = 1 нГн
КСВн	1,16	<1,5	<1,2	<1,2
Полоса рабочих частот, ГГц (%)	46	22	33	37
Прямые потери дБ	<3.1	<3.7	<3.9	<3.9
Разбаланс фаз, град	0,1	0,6	2,3	1,3
Разбаланс амплитуд, дБ	0,7	0,04	0,3	0,3
Развязка, дБ	>22	>18	>20	>20

Выводы

1. Выбранные геометрические размеры топологии связанных линий обеспечивают минимальный разбаланс плеч симметрирующего устройства, что получило подтверждение в ходе моделирования в САПР.

2. Теоретически обоснована величина выбранного коэффициента связи, который обеспечивает предельную полосу рабочих частот $\Delta f = 46\,\%$ по уровню R = 22 дБ, с учетом технологического запаса 2 дБ: k = 0,63.

3. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность расширения полосы рабочих частот при введении реактивной составляющей в импеданс нагрузки развязывающей цепи.

4. Изготовленный макет СУ Маршанда обеспечивает полосу рабочих частот 37 % по уровню возвратных потерь и развязок равному 20 дБ с прямыми потерями не хуже 3,9 дБ, с отклонением фазы от 180º не более, чем на 1,3º, и разбалансом амплитуд 0,3 дБ (индуктивность в развязывающей цепи 1 нГн).

Литература

1. Marchand N. Transmission-line Conversion Transformers // Electronics. 1944. Vol. 17. P. 142–146.

2. Pozar D. M. Microwave Engineering, 2-nd ed. Hoboken. NJ: Wiley. 1998.

3. Ng C. Y., Chongcheawchamnan M., Robertson I. D. Analysis and design of a high-performance planar Marchand balun // IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig., Jun. 2002, Vol. 1. P. 113–116.

4. Ahn H.-R., Itoh T. New Isolation Circuits of Compact Impedance-Transforming 3-dB Baluns for Theoretically Perfect Isolation and Matching // Transactions on MTT, Dec. 2010, Vol. 58, N 12. P. 3892–3902.

5. Ahn H.-R., Nam S., New Design Formulas for Impedance-Transforming 3-dB Marchand Baluns // IEEE Transactions on MTT, Nov. 2011. Vol. 59, N 11. P. 2816–2823.

6. Sachse K. The Scattering Parameters and Directional Coupler Analysis of Characteristically Terminated Asymmetric Coupled Transmission Lines in an Inhomogeneous Medium // IEEE Trans. Microwave Theory-Tech. April 1990.Vol. MTT-38. P. 417–425.

7. Montiel C. M. Folded Planar Marchand Balun With Improved Isolation for Radio Frequency Automated Test Equipment Applications. Texas , Aug. 12–15, 2012.

8. Phromloungsri R., Chongcheawchamnan M., Robertson I. D. Inductively Compensated Parallel Coupled Microstrip Lines and Their Applications // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 2006. Vol. MTT-54, N 9. P. 3571–3582.

ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ 3D-ПЕЧАТИ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

С. Б. Мухачева, В. П. Леушев, А. В. Иванов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Одним из необходимых условий выпуска сложных надежных устройств радиоэлектронной аппаратуры является производство качественных многослойных печатных плат (МПП).

Весной 2019 г. на ежегодной выставке электроники, электронных компонентов и технологического оборудования «ЭкспоЭлектроника», предприятием Остек-Сервис-Технология г. Москва был продемонстрирован первый 3D-принтер, использующий аддитивную технологию изготовления прототипов МПП (ПМПП).

3D-печать ПП – это процесс послойного создания физического объекта по цифровой 3D-модели.

3D-печать ПП отличается от стандартного процесса создания МПП, он основан на использовании материалов, специально разработанных для аддитивных технологий в производстве электроники.

ПМПП – это опытный образец, предназначенный для проверки схемотехнического решения, не обязательными свойствами которого являются требования к условиям эксплуатации изделия, механическим факторам и факторам внешнего воздействия.

На сегодняшний день подразделение РФЯЦ-ВНИИЭФ приобретает МПП на сторонних производствах, либо изготавливает на собственном производстве.

Изготовление МПП на стороннем производстве занимает до 3 месяцев, имеет ограниченный контроль качества, при изготовлении используются материалы иностранного производства.

Создание собственного производства предполагает постоянные затраты: покупка дорогостоящего оборудования, его обновление для поддержания современного технологического уровня процесса производства, необходимость обслуживания участка.

Однако длительность изготовления прототипов двухсторонних, многослойных, гибко-жестких ПП на 3D-принтере сократится до нескольких часов.

Для этого необходимы: 3D-принтер, токопроводящие и токонепроводящие чернила, прикладное программное обеспечение.

В докладе представлены результаты исследования изготовления многослойных печатных плат, особенности применения 3D-принтера, достоинства и недостатки 3D-печати.

В работе исследуются: составляющие метода 3D-печати, собственный проект изготовления МПП на 3D-принтере, требования к проекту.

Описание 3D-принтера

3D-принтер – это программно-аппаратный комплекс, позволяющий печатать токопроводящие и диэлектрические изделия на одной установке (рис. 1). Комплекс использует аддитивную технологию изготовления МПП. Процесс изготовления позволяет быстро получить требуемое изделие в кратчайший срок.

Основные элементы 3D-принтера – это две печатающие головки и две системы отверждения. Рабочая зона представлена на рис. 2. Печатающая головка для нанесения токопроводящих чернил дополнена инфракрасной системой спекания, для

Рис. 1. Внешний вид 3D-принтера

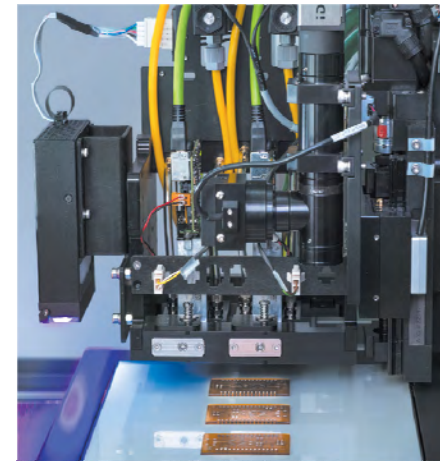


Рис. 2. Рабочая зона 3D-принтера

Рис. 3. Структурная схема изготовления ПМП на 3D-принтере

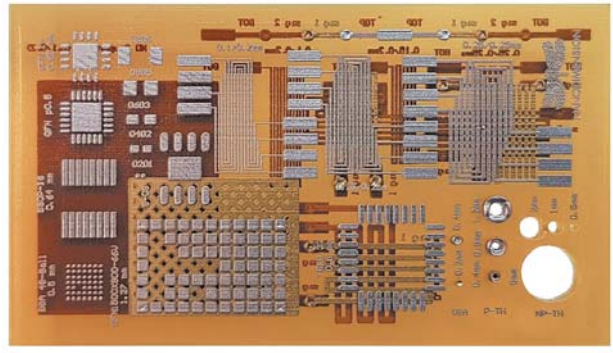


Рис. 4. Внешний вид ПМПП, изготовленного на 3D-принтере

отверждения токонепроводящих чернил используется УФ-система отверждения. Диаметр капли диэлектрика составляет 3 мкм, токопроводящих чернил – 0,3 мкм, что позволяет изготавливать прецизионные платы до 5-го класса точности с параметром проводник/зазор 100/100 мкм.

Минимальная толщина слоя – 10 мкм, максимальная – 3 мм, поэтому количество слоев не ограничено. На 3D-принтере возможна печать плат, содержащих сквозные металлизированные отверстия диаметрами от 0,4 ммии выше. Заполненные токопроводящей пастой отверстия могут иметь диаметр от 0,2 мм и выше.

На принтере возможно создание сквозных металлизированных, сквозных неметаллизированных, глухих и скрытых отверстий, что позволяет разработчикам быстро тестировать ПМПП послойного наращивания, что в традиционной технологии занимает много времени и крайне затратно. Максимальный габаритный размер печатной платы, изготавливаемой на принтере, составляет 200×200×3 мм, причем плата не обязательно должна быть плоской.

Технология изготовления ПП со встроенными компонентами позволяет уменьшить массогабаритные характеристики плат, сократить длину линий связи, обеспечить эффективный теплоотвод и защиту от влаги, решить вопросы по электромагнитному экранированию, а также увеличить механическую прочность плат.

Время печати ПМПП зависит от количества проводящих слоев платы и от объема токопроводящих чернил. Принтер автономен и не требует присутствия оператора во время работы, что позволяет использовать 3D-печать не только в рабочее время.

Типовая структурная схема технологического процесса изготовления ПМПП на 3D-принтере представлена на рис. 3, внешний вид ПМПП, изготовленного на 3D-принтере – на рис. 4

Изготовление МПП на заводе РФЯЦ-ВНИИЭФ

РФЯЦ-ВНИИЭФ изготавливает МПП тентинг-методом и комбинированным позитивным.

Тентинг-метод – самый дешевый и быстрый процесс изготовления печатных плат, при котором металлизируется вся поверхность и отверстия заготовки ПП. Защита рисунка при травлении обеспечивается пленочным фоторезистом, накрывающим проводники и отверстия. Форма пленки фоторезиста, защищающего отверстия, напоминает зонтик, поэтому в названии процесса есть слово «tent» – зонтик. В тентинг-методе приходится формировать проводники и зазоры, вытравливая «несколько слоев», общая толщина которых складывается из толщины фольги (18 мкм) и толщины общей металлизации (35…50 мкм). Наличие подтравливания затрудняет получение тонкого рисунка (проводник/зазор 0,12/0,12 мм).

Используя комбинированный позитивный метод, можно получить более тонкие проводники и зазоры (0,1/0,1мм) за счет меньшей толщины вытравливаемого металла. Толщина используемых в этом методе фоторезистов определяется лишь тем, что толщина рельефа должна быть больше толщины наращиваемой в этом рельефе металлизации (проводников). Типовая структурная схема технологического процесса изготовления МПП комбинированно-позитивным методом на предприятии РФЯЦ-ВНИИЭФ представлена на рис. 5.

После изготовления МПП необходимо произвести монтаж компонентов на плату. Технологический процесс смешанного монтажа на предприятии РФЯЦ-ВНИИЭФ представлен на рис. 6. При этом используется следующее оборудование: бестрафаретный принтер (рис. 7), печь конвекционного оплавления (рис. 8), рентгеновский контроль (рис. 9).

Характеристики МПП, изготавливаемых (примеры представлены на рис. 10, 11) на предприятии РФЯЦ-ВНИИЭФ:

– минимальная ширина проводников и зазоров – 0,15 мм;

– минимальный диаметр металлизированного отверстия – 0,4 мм;

– минимальный гарантийный поясок контактной площадки – 0,05 мм;

– финишное металлическое покрытие: 1) Гор. ПОС-61, 2) ОМ-ImmSn-ОЗП (органическое защитное покрытие поверх иммерсионного олова с барьерным подслоем из органического металла);

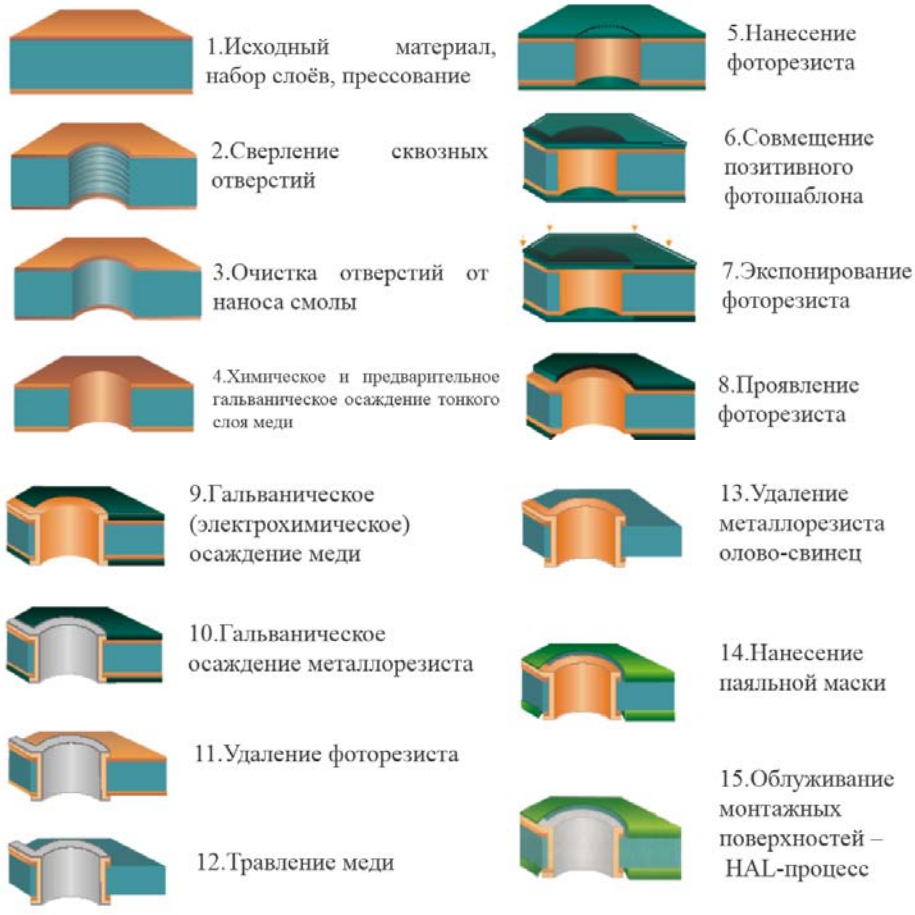


Рис. 5. Процесс изготовления МПП комбинированно-позитивным методом на предприятии РФЯЦ-ВНИИЭФ

Рис. 6. Структурная схема смешанного монтажа на предприятии РФЯЦ-ВНИИЭФ

Рис. 7. Бестрафаретный принтер

Рис. 8. Печь конвекционного оплавления

Рис. 9. Оборудование рентгеновского контроля

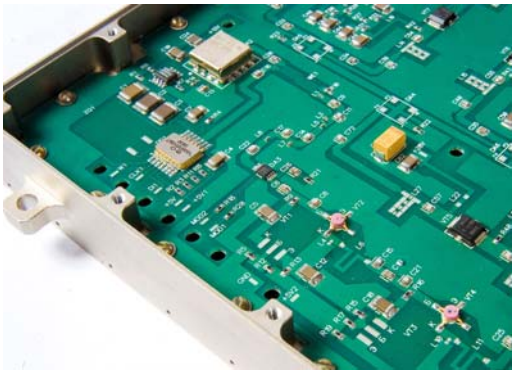


Рис. 10. ПП с покрытием «Иммерсионное олово»

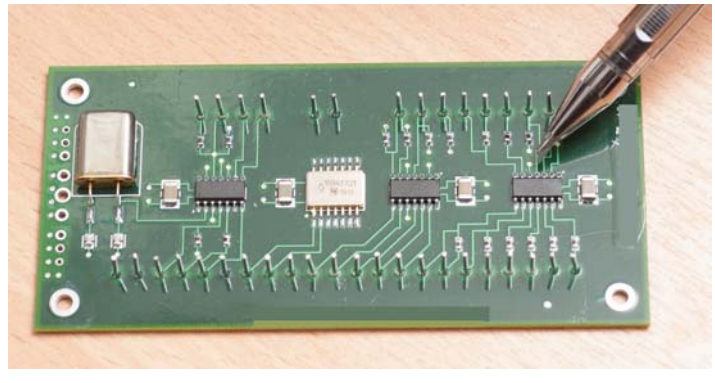


Рис. 11. Печатный узел с элементами поверхностного монтажа

– сухие пленочные защитные паяльные маски Метакрилар-2 и Динамаск, жидкая паяльная маска Imagequre Smart.

Программное обеспечение

Программное обеспечение, которым оснащен 3D-принтер, помимо управления оборудованием, имеет функцию преобразования 2D-файлов Gerber и Excellon, традиционных для печатных плат, в 3D-файлы с помощью простого указания толщины. Планируется также поддержка формата Odb++.

Используемые материалы

Применяемый в 3D-печати диэлектрик по электрическим параметрам и основным механическим характеристикам близок к стеклотекстолиту, проводимость токопроводящих чернил на текущий момент немногим более чем вдвое уступает меди. Диэлек-

трическая проницаемость применяемого полимера равна 3,2 при 1 МГц и 2,9 при 1 ГГц. Основное текущее ограничение материала – максимальная температура пайки, которая составляет 140 градусов.

Актуальность использования 3D-принтера на предприятии РФЯЦ-ВНИИЭФ

В 2019 г. были выполнены запросы компании Остек о рекомендациях технологического процесса электромонтажа для электронных компонентов (ЭК) с проволочными выводами, которые устанавливаются в отверстия ПМПП и ЭК поверхностного монтажа (ПМ). Оказалось, что общепринятый оловянно-свинцовый припой применить невозможно – требуются специальные материалы.

Проводники ПМПП выполнены из сложных материалов с нано-структурой, которые теряют свою проводимость при контакте с олово-свинцовыми припоями и жалом паяльника. Поэтому для монтажа необходимо использование специальных материалов.

Специалистами Остек было предложено подробное описание процесса низкотемпературной пайкой оплавлением припоя, которое совместимо с ПМПП, выполненными 3D-печатью на принтере.

После групповой пайки изготовления компонентов возможна доустановка ЭРИ ручной пайкой. Рекомендуемая паяльная паста представляет собой проволочный припой, предназначенный для низкотемпературной пайки, с низкой температурой плавления.

Поскольку на сегодняшний день нет международных стандартов по изготовлению ПМПП в 3D-принтере, для выполнения требуемого качества монтажа необходимо обязательное соблюдение технологических условий, заявленных компанией Остек.

Подготовка проекта

Для подтверждения целесообразности использования 3D-принтера в подразделении приборной тематики ВНИИЭФ был выбран типичный проект МПП. Внешний вид МПП представлен на рис. 12, рис. 13.

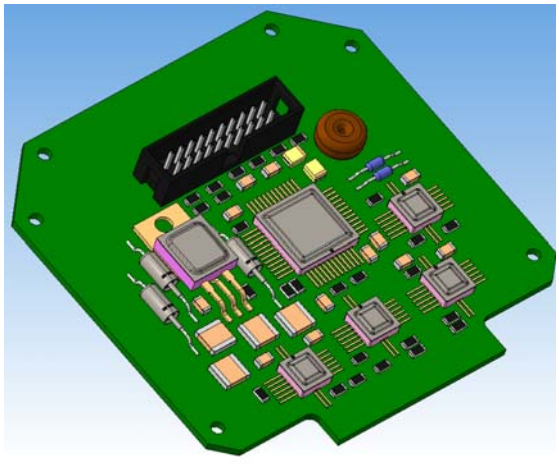


Рис. 12. Внешний вид МПП, вид сверху

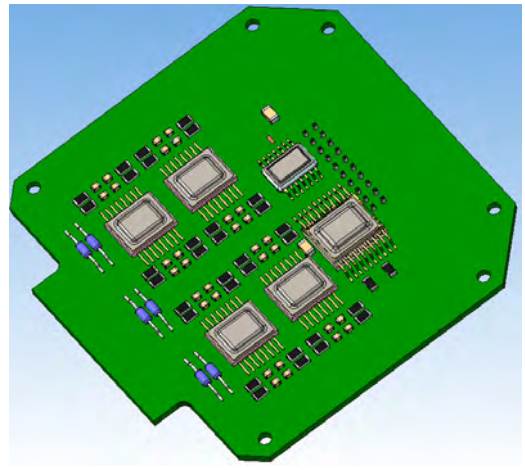


Рис. 13. Внешний вид МПП, вид снизу

Проведено редактирование проекта в соответствии с рекомендациями Остек, подготовлены Gerber-файлы из проекта МПП и переданы в Остек.

После изготовления ПМПП, на площадке Остек планируется произвести монтаж одного печатного узла, провести его проверку, произвести этап ПМ на других МПП на производстве ВНИИЭФ.

Заключение

В докладе рассмотрены методы изготовления ПМПП на собственном производстве предприятия РФЯЦ-ВНИИЭФ и на 3D-принтере, проведен сравнительный анализ процесса изготовления и характеристик готовых МПП.

Выполнены запросы компании Остек о рекомендациях технологического процесса электромонтажа для ЭРИ с проволочными выводами, которые устанавливаются в отверстия ПМПП и ЭК ПМ. Изучены специальные материалы, используемые при групповой пайке. Для подтверждения использования 3D-принтера в подразделении приборной тематики ВНИИЭФ был выбран типичный проект МПП, топология проекта была передана на предприятие Остек для дальнейшей работы.

С учетом рекомендаций Остек и предоставленных технологических материалов необходимо воспроизвести на собственном предприятии технологию ПМ на изготовленных в ОСТЕК ПМПП.

Литература

1. Хесин С. М. Революция в изготовление многослойных печатных плат. 2018. Т. 39, № 4, С. 38–41.

2. Суханов Д. В. Инновационность – ключ к технологической независимости. 2019. Т. 43, № 3, С. 8–12.

3. Производство и монтаж печатных плат, справочник инженера-конструктора. 2009. С. 2–33.

4. Сигаев А. Б. Технологии изготовления печатных плат. 2000. № 1, С. 2–10.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕАКЦИИ СУБМИКРОННЫХ СТРУКТУР «КРЕМНИЙ НА ИЗОЛЯТОРЕ» НА ВОЗДЕЙСТВИЕ НИЗКОИНТЕНСИВНЫХ ПРОНИКАЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ С УЧЕТОМ РАЗБРОСА ИХ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

К. А. Наседкин, А. С. Пузанов, И. Ю. Забавичев, А. А. Потехин, И. А. Наседкин

Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю. Е. Седакова», г. Нижний Новгород

Развитие твердотельной электроники, связанное с уменьшением размеров активной области полупроводниковых приборов [1, 2], открывает новые перспективы перед современной радиоэлектронной аппаратурой. Вместе с тем во многих практических случаях применения к данной аппаратуре и электронной компонентной базе, входящей в ее состав, предъявляются повышенные эксплуатационные требования, в частности по устойчивости к воздействиям низкоинтенсивных проникающих излучений.

В настоящее время накоплен обширный теоретический и экспериментальный материал по вопросам воздействия ионизирующих излучений различной природы на полупроводниковые приборы с характерными размерами рабочих областей свыше 180 нм. Однако исследования функционирования транзисторных структур с характерными размерами менее 180 нм при радиационном воздействии только начинаются [3]. Уменьшение рабочих областей полупроводниковых приборов до размеров порядка длины релаксации энергии приводит к принципиальному изменению физических процессов движения носителей заряда в коротких структурах. В субмикронных полевых транзисторах движение электронов становится практически безстолкновительным, то есть реализуются условия квазибаллистического режима переноса носителей заряда [4].

Решению этих вопросов, а именно, разработке и апробации компактной модели структуры «кремний на изоляторе» (КНИ), учитывающей короткоканальные эффекты и воздействие низкоинтенсивных проникающих излучений, а также прогнозированию радиационной стойкости существующих структур КНИ посвящена данная работа.

Радиотехнический подход основан на замене исследуемого полупроводникового прибора его компактной моделью. Хотя такой метод дает меньшую точность, его возможно использовать для радиотехнического моделирования. В литературе представлены работы по моделированию с помощью радиотехнического подхода, однако, существующие на данный момент компактные модели [5–7] являются чисто феноменологическими, существенным образом зависящими от топологии структуры и требующими большого объема дорогостоящих калибровочных облучательных экспериментов при измерении технологического процесса. Также подобные модели не учитывают короткоканальные эффекты, что, вместе с вышеперечисленным, делает невозможным предсказание на их основе реакции полупроводниковых структур на воздействие проникающих излучений.

Цель работы

Разработка и апробация компактной модели короткоканальной структуры «кремний на изоляторе» с учетом накопления заряда в диэлектрических слоях при воздействии низкоинтенсивных проникающих излучений.

Решаемые задачи

1. Разработка аналитической модели статических вольтамперных характеристик короткоканальной структуры «кремний на изоляторе» с учетом накопления заряда в диэлектрических слоях при воздействии низкоинтенсивных проникающих излучений.
2. Расчет зависимости напряжения смещения на подложке от дозы ионизирующего излучения.
3. Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными.

Одним из методов, реализующих защиту от постепенной деградации, является схема автокомпенсации напряжения подложки [8]. При воздействии ионизирующего излучения происходит постепенное накоплении заряда в диэлектрике, что приводит к нарушению условий эквипотенциальности и нарушению работы схемы [9, 10]. При накоплении заряда на ловушках, генерируемых в объеме оксида и на поверхности раздела кремний-диэлектрик происходит постепенное смещение рабочей точки транзистора, что приводит к тому, что через канал начинает протекать паразитный ток. Если рассматривать одну конкретную цепочку, то такой процесс не приводит к функциональному отказу схемы, смещение рабочей точки недостаточно для случайного переключения состояний транзистора. При этом, через цепочку начинает протекать ток, что приводит к незначительному увеличению токопотребления одной конкретной ячейки. Однако за счет того, что в микросхеме находятся миллионы таких ячеек, происходит резкое возрастание токопотребления микросхемы,

что приводит к перегреву и температурному выгоранию микросхемы. Блок автосмещения отслеживает эти изменения и компенсирует их, изменяя напряжение на подложке.

В связи с тем, что подобные сложные схемы возможно моделировать только в рамках схемотехнического анализа, возникает необходимость в разработке компактных моделей структур КНИ, учитывающих воздействие ионизирующего излучения. Стоит отметить, что проблема необходимости моделирования подобными методами остро стоит и в других областях электроники, в частности, СВЧ диапазона [11, 12].

За основу модели было взято приближение ультраквазигидродинамического электронного транспорта [2]. Исходная модель не имеет радиационно-чувствительных параметров. Результирующие преобразования с учетом соотношений локального потенциала и превышения затворного напряжения [13] над порогом дают следующее выражение для зависимости тока насыщения:

$$I \approx \frac{C\mu}{2}\frac{W}{L}\left(V_g - V_t\right)^{\frac{3}{2}}\sqrt{35\varphi_T}. \qquad (1)$$

Здесь C – удельная емкость оксида, W – ширина канала, V_g – напряжение на затворе, V_t – пороговое напряжение, φ_T – тепловой потенциал.

Радиационно-чувствительным параметром модели являлось пороговое напряжение, изменение которого обусловлено накоплением положительного заряда дырок в захороненном оксиде. И емкость подзатворного диэлектрика, изменение которой обусловлено накоплением заряда на границе раздела полупроводник-диэлектрик, знак которого зависит от типа транзистора – отрицательного для n-канального и положительного для p-канального.

При воздействии ионизирующего излучения на КНИ транзистор накапливается заряд на границе раздела кремний-диэлектрик [14, 15]. Тем самым изменяется пространственное распределение электрического поля, управляющего транзистором. Межэлектродная емкость вычисляется как производная от заряда соответствующего электрода по напряжению между интересующими электродами. Важно отметить, что емкость, как и подвижность, входит в качестве сомножителя в выражение (1), что обусловливает эквивалентность предлагаемого подхода с традиционным подходом со схемотехнической точки зрения. Однако, с позиций физического моделирования, предлагаемая модель обладает преимуществом по сравнению с традиционным подходом, так как в настоящее время существуют хорошо разработанные теоретические представления накопления заряда [16, 18, 19] и изменения емкости в МОП структурах.

Особо стоит отметить, что накопление заряда на границе раздела полупроводник-диэлектрик, знак которого зависит от типа транзистора – отрицательного для *n*-канального и положительного для *p*-канального, обусловливает немонотонный характер зависимости порогового напряжения для *n*-канальных транзисторов: при низких дозах облучения доминирует процесс накопления положительного заряда в толще оксида, что приводит к уменьшению порогового напряжения; при высоких дозах облучения доминирует отрицательный заряд на границе раздела полупроводник-диэлектрик, что приводит к увеличению порогового напряжения. Точка минимума порогового напряжения обычно лежит в диапазоне 0,1…1,0 кДж/кг. Зависимость порогового напряжения от дозы облучения для *p*-канальных транзисторов является монотонно убывающей [20].

Для определения начальных условий, которые необходимо заложить в модель, было проведено измерение напряжения смещения на подложке до облучения микросхем. Всего было измерено 30 микросхем, по результатам измерения была проведена оценка распределения начальных условий.

Из-за значительного разброса начальных условий было построено распределение вероятности, рис. 1. В качестве граничных отклонений был взят разброс на полуширине 2 сигма (что обеспечивает попадание 95 % образцов).

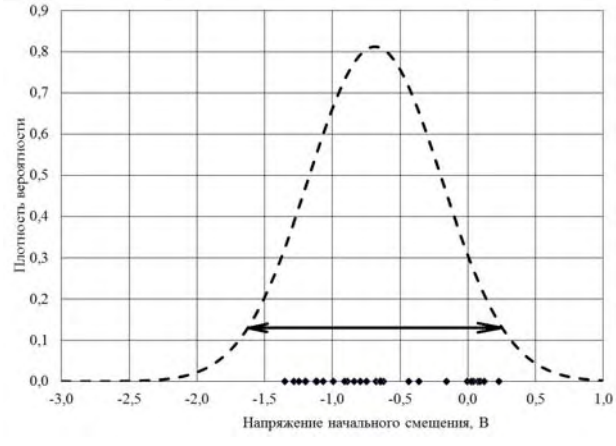
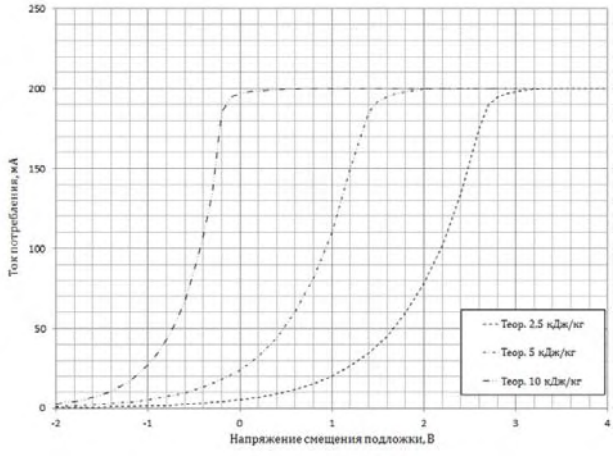
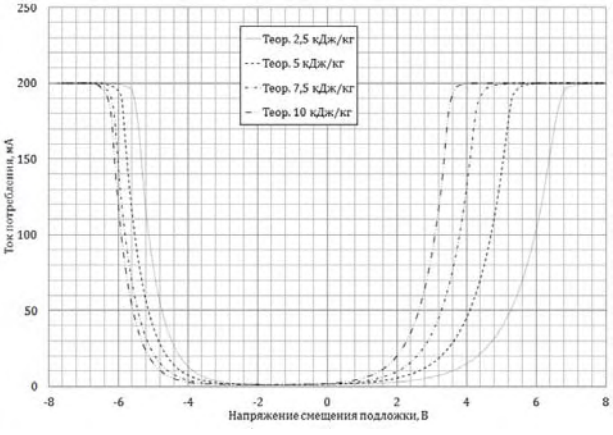


Рис. 1. Оценка разброса начальных условий: • результаты изменения начального напряжения смещения для микросхем из разных партий; - - - оценка распределения напряжения смещения до облучения

В рамках предложенного подхода было осуществлено моделирование процессов изменения статических вольтамперных характеристик при различных внешних условиях (дозах ионизирующего излучения) [17]. В качестве начальных условий выступали пространственные распределения дырок и электронов, технологические параметры транзисторов, а также начальные смещения напряжения подложки, полученные на предыдущем этапе. На рис. 2 представлены примеры статических характеристик, полученных в ходе моделирования.



а



б

Рис. 2. Теоретические статические вольт-амперные характеристики при различных дозах облучения: а – *p*-канальные транзисторы, б – КМОП-ячейки

Из полученных графиков видно, что с увеличением дозы ионизирующего излучения происходит постепенное снижение динамики изменения характеристик [21]. Результаты расчетов статических вольт-амперных характеристик совпадают с экспериментальными данными с погрешностью в 3–9 %, что сопоставимо с дозиметрической погрешностью.

Далее, в рамках схемотехнического анализа, с учетом особенностей работы блоков автосмещения и воздействия ионизирующего излучения было смоделировано поведение микросхемы с нулевым начальным автосмещением. Из графика хорошо заметен локальный максимум при небольших дозах облучения.

Это связано с тем, что накопление заряда на границе раздела полупроводник-диэлектрик, знак которого зависит от типа транзистора – отрицательного для n-канального и положительного для *p*-канального, обусловливает немонотонный характер зависимости порогового напряжения для *n*-канальных транзисторов. При низких дозах облучения доминирует процесс накопления положительного заряда в толще оксида, что приводит к уменьшению порогового напряжения. При высоких дозах облучения доминирует отрицательный заряд на границе раздела полупроводник-диэлектрик, что приводит к увеличению порогового напряжения.

Расчет проводился для микросхем с топологическими нормами 350 нм (рис. 3).

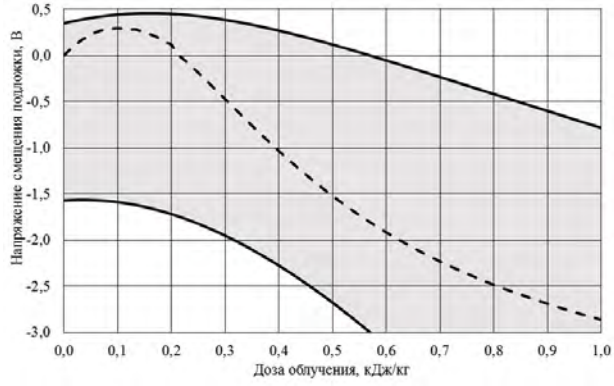


Рис. 3. Зависимость напряжения смещения на подложке от дозы облучения: — результаты расчета граничных отклонений для микросхем; - - - расчет изменения напряжения автосмещения (усредненное значение)

Также были проведены расчеты для микросхем с топологическими нормами 180 нм., рис. 4. Здесь расчет проводился не только в рамках предложенной, но и в рамках уже существующей модели. Это позволяет оценить точность обоих методов на топологиях, где проявляются короткоканальные эффекты.

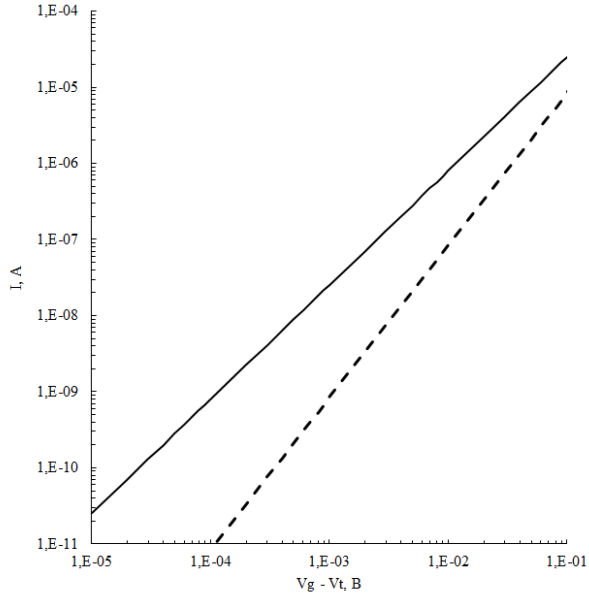
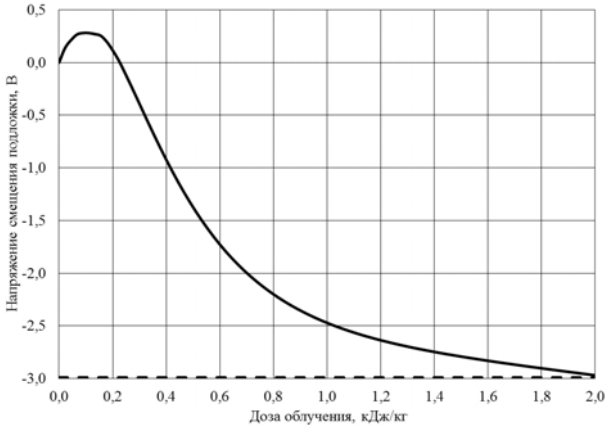


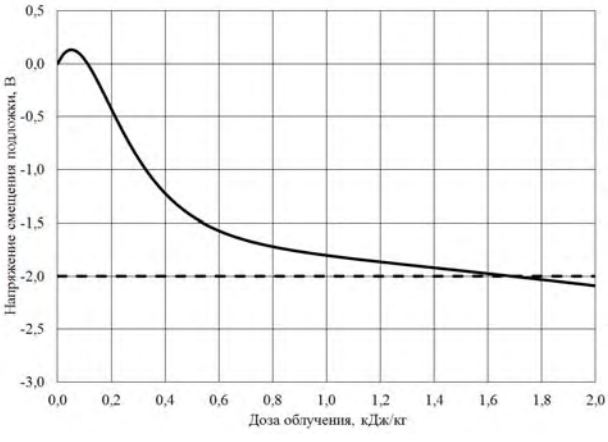
Рис. 4. Зависимость тока насыщения от разности между напряжением на затворе и пороговым напряжением: — предложенная модель; - - - стандартная модель

Были проведены расчеты для микросхем с топологическими нормами 180, 90 и 45 нм. В расчетах также учитывалась, уменьшение управляющего

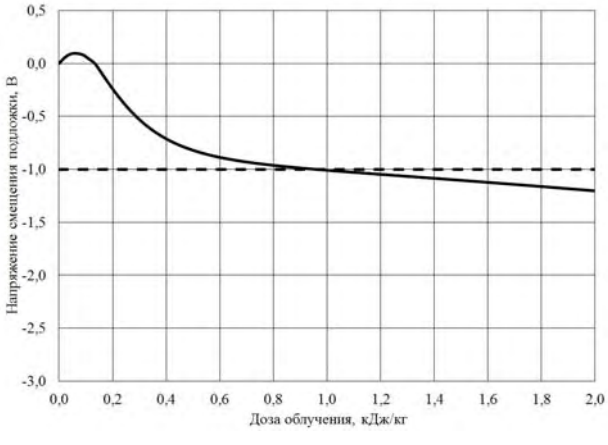
напряжения микросхем, что приводит к изменению уровня параметрического отказа автосмещения. Результаты расчетов представлены на графиках, рис. 5.



а



б



в

Рис. 5. Результаты моделирования зависимости напряжения смещения на подложке от дозы облучения для различных топологических норм: а – 180 нм; б – 90 нм; в – 45 нм; — изменения напряжения автосмещения; - - - уровень параметрического отказа блока автосмещения

Из результатов моделирования, рис. 5, следует, что при уменьшении топологических происходит уменьшение влияния дозовых эффектов [22–24], что хорошо согласуется с известными на данный момент данными и представлениями. Однако, одновременно с этим, уменьшается максимальное напряжение, которое возможно прикладывать к подложке. Тем самым происходит уменьшение уровня, при котором происходит параметрический отказ блока автосмещения [25].

Таким образом, в работе предложена компактная модель короткоканальной структуры «кремний на изоляторе» с учетом накопления заряда в диэлектрических слоях при воздействии низкоинтенсивных проникающих излучений. Разработанная модель эквивалентна традиционной схеме на схемотехническом уровне, однако имеет ряд преимуществ с точки зрения физического моделирования радиационных эффектов. В частности, за учет короткоканальных эффектов отвечают параметры подвижности носителей заряда в канале транзистора и степенной показатель в вольтамперной характеристике. Воздействие низкоинтенсивных проникающих излучений учитывается через изменение порогового напряжения и емкостей структуры. Традиционная модель учитывает только изменение подвижности и порогового напряжения.

В рамках работы было проведено моделирование деградации статических вольтамперных характеристик при воздействии низкоинтенсивных проникающих излучений. Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными показало адекватность предложенного подхода. Погрешность расчетов составила не более 9 %.

Результаты расчетов зависимости напряжения смещения на подложке совпадают с экспериментальными данными с погрешностью не более 19 %.

Это сопоставимо с дозиметрическими данными, и позволяет использовать предложенную компактную модель для оценки влияния низкоинтенсивных проникающих излучений на цифровые микросхемы с высокой степенью интеграции с различными топологическими нормами, в том числе на стадии технологического проектирования.

Предложенную компактную модель можно использовать для неразрушающей отбраковки готовых цифровых микросхем высокой степени интеграции, оценивая уровень, при котором будет происходить параметрический отказ при воздействии низкоинтенсивных проникающих излучений.

Литература

1. Макушин М. А., Мартынов В. С. Новые аспекты развития современной микроэлектроники // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. № 3 (00153) 2016. С. 110–123.

2. Трофимов Н. А. Особенности долгосрочного развития микроэлектронной промышленности // Наука за рубежом. 2012. № 14. С. 4–17.

3. Добровольский Н. А. Объемные FinFET-транзисторы: конструирование на 14 нм узле и ключевые характеристики // Молодой ученый. 2016. № 11. С. 335–344.

4. Гергель В. А., Мокеров В. Г., Тимофеев М. В., Федоров Ю. В. Ультраквазигидродинамический электронный транспорт в субмикронных полевых МДП-транзисторах и гетеротранзисторах // Физика и техника полупроводников, 2000, Т. 34, № 2. С. 239.

5. Петросянц К. О., Самбурский Л. М., Харитонов И. А. Компактная макромодель КНИ/КНС МОП-транзистора, учитывающая радиационные эффекты // Известия ВУЗов. Электроника. 2011. № 1(87). С. 20–28.

6. Харитонов И. А. Модификация модели BSIMSOI для учёта эффектов суммарной поглощённой дозы в КНИ КМОП транзисторах // «Электроника, микро- и наноэлектроника». Сб. науч. трудов. М.: МИФИ, 2006. С. 242–245.

7. Петросянц К. О., Кожухов М. В., Попов Д. А., Орехов Е. В. Математические модели, встроенные в систему TCAD, для учета влияния гамма- и нейтронного излучения на полупроводниковые приборы // Известия ЮФУ. Технические науки 2012. № 6(131). С. 77–82.

8. Лушников А. С., Мещанов В. Д., Рыбалко Е. С., Шепелин Н. А. КМОП КНИ интегральная микросхема с повышенной радиационной стойкостью / Патент РФ 2545325 кл. H01L27/10.

9. Зебрев Г. И. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах высокой степени интеграции. М.: НИЯУ МИФИ, 2010. С 148.

10. Никифоров А. Ю. Моделирование эффектов воздействия импульсного ионизирующего излучения в интегральных преобразователей информации на кремниевых и карбидкремниевых структурах // Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук, Москва: МИФИ, 2003.С. 369.

11. Алимирзоев Г. М., Муравьев М. С., Насеткин К. А., Пузанов А. С., Литовский Д. А. Моделирование утроителя частоты на гетеробарьерном варакторе в 3 мм диапазоне длин волн // Научно-технический вестник Поволжья, 2019. № 7. С. 79–82.

12. Муравьев М. С., Алимирзоев Г. М., Насеткин К. А., Пузанов А. С., Литовский Д. А. Конструирование и расчет СВЧ детектора на базе бескорпусного смесительно-детекторного диода с балочными выводами // Научно-технический вестник Поволжья, 2019. № 7. С. 123–126.

13. Насеткин К. А., Забавичев И. Ю., Потехин А. А., Пузанов А. С. и др. Моделирование реакции субмикронных структур «кремний на изоляторе» на воздействие низкоинтенсивных проникающих излучений // XXIII Международный симпозиум (Нижний Новгород, 11–14 марта 2019 г). Сборник трудов. Н. Новгород, 2019. С. 774–775.

14. Новиков Л. С. Радиационные воздействия на материалы космических аппаратов: учебное пособие. М.: Университетская книга, 2010. С. 192.

15. Вавилов В. С., Кекелидзе Н. П., Смирнов Л. С. Действие излучений на полупроводники. М.: Наука, 1988. С. 192.

16. Аскеров Б. М. Электронные явления переноса в полупроводниках. М.: Наука, 1985. С. 320.

17. Бутин В. И., Зинченко В. Ф., Романенко А. А. Система радиационных испытаний изделий электронной техники. – Владимир: Владимирский государственный университет, 2003. С. 185.

18. Пузанов А. С., Волкова Е. В., Оболенский С. В., Петров С. Г. Применение квазигидродинамической модели для анализа электронного транспорта в полевых и биполярных транзисторах в условиях импульсного ионизирующего излучения с учетом повышенных температур / Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем: Сб. науч. тр. // Под общ. ред. А. Л. Стемпковского. М.: ИППМ РАН, 2008. С. 286–291.

19. Пузанов А. С., Оболенский С. В. Особенности переноса электронов в биполярных транзисторных структурах с тонкой базой при воздействии потока квантов высоких энергий // Микроэлектроника. 2012. Т. 4, № 4. С. 304.

20. Насеткин К. А., Пузанов А. С. Реакция микросхем с цепью автокомпенсации токов утечки на воздействие низкоинтенсивных проникающих излучений // XXII научная конференция по радиофизике (г. Нижний Новгород, 15–29 мая 2018 г.). Сборник трудов. Н. Новгород, 2018. С. 66–68.

21. Насеткин К. А., Муравьев М. С., Алимирзоев Г. М., Пузанов А. С. и др. Моделирование характеристик субмикронных структур «кремний на изоляторе» с учетом радиационных эффектов // Научно-технический вестник Поволжья, 2019. № 7. С. 127–130.

22. Забавичев И. Ю., Насеткин К. А., Потехин А. А. и др. Моделирование процесса формирования разупорядоченной области радиационных дефектов в кремнии // XXIII Международный симпозиум (Н. Новгород, 11–14 марта 2019). Сборник трудов. Н. Новгород, 2019. С. 690–691.

23. Киселев В. К., Оболенский С. В., Пузанов А. С. Аналитическая модель деградации характеристик кремниевых биполярных транзисторов с тонкой базой при воздействии дефектообразующих излучений // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. 2013. № 2–1. С. 56–59.

24. Пузанов А. С., Оболенский С. В. Аналитическая модель переходных ионизационных процессов в кремниевых биполярных транзисторах с тонкой базой при воздействии фотонного импульсного излучения // ВАНТ. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2012. № 4. С. 5–8.

25. Насеткин К. А., Пузанов А. С. Учет воздействия низкоинтенсивных проникающих излучений в структурах «кремний на изоляторе» с цепью автокомпенсации // XXIV Нижегородская сессия молодых ученых. Сборник материалов. Н. Новгород, 2019. С. 203–205.

БОРТОВОЙ ВЫСОКОИНФОРМАТИВНЫЙ БЛОК ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

А. А. Баринов, С. А. Костин, А. П. Осокин, А. А. Погребской

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В РФЯЦ-ВНИИЭФ проведена работа по созданию и отработке малогабаритного высокоинформативного многоканального цифрового преобразователя информации. Преобразователь входит в состав бортовой аппаратуры радиотелеметрической системы СПРИНТ-А и предназначен для выполнения многоканальных измерений в режиме временного разделения каналов. Преобразователь обеспечивает преобразование аналоговых сигналов измерительных датчиков в импульсную последовательность, модулированную по времени (ВИМ-последовательность), которая передается по радиолинии (или проводной линии) в реальном масштабе времени на наземную приемно-регистрирующую аппаратуру радиотелеметрической системы.

Структура кадра РТС СПРИНТ-А приведена на рис. 1. Общая информативность системы $4 \cdot 10^5$ изм/с ($2{,}5 \cdot 10^4$ изм/с на канал).

Кадр ВИМ-последовательности системы состоит из 16 канальных интервалов, длительность которых фиксирована и определяется частотой повторения опорных импульсов, формируемых тактовым генератором преобразователя. Для измерительных импульсов в канальных интервалах кадра задается интервал девиации, образующий измерительную шкалу, определяющую предельные положения измерительных импульсов в канальном интервале (минимальное и максимальное). Положение измерительных импульсов на измерительной шкале канальных интервалов определяется напряжениями электрических сигналов первичных преобразователей информации (датчиков), поступающих на входы каналов преобразователя.

В ранее применяемом преобразователе для перевода напряжения электрического сигнала с датчика в интервал времени лежало сравнение этого напряжения с пилообразным (линейно изменяющимся) напряжением и формирование в момент сравнения измерительного импульса. Таким образом, пропорционально выходному напряжению датчика изменялось расстояние между двумя импульсами: опорным, запускающим генератор пилообразного напряжения, и измерительным. То есть использовался принцип временного разделения каналов с 3-х ступенчатым преобразованием аналоговых сигналов в виде АИМ-ШИМ-ВИМ-последовательностей. Основным недостатком данного метода является сравнительно невысокая точность преобразования аналоговых сигналов во время – импульсную последовательность, обусловленная, в основном, невысокой линейностью пилообразного напряжения (от 1 % до 10 %) [1], а так же сложность настройки генератора пилообразного напряжения.

С целью повышения точности, в разработанном преобразователе заложен принцип преобразования аналоговых сигналов сначала в цифровой код, а затем во временной интервал. Данный принцип построения позволяет получить высокую точность преобразования (погрешность преобразования менее 1 %). Метод заключается в оцифровке аналогового сигнала аналого-цифровым преобразователем и последующим преобразованием значения «код-время» декрементным счетчиком. При этом количество тактов счета определяет расстояние между опорным и измерительным импульсами. На данный метод получен патент РФ [2].

Структурная схема преобразователя приведена на рис. 2. Устройство содержит модуль питания, модуль преобразования и два радиопередающих устройства, работающих на разных несущих частотах.

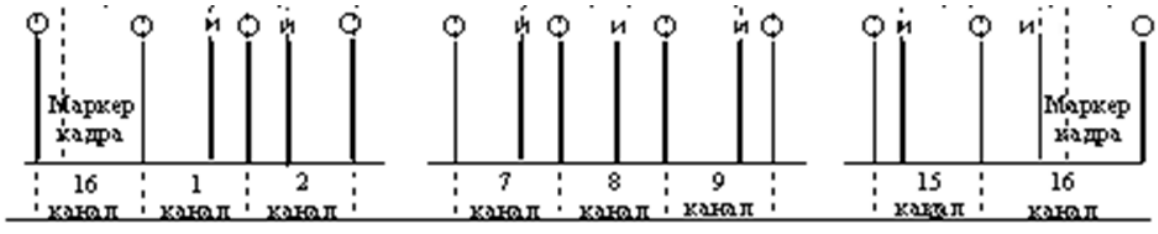


Рис. 1. Структура кадра время – импульсной последовательности РТС СПРИНТ-А: о – опорный импульс, и – измерительный импульс

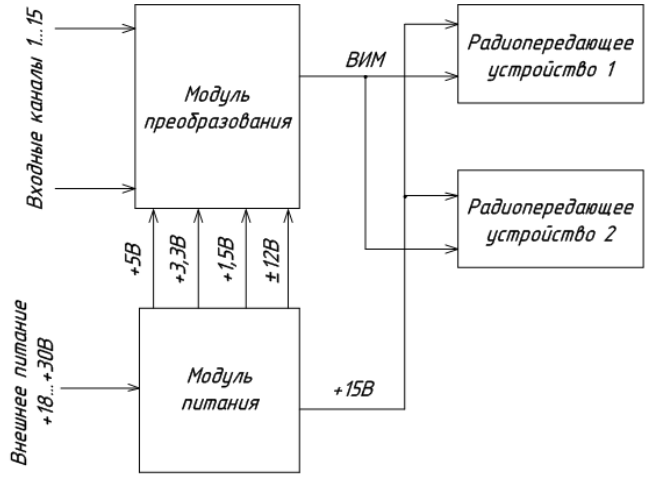


Рис. 2. Структурная схема преобразователя

Модуль питания предназначен для преобразования входного внешнего питания (+18 В…+30 В) в необходимые напряжения для работы аналоговых и цифровых компонентов устройства. Кроме того, модуль питания содержит LC-фильтры для подавления высокочастотных помех.

Входной информацией устройства являются аналоговые сигналы, поступающие с датчиков с амплитудой от 0В до +2 В. Модуль преобразования преобразует входные сигналы каждого канала в соответствующий временной интервал. Таким образом, выходным сигналом модуля является информация в виде последовательных импульсов, модулированная по времени.

Радиопередающие устройства преобразуют время-импульсную последовательность в радиочастотные сигналы, в двух диапазонах частот, для дальнейшей передачи на наземную приемно-регистрирующую аппаратуру. Передающие устройства работают на фиксированных частотах системы РТС-9.Два радиопередающих устройства применяются с целью частотного разнесения передаваемого сигнала, что повышает надежность передачи информации. Так же устройство может передавать ВИМ-сигнал по проводной линии связи, для чего на передней панели устройства предусмотрен специальный разъем.

Использование в разработанном устройстве принципа преобразования аналоговых сигналов в виде АИМ-КИМ-ВИМ-последовательностей по сравнению с аналогом, применение микросхем высокой степени интеграции(ПЛИС) обеспечило повышение точности преобразования, а также позволило существенно уменьшить массогабаритные показатели и энергопотребление.

Все модули устройства, включая радиопередатчики, размещены в металлическом корпусе с 4-мя отсеками. Применение корпуса с раздельными отсеками позволяет существенно снизить влияние помех модуля питания и радиопередающих устройств на электрические цепи модуля преобразования за счет экранирующего эффекта самого корпуса. Платы модулей устройства соединены гибкими проводниками. Все разъемы устройства размещены на верхней крышке. На нижней поверхности корпуса имеются крепежные отверстия. Полости устройства корпуса заполнены пенополиуретаном ППУ305А. Внешний вид преобразователя представлен на рис. 3.

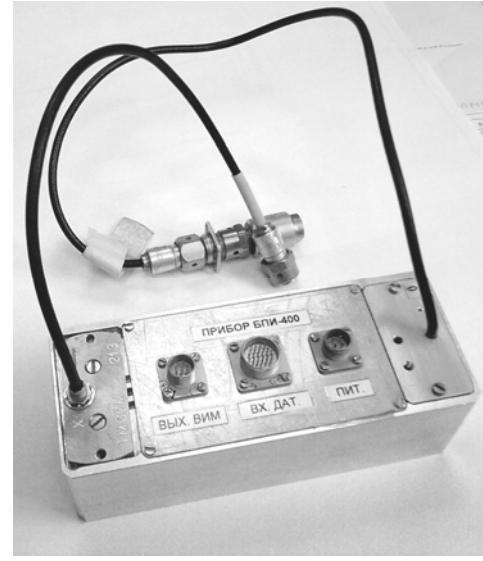


Рис. 3. Внешний вид преобразователя

Преобразователь устанавливается на объекте испытания в составе бортовой измерительной аппаратуры. Типовая схема применения преобразователя представлена на рис. 4.

Для определения уровня стойкости преобразователя к воздействию ударной нагрузки проведены его испытания на стенде динамических испытаний. В испытаниях также проводилась отработка приема радиотелеметрической информации РТС СПРИНТ-А в реальных условиях испытательной площадки

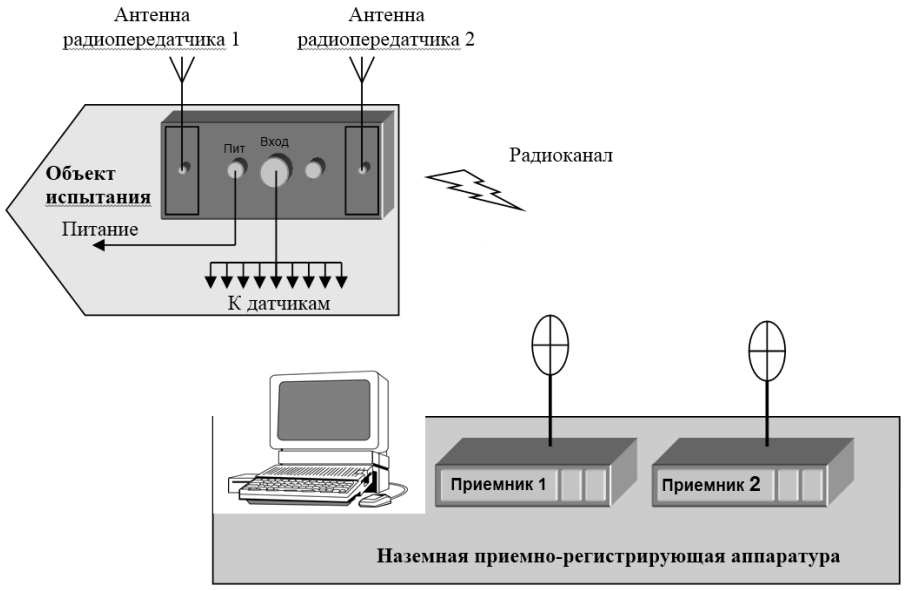


Рис. 4. Типовая схема применения преобразователя

РФЯЦ-ВНИИЭФ, в том числе в условиях движения источника телеметрического сигнала по рельсовой направляющей ракетно-катапультирующей установки РФЯЦ-ВНИИЭФ. Результаты испытаний показали эффективность применения двух радиопередающих устройств с частотным разнесением.

С помощью передачи сигнала на разных частотах и приема его в разных точках пространства, а также использования гибкого алгоритма обработки, примененного в программно-аппаратном комплексе наземной регистрации, имеется возможность восстановить информацию на «сбойных» участках после обработки сигналов путем наложения участков с более качественной информацией. Таким образом, радиотелеметрическая информация может быть получена на всем участке ее регистрации.

Подтверждена стойкость преобразователя к перегрузкам до 2000 *g*.

На разработанный преобразователь получен патент РФ [3].

Литература

1. Бондарь В. А. Генераторы линейно изменяющегося напряжения М.: Энергоатомиздат, 1988.

2. Пат. 2289200, РФ, МПК H03 K3/84, H04 B7/17 Преобразователь аналоговых сигналов в импульсную последовательность, моделируемую по времени Батарев С. В., Кортюков И. И., Кирдяшкин Ю. А., Страбыкин В. В. // Бюллетень изобретений. 2006. № 34.

3. Пат.2471287,РФ, МПК H 03M 1/12 . Многоканальный преобразователь аналоговых сигналов в импульсную последовательность, модулированную по времени / Кортюков И. И., Батарев С. В., Устинов П. В., Осокин А. П., Костин С. А. // Бюллетень изобретений. 2012. № 36.

ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОМАССООБМЕНА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УСТАНОВОК БМ-ЛР И БМ-П ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ РЕКОМБИНАТОРОВ

А. А. Рякин, О. В. Койнов, М. В. Никульшин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ», г. Снежинск Челябинской обл.

Введение

Возможность горения водородно-воздушных смесей, угрожающих жизни людей, целостности защитной оболочки или работоспособности критичного для безопасности оборудования на атомных электростанциях (АЭС) с водоохлаждаемыми реакторными установками (РУ) учитывалась с момента зарождения атомной энергетики в Советском Союзе, США, Великобритании [1]. При нормальной эксплуатации водород всегда присутствует в теплоносителе первого контура РУ вследствие радиолиза, термолиза и других технологических процессов, что подтверждается нарушениями, отмеченными на российских и зарубежных водоохлаждаемых энергоблоках, где были зафиксированы возгорания гремучей смеси в коллекторах парогенераторов и «хлопки» (дефлаграционные взрывы небольшой интенсивности) гремучей смеси под крышкой реактора. Поэтому проблема обоснования водородной взрывобезопасности является актуальной для условий нормальной эксплуатации и аварийных ситуаций.

В качестве практических мер для исключения или снижения риска потери целостности герметичного ограждения разрабатываются и внедряются в эксплуатацию технологии и устройства безопасного удаления водорода из атмосферы герметичного ограждения и мониторинга ее химического состава. Одним из таких устройств является рекомбинатор, который служит для беспламенного сжигания водорода при помощи катализатора.

Вопросы водородной безопасности в настоящее время рассматриваются в различных научно-исследовательских центрах нашей страны. Расчетное моделирование развития тяжелой аварии в защитной оболочке [2] проводилось в ОАО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород.

Численные исследования заключались в прогнозировании термогидравлических процессов, происходящих в экспериментальных установках TOSQAN (IRSN, Франция), MISTRA (CEA, Франция) и PANDA (PSI, Швейцария).

В Российской Федерации также есть стенды для исследования вопросов водородной безопасности, такие как крупномасштабный стенд в НИТИ [3], и стенд СПОТ ЗО [3], но существенным недостатком является то, что эти стенды не предназначены для исследования взрывных явлений, и направлены на исследования влияния на стратификацию водорода различных факторов.

Отдельный интерес представляет расчетное исследование рекомбинаторов в ИБРАЭ РАН, Москва [3], в котором описаны уравнения физико-математической модели рекомбинатора в различных коммерческих программных кодах конечно-элементного анализа. Также представлено описание рекомбинации водорода и гидравлического сопротивления в катализаторе. Модель рекомбинатора водорода была верифицирована по экспериментальным данным, и способна воспроизводить экспериментальную производительность рекомбинаторов, а также состав и температуру выходной смеси на выходе из рекомбинатора. Но отмечен тот факт, что необходимо проведение экспериментальных исследований рекомбинаторов в газовой среде с повышенным содержанием водорода (более 10 %), малым содержанием кислорода и наличием пара. Наличие перечисленных факторов позволит улучшить достоверность результатов в задачах моделирования процессов, происходящих при тяжелой аварии в защитной оболочке. Таким образом, существует еще ряд вопросов водородной безопасности, связанных с исследованием рекомбинаторов и способов исследования их характеристик.

В настоящее время в РФЯЦ-ВНИИТФ исследуется рекомбинатор водорода на основе высокопористых ячеистых материалов (пеноникель).

Рекомбинатор служит для беспламенного сжигания водорода.

Цель расчетных исследований представленных в работе:

1) прогнозирование процессов, вероятных при проведении экспериментов на установке БМ-ЛР (большой макет легкий для рекомбинаторов) при исследовании рекомбинаторов;

2) расчетное обоснование достаточности системы теплоотвода для камеры БМ-П (большой макет прочный).

Расчетные исследования камеры БМ-ЛР позволили прогнозировать процессы, которые происходят при исследовании рекомбинаторов в камерах, и сделать вывод о применимости использования камеры БМ-ЛР для исследования рекомбинаторов.

Расчеты системы теплоотвода камеры БМ-П позволили обосновать вариант системы теплоотвода, который сделал возможным проведение исследований рекомбинаторов, превратив камеру БМ-П в уни-

версальный стенд для экспериментальных исследований процессов, происходящих в камере БМ-П.

Описание конструкции рекомбинатора

Рекомбинатор – устройство для удаления водорода из газовой смеси, состоящее из корпуса и блока катализаторов. Катализаторы – вещества, которые изменяют скорость реакции, а сами к концу процесса остаются неизменными как по составу, так и по массе. На поверхности катализаторов непосредственно осуществляется реакция рекомбинации водорода. В рекомбинаторе катализатор представляет собой высокопористый ячеистый никель с подложкой из активной окиси алюминия.

Корпус служит контейнером для хранения пластин катализаторов и их защитой от внешних воздействий. Корпус рекомбинатора имеет вид трубы квадратного сечения, выполненной из нержавеющей стали с толщиной листа 1 мм.

Преимущества пассивных каталитических рекомбинаторов водорода (ПКРВ):

– протекание гетерогенного каталитического окисления водорода имеет несколько преимуществ по сравнению с объемными режимами горения и основанными на них технологиями контроля водорода:

– квазистатичность (изобаричность) процесса – химическая реакция происходит при практически постоянном давлении за счет того, что фронт окисления «привязан» к каталитической поверхности и не может распространяться в пространстве (как при дефлаграционном или детонационном горении). Следовательно, не может выступать генератором волн давления, способных распространяться по объему и оказывать механическое воздействие на защитную оболочку АЭС;

– расширенный диапазон работы по концентрации водорода – каталитическое окисление может происходить в диапазоне концентраций водорода, при которых существование самораспространяющегося пламени невозможно. А именно: каталитическое дожигание водорода возможно для концентраций водорода в пароводородновоздушной газовой смеси ниже нижнего концентрационного предела воспламенения (<4 об. %) и выше (>75 об. %) верхнего предела существования дефлаграционного пламени;

– возможность работы в условиях высокого содержания пара. Содержание пара в газовой фазе оказывает слабое влияние на скорость каталитического окисления водорода, что позволяет гарантированно удалять водород даже при работе спринклеров или в условиях высокого содержания пара в водородно-воздушной смеси. Энергонезависимость – для инициирования каталитического окисления не нужен источник энергии. Эта уникальная особенность ПКРВ позволяет использовать их даже в сценариях с полным обесточиванием АЭС;

– самопроизвольность инициирования каталитической реакции окисления – гетерогенное каталитическое окисление не требует внешних источников инициирования реакции. Именно данная особенность каталитического окисления дает основание называть рекомбинаторы пассивными техническими устройствами.

Недостатки ПКРВ:

1) гетерогенный характер окисления водорода в ПКРВ имеет следующие недостатки технологии каталитического сжигания водорода:

– невысокая (по сравнению с самораспространяющимися режимами горения) удельная (на единицу площади катализатора) скорость окисления водорода – при каталитическом окислении водорода скорость удаления водорода пропорциональна площади поверхности раздела «катализатор/паро-водородно-воздушная газовая смесь» и существенно ниже (в пересчете на единицу площади поверхности) скорости удаления водорода в пламени;

– образование «горячих пятен» на поверхности катализатора и, как следствие, локальное инициирование волн горения («пламени»), самостоятельно (без воздействия катализатора) распространяющихся по газовой смеси внутри и вне корпуса ПКРВ, – скорость каталитической реакции пропорциональна концентрации водорода в пароводородновоздушной газовой смеси. Вследствие данной фундаментальной физико-химической зависимости при повышении концентрации водорода удельная (на единицу поверхности катализатора) скорость тепловыделения растет. При превышении критического значения концентрации водорода (так называемого концентрационного предела воспламенения каталитической поверхностью) приводит к воспламенению пароводородновоздушной газовой смеси в газовом объеме вблизи поверхности катализатора и распространению пламени внутри и вне корпуса ПКРВ для всех известных сегодня конструкций ПКРВ;

2) спонтанный характер формирования «горячих пятен» на поверхности катализатора – формирование «горячих пятен» происходит вследствие пространственной неоднородности в распределении атомарных центров каталитической активности на поверхности раздела, которую невозможно устранить технологическими средствами при производстве и обработке макроскопических каталитических элементов;

3) невозможность целенаправленного технического управления процессом каталитического поджига в известных сегодня конструкциях ПКРВ – как только концентрация водорода в пароводородновоздушной газовой смеси превысит критический предел, процесс воспламенения невозможно контролировать какими-либо техническими средствами или организационными процедурами, и он становится неуправляемым.

Из приведенного описания физико-химических особенностей работы ПКРВ следует, что для выполнения одной из главных функций безопасности АЭС с реакторами типа ВВЭР – обеспечения целостности

защитной оболочки путем использования ПКРВ – необходимо принимать во внимание двойственный характер поведения существующих конструкций ПКРВ в условиях тяжелой аварии.

Рекомбинатор оснащен колпаком и устройством открытия и закрытия входов рекомбинатора для исключения самопроизвольного начала работы рекомбинатора. Колпак представляет собой треугольную призму с одним выходным отверстием.

Конструкция камеры БМ-ЛР

Установка БМ-ЛР состоит из вложенных друг в друга камер. Внутренняя камера оснащена креплением рекомбинатора и клапаном для стравливания газов из внутренней камеры наружу при превышении давления $P_{атм} = 98$ кПа. Клапан установлен на потолке камеры и представляет собой полую трубу из Ст.3 толщиной 2 мм и диаметром ∅190 мм, другой конец которой выходит в атмосферу, проходя насквозь потолок внешней камеры. Одна из стенок камеры внутренней представляет собой поликарбонатный лист толщиной 5 мм. Крепление поликарбонатного листа в камере обеспечивает плотное прилегание его к раме и возможность его свободного расширения при нагреве без образования щелей. При росте давления внутри камеры в процессе дефлаграции смеси предполагается вылет поликарбонатной стенки с сохранением целостности остальных стен.

Между внутренней камерой и «термосом» расстояние 400 мм. В нижнюю часть «термоса» встроены два воздуховода (отверстия диаметром 200 мм). Воздух от тепловых пушек обдувает внутреннюю камеру для поддержания необходимой для проведения эксперимента температуры.

Конечно-элементная модель камеры БМ-ЛР

На рис. 1. представлена конечно-элементная модель камеры БМ-ЛР и рекомбинатора.

Граничные условия для расчетов камеры БМ-ЛР

Граничные условия, используемые для расчетов температурных полей камеры БМ-ЛР и рекомбинатора, представлены в таблице.

Граничные условия для расчетов температурных полей камеры БМ-ЛР и рекомбинатора

Параметр	1 вариант	2 вариант
Начальная температура конструкции	110 °С	
Граничные условия на стенках камеры (конвективный теплообмен)	110 °С $\alpha = 7{,}6$ Вт/(м$^2 \cdot$ К)	
Давление внутри камеры	98 кПа	
Давление на границе выпускного отверстия	98 кПа	
Температура подаваемой газовой смеси	110 °С	
Расход массовой смеси	16 г/с	40 г/с
Энерговыделение на катализаторе	9.6 кВт	24кВт

Выводы по результатам расчетов камеры БМ-ЛР

Проведены расчетные исследования температурных полей камеры БМ-ЛР [4] при различных режимах работы рекомбинатора.

При режиме энерговыделения в катализаторе 9,6 кВт (концентрация водорода – 3 %) максимальная температура катализатора составляет 245 °С на момент времени 12 минут, максимальная температура воздуха 240 °С. Металлические стенки камеры нагреваются до 161 °С, стенка из поликарбоната не достигает температуры плавления.

При режиме энерговыделения в катализаторе 24 кВт (концентрация водорода – 8 %) максимальная температура катализатора составляет 386 °С, значение температуры воздуха 383 °С. Температура плавления 150 °С на поликарбонатной стенке достигается через 3 минуты.

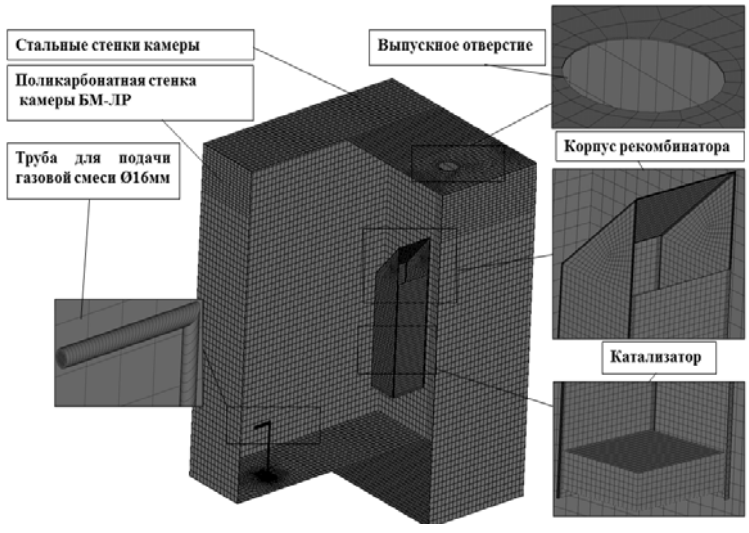


Рис. 1. Конечно-элементная модель камеры БМ-ЛР и рекомбинатора

Из представленных результатов, можно сделать вывод, что проводить исследования рекомбинатора в камере БМ-ЛР допустимо при концентрациях водорода до 3 %, при более высоких концентрациях водорода повышение температуры приводит к расплавлению поликарбонатного листа.

Для исправления ситуации необходимо оснащение камеры БМ-ЛР системой теплоотвода, либо проведения исследования рекомбинаторов при более высоких концентрациях водорода в камере БМ-П.

Конструкция камеры БМ-П и системы теплоотвода

Для проведения испытаний по определению диапазона концентраций водорода, в котором осуществляется режим беспламенной работы рекомбинатора при различных давлениях атмосферы, повышенных температурах и влажностях, характерных для сценария тяжелых аварий на АЭС, используется камера БМ-П [5].

Камера БМ-П представляет собой стальную цилиндрическую камеру высотой 5 м и диаметром 2 м. Стенки камеры теплоизолированы и снабжены системой нагрева и термостабилизации. В камере БМ-П проводятся исследования при значениях давления выше атмосферного и повышенных значениях температуры. На рис. 2. представлен внешний вид камеры БМ-П.

Для проведения исследований рекомбинатора используется одна из колонн камеры БМ-П. Внутри камеры БМ-П размещается рекомбинатор с катализаторами, система измерения и система охлаждения. Так как при работе рекомбинатора внутри камеры реализуются крайне высокие значения температуры, что может привести к загоранию пароводяной смеси, необходимо наличие внутри камеры эффективной системы охлаждения. В первоначальном исполнении система теплоотвода представляла собой калорифер, в который с помощью насоса подавался воздух с температурой соответствующей температуре среды. Данная схема оказалась неэффективной, и было принято решение об оснащении камеры БМ-П системой теплоотвода с теплоносителем вода.

Расчетным путем необходимо было обосновать достаточность системы теплоотвода для выполнения условия – не превышения значения среднеобъемной температуры 150 °С в камере БМ-П.Так как ранее проводились предварительные испытания варианта системы теплоотвода с калорифером и воздушным теплоносителем, было принято решение провести расчеты по верификации конечно-элементной модели с теплоносителем воздух, а затем провести расчет на верифицированной модели с теплоносителем вода, что позволило оценить эффективность системы теплоотвода.

Выводы по результатам расчетных исследований теплоотвода камеры БМ-П

Расчеты системы теплоотвода камеры БМ-П позволили обосновать вариант системы теплоотвода, который сделал возможным проведение исследований рекомбинаторов, превратив камеру БМ-П в универсальный стенд для экспериментальных исследований процессов, происходящих в камере БМ-П.

Заключение

Проведены расчетные исследования температурных полей камеры БМ-ЛР при различных режимах работы рекомбинатора.

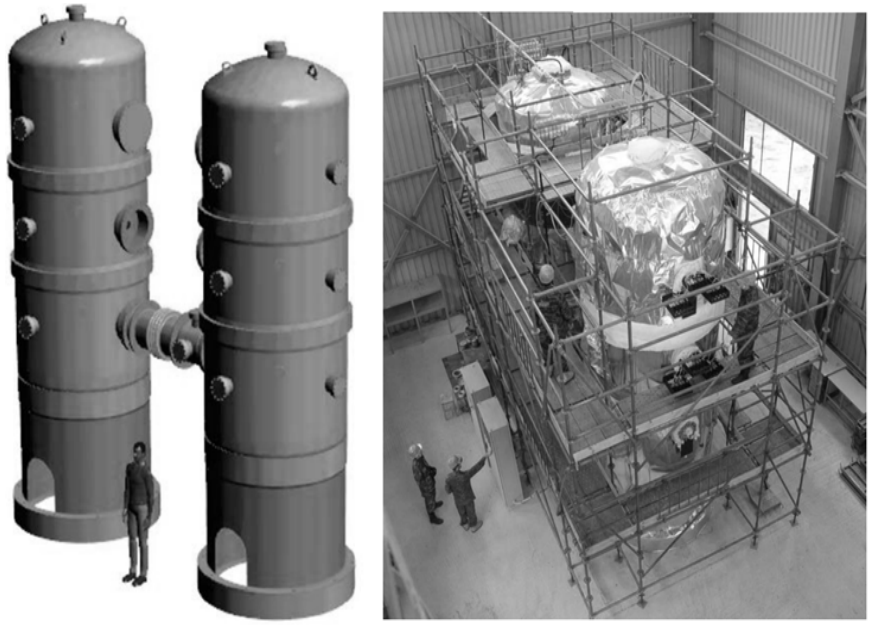


Рис. 2. Внешний вид камеры БМ-П

Анализируя представленные результаты, можно сделать вывод, что проводить исследования рекомбинатора в камере БМ-ЛР можно при концентрациях водорода до 3 %. При более высоких концентрациях водорода повышение температуры приводит к расплавлению поликарбонатного листа. Использование поликарбонатного листа связано с необходимостью наблюдения и видеофиксации процессов, проходящих в камере БМ-ЛР при дефлаграции водорода. Для исправления ситуации необходимо оснащение камеры БМ-ЛР системой теплоотвода, либо проведения исследования рекомбинаторов при более высоких концентрациях водорода в камере БМ-П.

Результаты расчетных исследований системы теплоотвода показали, что использование калорифера, размещенного внутри камеры с теплоносителем вода, является эффективным методом охлаждения камеры БМ-П. Для повышения эффективности можно использовать второй калорифер, расположенный за пределами камеры, что обеспечит теплоотдачу от теплоносителя в окружающую среду.

Литература

1. Кириллов И. А. Обеспечение водородной безопасности на атомных электростанциях с водоохлаждаемыми реакторными установками. Ядерная и радиационная безопасность. 2017. № 2 (84).

2. Хизбулин А. М. , Каменев М. А. , Тюриков О. В. Расчетное моделирование развития тяжелой аварии с учетом влияния работы теплообменника на стратификацию водорода в защитной оболочке / 16-я конференции молодых специалистов по ядерным энергетическим установкам «КМС-2014» // Сборник материалов. Нижний Новгород: ОАО «ОКБМ Африкантов», 2014.

3. Тарасов О. В. Разработка и верификация модели рекомбинаторов РВК-500,-1000, для моделирования защитной оболочки АЭС с ВВЭР методами вычислительной гидродинамики // Атомная энергия.2016. Т. 121. Вып. 3.

4. Рякин А. А., Горбачева Е. С., Койнов О. В., Никульшин М. В., Путилин О. С. Расчетные исследования теплового состояния испытательных стендов БМ-П и БМ-ЛР / VI Всероссийская научно-практическая конференция «Научная сессия НИЯУ МИФИ» // Сборник тезисов. Снежинск: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ», 2017.

5. Лавренюк И. В., Симоненко В. А., Безгодов Е. В. Экспериментальное исследование стратификации и горения ВПГС / Международная конференция «XIII Забабахинские научные чтения» // Сборник тезисов. Снежинск: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2016.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОММУТАЦИОННЫХ ПЛАТ НА АЛЮМИНИЕВЫХ ОСНОВАНИЯХ ДЛЯ ПРИБОРОВ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Т. Е. Сарпова

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Силовая гибридная интегральная схема (СГИС) – конструктивно законченное изделие электронной техники, содержащее совокупность связанных между собой активных и пассивных элементов электрической схемы и отличающееся высокими рабочими напряжениями, токами и температурами.

Одна из проблем современной электроники заключается в разработке эффективных методов и технологий отвода тепла от радиоэлементов, расположенных на интегральной схеме, так как несвоевременный отвод тепла приводит к их быстрому перегреву и выходу из строя. Особенно остро эта проблема стоит перед разработчиками силовых полупроводниковых устройств, элементы которых могут работать при больших мощностях и в экстремальных климатических условиях, что ухудшает характеристики полупроводниковых приборов.

В настоящее время широкое применение нашли СГИС, которые могут функционировать при условии эффективного отвода тепла, осуществляемого через многослойную структуру к наружной поверхности корпуса. В разрабатываемой технологии изготовления платы это обеспечивается применением медной токоведущей разводки и теплоотводящего алюминиевого основания с диэлектрическим алюмооксидным слоем.

Применение металлических оснований является принципиально новым качественным этапом в развитии конструкции и технологии создания гибридных интегральных схем. Алюминиевые сплавы привлекают внимание благодаря удачному сочетанию своих свойств: высокая пластичность и теплопроводность, низкая стоимость, малый удельный вес, высокая коррозийная стойкость и механическая прочность.

Целью данной работы являлась разработка технологии изготовления коммутационных плат на алюминиевых основаниях с применением алюмооксидной технологии и базовых операций вакуумного напыления, фотолитографии, электрохимического осаждения металлов.

Основанием для выполнения данной работы является разработка и внедрение производственно-технологических процессов изготовления радиоэлектронных приборов систем автоматики нового поколения.

Теоретическая часть

Необходимость быстрого и эффективного отвода тепла – одна из основных проблем полупроводниковых приборов. Один из способов решения проблемы является использование оксидированного алюминия при производстве плат. С точки зрения использования в качестве подложек алюминий, единственный из известных металлов, обладает еще одним уникальным свойством, а именно, способностью образовывать в процессе окисления толстые (до сотен микрон) собственные высококачественные диэлектрические слои.

Основой технологии является электрохимический процесс анодного окисления (анодирования) алюминия и его сплавов в водных или безводных растворах электролитов. Процесс анодирования позволяет превращать исходный алюминий в его оксид Al_2O_3, который является хорошим диэлектриком. Анодно-оксидная пленка состоит из непосредственно примыкающего к металлу тонкого барьерного слоя и пронизанного многочисленными порами наружного слоя рис. 1. Толщина пористого оксида может достигать сотен микрон.

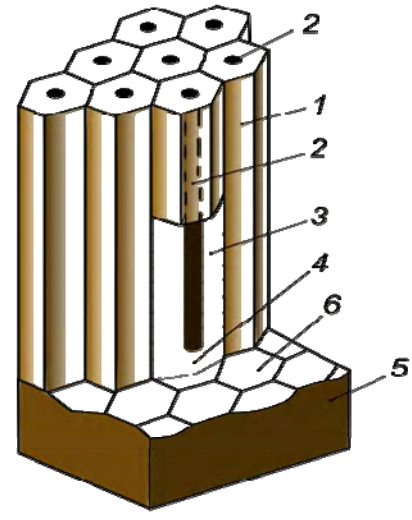


Рис. 1. Схематическое изображение структуры утолщенных анодных пленок: 1 – окисная ячейка; 2 – пора; 3 – стенка окисной ячейки; 4 – беспористый окисный слой барьерного типа; 5 – алюминий; 6 – отпечатки оснований окисных ячеек на поверхности алюминия

Экспериментальная часть

Изготовление коммутационной платына алюминиевом основание осуществлялось по разработанному технологическому процессу.

Химическая подготовка поверхности алюминиевых оснований проводилась в два этапа:

– травление поверхностного слоя(удаление с поверхности оснований различных дефектов и загрязнений, полученных в результате механической обработки);

– химическая полировка поверхности.

Осуществлялся процесс толстослойного анодирования на установке выращивания алюмооксидных слоев «Дельта-2/4. АНОКС-К» в 5 % растворе щавелевой кислоты ($H_2C_2O_4$) в гальваностатическом режиме рис. 2 [1, 2].

Рис. 2. Установка выращивания алюмооксидных слоев «Дельта-2/4. АНОКС-К»

Поверхность и структура оксида алюминия после проведения процесса толстослойного анодирования представлена на рис. 3.

Процесс заполнения пор оксидированного алюминия проводился с применением позитивного фоторезиста ФП-2550 и состоял из следующих операций:

– нанесение фоторезиста на поверхность диэлектрического слоя алюминиевого основания;

– пропитка в вакууме;

– ступенчатое задубливание фоторезиста в порах диэлектрического слоя.

Для оценки качества заполнения пор диэлектрического слоя были проведены исследования электрофизических свойств толстослойного оксида алюминия [3].

На алюминиевые основания с диэлектрическим слоем напылялись металлизированные слои «ванадий-медь» общей толщиной от 3,0 до 3,5 мкм для формирования токопроводящего слоя.

Методом фотолитографии на напыленных слоях «ванадий–медь» формировалась фоторезистивная защитная контактная маска для последующего осаждения гальванической меди рис. 4.

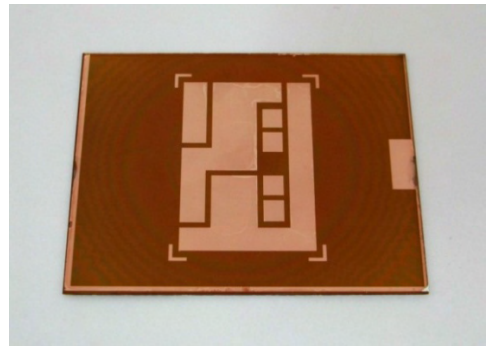
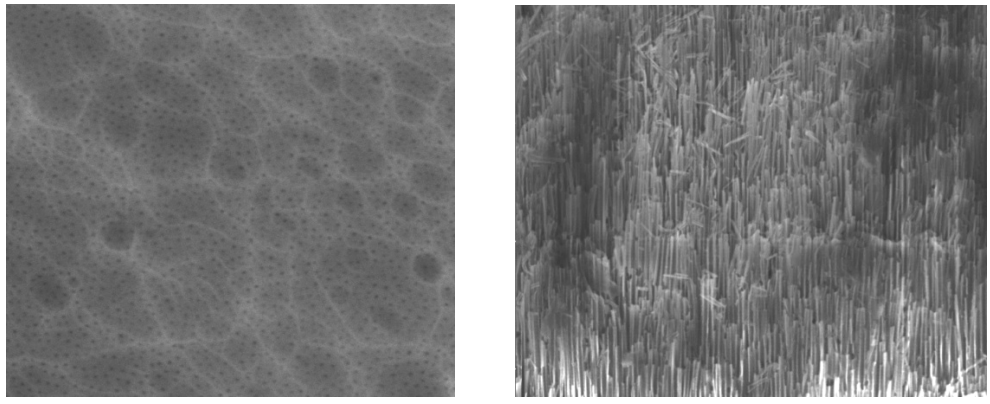


Рис. 4. Фоторезистивная защитная маска для гальванического меднения

Проводился процесс формирования толстослойного гальванического медного покрытия на алюминиевых основаниях. В результате проведенного процесса толщина гальванического медного покрытия составила не менее 30мкм. После окончания процессов удалялась защитная фоторезистивная маска [4].

Осуществлялся процесс формирования топологии платы на металлизированных слоях «ванадий–медь–гальваническая медь» методом фотолитографии рис. 5.



а б

Рис. 3. Оксид алюминия: а – поверхность оксида алюминия; б – структура оксида алюминия

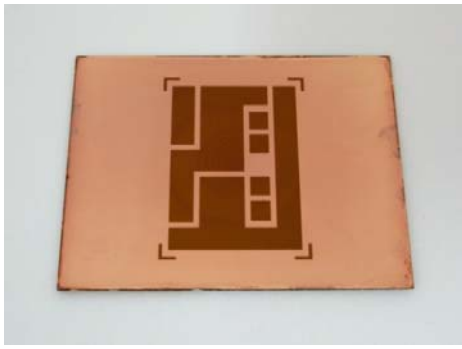


Рис. 5. Маска для травления тонкого слоя меди

На последнем этапе изготовления коммутационной платы проводился процесс травления слоев «ванадий–медь» в местах отсутствия фоторезистивной маски. После окончания процессов удалялась защитная фоторезистивная маска и проводилась термообработка изготовленной платы.

Изображение коммутационной платы на алюминиевом основание представлено на рис. 6.

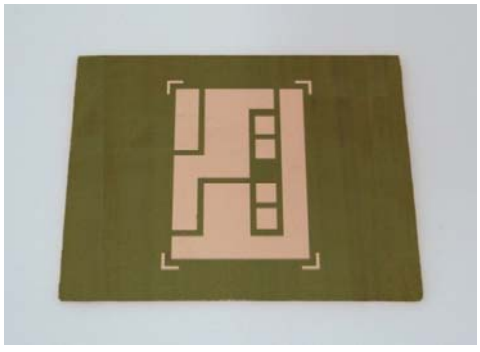


Рис. 6. Коммутационная плата на алюминиевом основании

Выводы

В процессе реализации данной работы использование эффективного сочетания микроэлектронных технологий, нанотехнологий и технологий изготовления печатных плат позволило создать замкнутый технологический процесс изготовления коммутационных плат на алюминиевых основаниях для приборов силовой электроники и разработать ряд производственных технологических процессов.

По данному технологическому процессу были изготовлены коммутационные платы на алюминиевых основаниях, которые прошли проверку на целостность электрических цепей и отсутствие короткого замыкания, проверку сопротивления изоляции между электрически несвязанными цепями и проверку электрической прочности платы. Электрическая прочность изоляции между элементами проводящего слоя и электрическая прочность изоляции диэлектрического слоя между элементами проводящего слоя и металлическим основанием соответствовала выставленным требованиям, т. е. пробой не происходил при нарастании испытательного напряжения или в ходе выдержки при испытательном напряжении.

Коммутационные платы, изготовленные по алюмооксидной технологии с применением уникального метода уплотнения пор, являются по термическим и электрофизическим характеристикам сопоставимыми с керамическими основаниями из нитрида алюминия. Платы, выполненные на алюминиевых основаниях, отличаются высокой термической прочностью, характеризуются возможностью их изготовления больших размеров с высокой плотностью монтажа.

Разработанная технология изготовления коммутационных плат на алюминиевых основаниях может быть использована при разработке и изготовлении радиоэлектронных приборов систем автоматики нового поколения, имеющих в своем составе радиоэлектронные модули с повышенным выделением тепла [5].

Литература

1. Томашев Н. Д., Тюкин М., Заливалов Ф. П. Толстослойное анодирование алюминия и алюминиевых сплавов. М.: Машиностроение, 1986.

2. Шрейдер А. В. Оксидирование алюминия и его сплавов. М: Металлургиздат, 1960.

3. Сокол В.А. Электрохимическая технология гибридных интегральных микросхем // Монография. Минск: Бестпринт, 2004.

4. Вайнер Я. В., Дасоян М. А. Технология электрохимических покрытий. Учебник для химических техникумов. Изд. 2-е. Л.: Машиностроение, 1972.

5. Сарпова Т. Е. Проведение комплекса работ по разработке технологий изготовления приборов автоматики нового поколения в условиях опытного производства // Отчет № 18.06.07.11.21.32.ОТ10-2018 29.10.2018.

ВАКУУМНОЕ НАПЫЛЕНИЕ ПРЕЦИЗИОННЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ЛЕГКОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ, ПОЛУЧЕНИЕ КАДМИЕВОГО ПОКРЫТИЯ С КОНТРОЛИРУЕМЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ТОЛЩИНЫ НА ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛИСИММЕТРИЧНОЙ ФОРМЫ

С. А. Сырвачев

ФГУП «Комбинат «Электрохимприбор», г. Лесной Свердловской обл.

Большой выбор материалов, используемых для создания покрытий, позволяет обеспечить заданные свойства поверхности для любых деталей современного машиностроения. Обычные конструкционные материалы не всегда способны удовлетворить требованиям условий эксплуатации. Применение более дорогих конструкционных материалов не всегда экономически целесообразно. Возникающие затруднения решаются при получении на рабочей поверхности покрытий, способных обеспечить требуемые эксплуатационные характеристики деталей. Незначительный расход материала, необходимый для нанесения покрытия обеспечил повышенный интерес к разработке методов нанесения покрытий целевого назначения и обширное внедрение покрытий в производственную практику.

Покрытие представляет собой целенаправленно создаваемый поверхностный слой детали, характеризующийся конечной толщиной, а также химическим составом и структурно-фазовым состоянием, качественно отличающимися от аналогичных характеристик материала основы.

В 2016 г. перед лабораторией материаловедения ФГУП «Комбинат «Электрохимприбор» была поставлена задача по нанесению прецизионного кадмиевого покрытия заданной геометрии на деталь типа полусфера. Материал подложки – сталь, с нанесенным подслоем меди толщиной от 2 до 5 мкм. Основными требованиями, которые предъявляются к прецизионному покрытию, являются: получение покрытия без отслоений, обеспечение требований по распределению толщины и плотности в заданных секторах поверхности детали с плавным переходом толщины от одного сектора в другой. Геометрия покрытия (рис. 1) задана его толщиной по секторам нанесения. Толщина покрытия варьируется от 25±2 мкм до 100±6 мкм. Сектора нанесения на внутреннюю поверхность заданы сферическими углами с точностью ±1 градус.

На первом этапе был проведен предварительный анализ и сравнение методов с целью выбора наиболее простого, экономичного, экологичного и оперативного при внедрении, исходя из которого был выбран метод термовакуумного напыления. Суть метода заключается в испарении под действием источника нагрева и дальнейшем осаждении металла на подложку в вакууме. Необходимо отметить, что так как данный вариант получения разнотолщинного покрытия по имеющимся публикациям не применяется, его необходимо было разработать вновь. Процесс происходит при непрерывном вращении детали вокруг собственной оси симметрии с применением внешнего привода, при этом расстояние от напыляемой поверхности до источника пара неизменно. Основными узлами рабочей установки являются: вакуумная камера, устройство напылительное и источник питания.

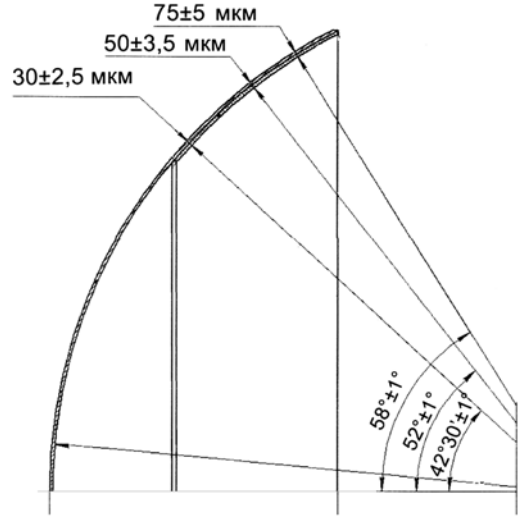


Рис. 1. Геометрия покрытия

Испаритель является основным объектом, участвующим в процессе вакуумного напыления покрытий. Для обеспечения требуемой толщины и распределения покрытия была применена монолитная, многотигельная конструкция испарителя. Кадмий в виде цилиндрических навесок массой от 0,56 до 0,68 г помещается в цилиндрический испаритель согласно схеме, показанной на рис. 2. Предварительная подготовка испаряемого материала включает в себя термовакуумную плавку и травление в азотной кислоте. В качестве материала испарителя был выбран молибден, так как обладает высокой теплопроводностью и термостойкостью, высокой эрозионной стойкостью, а также он не взаимодействует с кадмием.

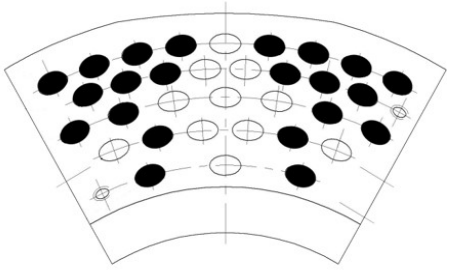


Рис. 2. Схема заполнения испарителя

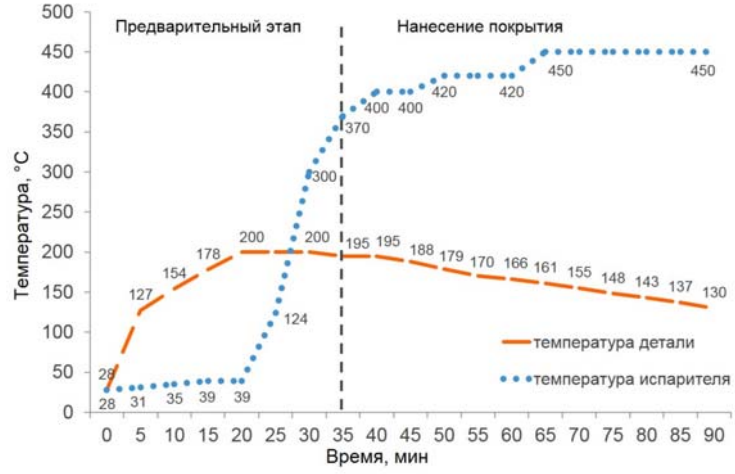


Рис. 3. Температурный режим нанесения покрытия

Нагрев испарителя производится бомбардировкой электронами, эмитируемыми с вольфрамовой спирали. Ток эмиссии составляет 150 мА. Нагрев сферической детали осуществлялся снаружи. В качестве метода нагрева детали также использовалась электронная бомбардировка, так как осуществлять, нагрев перемещающейся детали в вакууме с непосредственным контролем мощности другими способами невозможно. По сравнению с другими известными методами, например, резистивным, радиационным или нагревом током высокой частоты, она проще реализуется, обладает более высокой стабильностью, легче в управлении.

Результаты первых опытов по напылению были отрицательными. Происходило полное испарение навесок кадмия в тиглях с запылением стенок камеры и оснастки, а деталь при этом оставалась чистой. Чтобы добиться конденсации паров кадмия на поверхности детали, был разработан ряд технических решений, таких, как установка защитных экранов для минимизации попадания кадмия в камеру, а также предварительный подогрев детали перед напылением. В результате принятых решений и поиска оптимальной температуры детали для формирования покрытия опытным путем удалось выйти на режимы, при которых происходило напыление. Температурный режим нанесения покрытия показан на рис. 3.

Исходя из экспериментальных данных, для качественного осаждения покрытия необходимо обеспечить вакуум не хуже $2 \cdot 10^{-5}$ мм. рт. ст. Поскольку кадмий является легко летучим металлом, то при повышении температуры подложки происходит его реиспарение. Поэтому коэффициент конденсации кадмия (отношение числа атомов, осевших на поверхности детали, к числу атомов, достигших ее) уменьшается с повышением температуры. Опытным путем было обнаружено, что с изменением температуры подложки изменяется и структура получаемого покрытия. Так при повышении температуры подложки от 125 °С до 180 °С увеличивается размер зерен кадмия, а цвет получаемого покрытия изменяется от светлого серебристого до серого. При температуре подложки от 180 °С до 200 °С за счет интенсивного реиспарения не удалось получить требуемую толщину покрытия. Однако, было замечено, что с увеличением температуры подложки увеличивается прочность сцепления покрытия с подложкой. Поэтому было принято решение установить температуру подложки для начала формирования покрытия в пределах от 190 °С до 200 °С на первые 2 минуты с дальнейшим постепенным уменьшением температуры до 125 °С–130 °С.

Важным параметром процесса является температура испарителя. Для обеспечения достаточно интенсивного потока кадмия из испарителя, необходимого для начала формирования видимого покрытия при указанной выше температуре подложки, следует поднять температуру испарителя до 370–380 °С. По достижении температуры испарителя, соответствующей началу процесса, следует уменьшить нагрев до 5–6 град/мин до достижения температуры 400 °С. Далее следует произвести выдержку испарителя на температуре 400±5 °С в течение последующих 10 минут. Это делается во избежание возникновения капельного переноса кадмия из испарителя на поверхность детали с последующим образованием дефектов.

Описанный способ нанесения кадмиевого покрытия методом прецизионного вакуумного напыления опробован в производстве, способ оптимален с экологической точки зрения и позволяет получать покрытия детали типа полусфера с заданной контролируемой толщиной и требуемым распределением слоя по напыляемой поверхности. КПД осаждения кадмия на рабочей поверхности составляет 70 %.

Данный способ явился основанием для подачи заявки на изобретение № 2018102490 от 22.01.2018 г.

СОЗДАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КРЕМНИЕВЫХ РАДИАЦИОННО СТОЙКИХ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОАКСЕЛЕРОМЕТРА ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНОЙ СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ

А. Н. Ухов, О. В. Баранова, С. В. Кононов

Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю. Е. Седакова», г. Нижний Новгород

Введение

Разработка современных перспективных приборов системы телеметрии требует применения передовых технологий и датчиков, в том числе прецизионных линейных акселерометров. В связи с постоянным уменьшением массогабаритных показателей перспективных приборов наиболее актуальными считаются кремниевые акселерометры, изготовленные по технологии микросистемной техники (далее МСТ).

Создаваемая в рамках направления МСТ продукция характеризуется инновационностью, наукоемкостью, конкурентоспособностью, передовыми характеристиками, широким рынком потребления.

В 2015 году в филиале ФГУП РФЯЦ ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю. Е. Седакова» (НИИИС) был создан участок изготовления серийных изделий МСТ. В настоящее время на нем изготавливаются различные чувствительные элементы микроэлектромеханических систем – преобразователи внешних физических воздействий в электрический сигнал. В номенклатуру изготавливаемых на участке изделий входят чувствительные элементы датчиков давления, гироскопов и акселерометров. Одним из приоритетных направлений развития участка является изготовление чувствительных элементов микроакселерометров (ЧЭ МА) вибрационно-частотного типа, разрабатываемых для применения в перспективной системе телеметрии. Данные ЧЭ МА имеют высокую точность измерения линейного ускорения, высокую стойкость к радиационному воздействию, высокую добротность, стабильность и воспроизводимость характеристик, которые обеспечиваются работой чувствительного элемента в условиях вакуума.

Разработка технологии изготовления ЧЭ МА

Существуют два основных направления в технологии изготовления чувствительных элементов для изделий МСТ: технология поверхностной микромеханики и технология объемной микромеханики.

В первом случае элементы конструкции располагаются на поверхности кремниевой пластины и формируются последовательно, слой за слоем.

Во втором случае элементы конструкции чувствительного элемента располагаются в объеме кремния и имеют развитую 3D структуру.

ЧЭ МА, представленные в данной работе, выполнены по технологии объемной микромеханики.

Разработанная технология включает в себя следующие основные блоки: подготовка пластин (утонение, шлифовка, полировка) [1], формирование выемок в пластине-основании (анизотропное плазмохимическое травление Si), гидрофильное сращивание пластины-основания и пластины с рабочим слоем, формирование металлических контактных площадок и соединений, формирование подвижной структуры в рабочем слое толщиной 100 мкм, (анизотропное плазмохимическое травление Si).

При использовании технологии сращивания рабочий слой ЧЭ МА с подвижными элементами формируется в одной пластине, а другая пластина является основанием с вытравленными полостями, обеспечивающими перемещение подвижных частей рабочего слоя. Рассмотрим подробнее технологию сращивания кремниевых пластин, основные преимущества которой приведены ниже.

1. Изготовление изделий МСТ с конструктивными элементами, недоступными для других технологий.

2. Отсутствие необходимости перфорации элементов конструкции ЧЭ МА для вытравливания жертвенного слоя, использующегося в технологиях поверхностной микромеханики.

3. Герметизация (корпусирование) на уровне пластины. При использовании технологий создания газопоглотителей (геттеров) становится возможным добиться вакуума в объеме, герметизируемом на уровне пластины. Данный технологический блок находится на стадии отработки в НИИИС.

4. Наличие выемок под подвижными элементами ЧЭ МА исключает вероятность возникновения эффекта прилипания.

5. Возможность трехмерной интеграции ЧЭ МА и схемы обработки на основе КМОП на уровне пластины, что позволяет изготавливать пластины раздельно и объединять только в конце маршрута.

По критериям стабильности получаемых соединений, доступности материалов и их совместимости с КМОП технологией определена приоритетность

способа непосредственного гидрофильного сращивания пластин. Данный процесс заключается в приведении очень чистых и гладких кремниевых пластин в контакт при комнатной температуре и последующем их отжиге. Для обеспечения гидрофильного сращивания обе поверхности либо одна из них должна содержать слой SiO_2.

Механизм сращивания заключается в трансформации слабых межповерхностных взаимодействий в ковалентную химическую связь при отжиге [2].

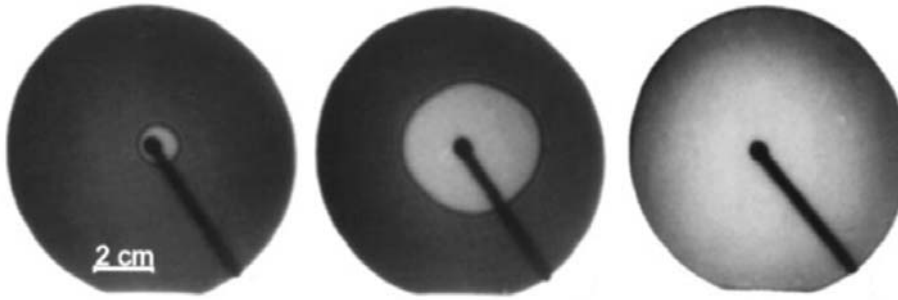
При непосредственном сращивании первичный контакт поверхностей осуществляется за счет слабых взаимодействий, на один-два порядка слабее ковалентного взаимодействия. Это главным образом взаимодействие через водородные связи и взаимодействие Ван-дер-Ваальса. Для наблюдения процесса первичного контакта пластин при комнатной температуре используют просвечивание пластин в инфракрасном (ИК) свете, с использованием камеры, чувствительной к длинам волн 0,9–1,7 мкм. Кремниевые пластины приводят в контакт, после чего слабым надавливанием в какой-либо точке инициируют начало сращивания (рис. 1). При этом по скорости продвижения волны сварки можно судить о качестве соединяемых поверхностей и поверхностной энергии.

Гидрофильная поверхность Si покрыта слоем SiO_2. Гидрофильность поверхности обеспечена поляризованностью гидроксогрупп OH, входящих в состав силаноловых групп Si-OH. Самым распространенным способом улучшения гидрофильности поверхности является обработка в перикисно-аммиачном растворе (ПАР). Как правило, используется раствор в следующей концентрации NH_3:H_2O_2:$5H_2O$. Температура обычно составляет 75°C.

Когда поверхности приводятся в контакт, молекулы воды формируют «мостик» между поверхностями (рис. 2а). При отжиге молекулы воды растворяются в окружающем материале, диффундируют во внешнюю среду по границе раздела, либо реагируют с кремнием, образуя новые силаноловые группы Si-OH. При полном удалении молекул воды, поверхности оказываются соединены только через силаноловые группы (рис. 2б). При дальнейшем отжиге силаноловые группы контактирующих поверхностей взаимодействуют между собой следующим образом:

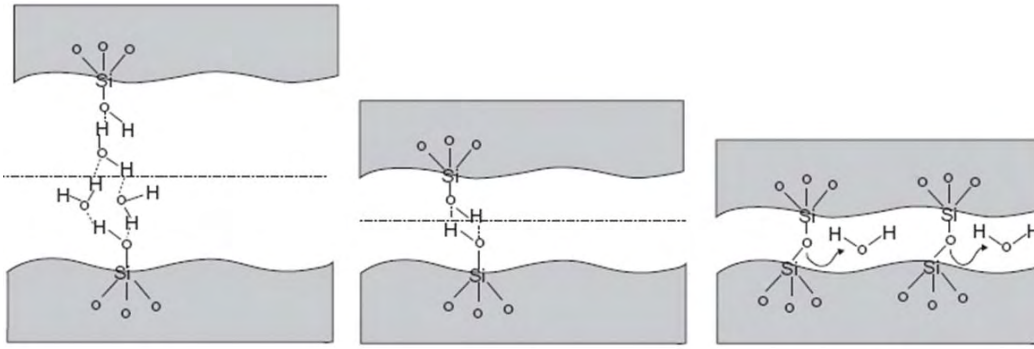
$$Si–OH + Si–OH = Si–O–Si + H_2O \qquad (1)$$

Образовавшиеся в результате реакции молекулы воды диффундируют в SiO_2 (рис. 2в). Если молекулы



$t = 0$ с $t = 2$ с $t = 5$ с

Рис. 1. Продвижение волны сварки при первичном соединении 100 мм кремниевых пластин при комнатной температуре, наблюдаемое с помощью камеры ИК-диапазона



а б в

Рис. 2. Схема образования непосредственного соединения пластин через гидрофильные поверхности: а – первичное состояние после приведения поверхностей в контакт; б – формирование связей через силаноловые группы; в – формирование конечных связей

воды достигают поверхности кремния, то происходит окисление кремния согласно реакции:

$$Si + 2H_2O = SiO_2 + 2H_2 \quad (2)$$

На одной поверхности формируется слой термического SiO_2, а на другой естественного – в таком случае реакция окисления идет достаточно быстро из-за малой толщины естественного оксида. Толщина слоя термического оксида должна быть не менее 50 нм. Это обусловлено необходимостью растворения водорода в слое SiO_2. В противном случае образуются пустоты, обычно наблюдаемые при инспекции сборки с помощью ИК камеры или сканирующего акустического микроскопа. В общем случае количество SiO_2, необходимое для полного растворения H_2 определяется количеством адсорбированной на контактирующих поверхностях воды. Содержание воды может быть отрегулировано изменением гидрофильности поверхности или сращиванием в вакууме.

Эта технология используется в частности при разработке и создания систем навигации: акселерометров и гироскопов [3].

На рис. 3 представлены результаты сращивания пластин с ЧЭ МА, полученные с помощью акустического микроскопа. Контроль проводится для оценки качества сращивания в процессе производства. Серые области на фотографии – выемки в пластине-основании.

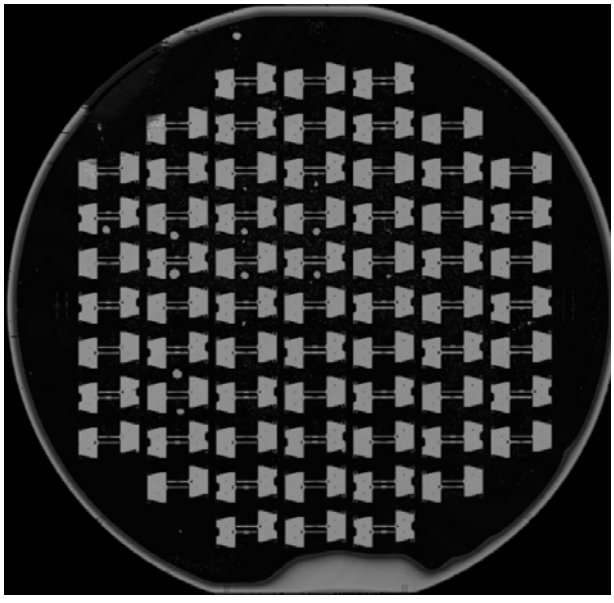


Рис. 3. Фотография пластины с ЧЭ МА после операции сращивания

Фотография скола пластин с ЧЭ МА, полученных с помощью непосредственного гидрофильного сращивания, представлена на рис. 4. Толщина слоя SiO_2 составила 83 нм.

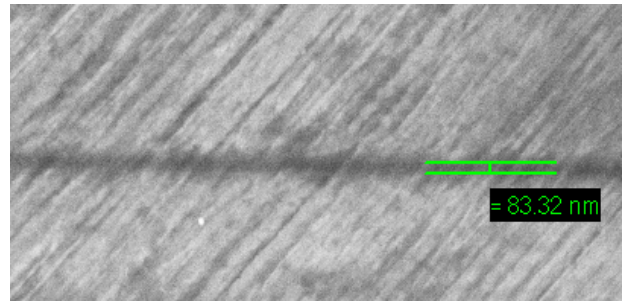


Рис. 4. Скол кремниевых пластин, соединенных через слой SiO_2

Непосредственное гидрофильное сращивание чрезвычайно требовательно к чистоте и качеству поверхностей. Это обусловлено короткодействующим характером сил, ответственных за приведение поверхностей в первичный контакт. Основными геометрическими параметрами пластин, влияющих на качество сращивания, являются волнистость и шероховатость. Для качественного сращивания необходимо обеспечить среднеарифметическую шероховатость Ra = 0,5 нм, хотя при определенных условиях гидрофильное сращивание может происходить и при шероховатости Ra ≈ 2 нм [4].

Необходимые для качественного выполнения гидрофильного сращивания значения волнистости и шероховатости кремниевых пластин достигаются внедрением в технологический маршрут изготовления ЧЭ МА операции химико-механической полировки. Разработанные режимы данной операции позволили получить значение шероховатости пластин монокристаллического кремния КЭФ 4,5 порядка Ra = 0,5 нм.

Помимо исключительно механических факторов, на процесс непосредственной гидрофильной сварки существенно влияют химические загрязнения. Для получения прочных соединений необходимо проводить химическую обработку перед соединением пластин.

С целью обеспечения необходимых требований по качеству поверхностей пластин в технологический маршрут изготовления ЧЭ МА были введены операции химической обработки пластин в смеси Каро и ПАРе непосредственно перед процессом гидрофильной сварки. Межоперационное время составляет не более 2 часов.

Существенным недостатком стандартного гидрофильного сращивания является необходимость применения высокотемпературного отжига с температурой 1000–1100 °С. Поскольку приборный слой ЧЭ МА составляет 100 мкм использование в технологическом маршруте высокотемпературного отжига может привести к созданию дополнительных внутренних механических напряжений соответственно к деформации приборного слоя и искажению параметров ЧЭ МА [5].

В разработанном технологическом маршруте температура отжига снижена до 400 °С за счет при-

менения предварительной плазменной активации поверхности кремниевых пластин в плазме N_2. Обработка в плазме поверхностей кремниевых пластин перед сращиванием вызывает следующие эффекты:

– удаление поверхностных загрязнений и увеличение энергии адгезии за счет создания нарушенных связей;

– увеличение количества силаноловых групп;

– увеличение скорости диффузии воды через SiO_2;

– увеличение «вязкости» SiO_2 при относительно низких температурах.

Технологический маршрут изготовления ЧЭ МА с приведен в таблице. Согласно данному маршруту была разработана маршрутная карта.

Технологический маршрут изготовления ЧЭ МА

1	Формирование партии
1.1	Утонение до толщины 420 мкм
1.2	Осаждение CVD SiO_2, d = 1,0 мкм
2	Формирование знаков
2.1	ФЛГ «Знаки»
2.2	ПХТ SiO_2 до Si
2.3	АПХТ Si на глубину 1,5±0,5 мкм
2.4	Удаление SiO_2
3	Формирование выемок
3.1	ФЛГ «Выемки»
3.2	ПХТ SiO_2 до Si
3.3	АПХТ Si на глубину 50±5 мкм
3.4	Удаление SiO_2
4	Сращивание
4.1	Химическая обработка
4.2	Мегазвуковая обработка
4.3	Плазменная активация пластин
4.4	Совмещение пластин по базовому срезу
4.5	Отжиг 400 °С
4.6	Утонение рабочего слоя до 100 мкм
5	Формирование металлизации
5.1	ФЛГ «Контактные площадки»
5.2	Травление Al
6	Формирование рабочего слоя
6.1	ФЛГ «Рабочий слой»
6.2	АПХТ Si до слоя SiO_2

Графическое представление технологического маршрута приведено на рис. 5.

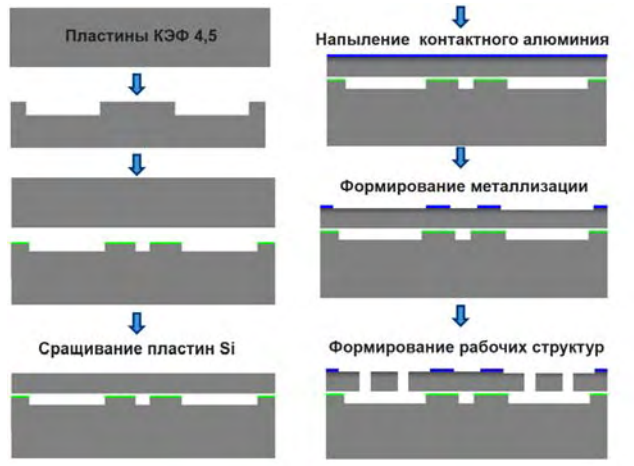


Рис. 5. Графическое представление технологического маршрута изготовления ЧЭ МА.

По данному технологическому маршруту были изготовлены несколько экспериментальных партий с ЧЭ МА. Выходных годных составил 64 %.

Проведение исследований ЧЭ МА

После изготовления экспериментальных образцов были проведены исследования и испытания ЧЭ МА. Для этого были разработаны программа и методики испытаний, включающие подтверждение расчетных характеристик, стойкость к механическим, температурным воздействиям, а также радиационному воздействию.

Для проведения исследований было разработано и изготовлено несколько единиц оснастки, которые позволили провести исследования ЧЭ МА в условиях вакуума 10^{-3} Па.

На рис. 6 приведены фотографии платы контроля и платы согласования, используемых в процессе исследований.

На рис. 7 показан процесс контроля характеристик ЧЭ МА с использованием вакуумной камеры и миниатюрного поворотного стенда.

В ходе проведения исследований были подтверждены расчетные характеристики ЧЭ МА (резонансная частота, масштабный коэффициент, добротность). Экспериментальные образцы ЧЭ МА успешно прошли все виды испытаний, установленных в техническом задании, включая испытания на стойкость к радиационному воздействию, подтвердили сохранение работоспособности в диапазоне температур от минус 60 до плюс 85 °С. Деградации параметров не выявлено.

Выводы

Коллективом авторов выполнен значительный объем работ по созданию современной наукоемкой

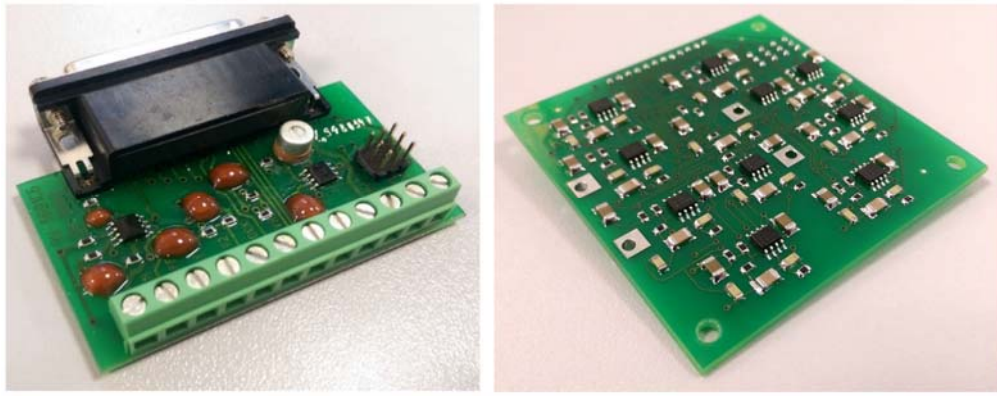


Рис. 6. Оснастка для проведения исследований ЧЭ МА

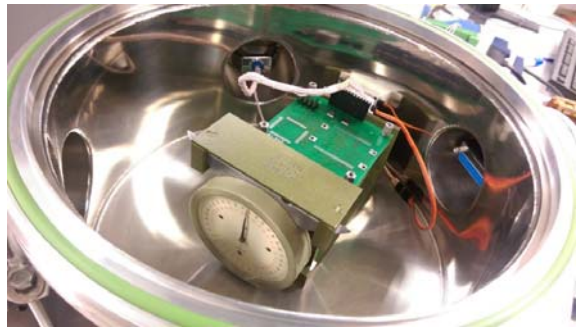


Рис. 7. Проведение исследований ЧЭ МА с использованием вакуумной камеры

технологии изготовления кремниевых ЧЭ МА, обеспечивающей высокую точность согласования расчетных моделей с результатами проведенных экспериментальных исследований. Подтверждена возможность изготовления кремниевых чувствительных элементов для высокоточных акселерометров нового поколения по технологии сращивания пластин с толщиной приборного слоя 100 мкм. Ключевыми операциями в разработанном технологическом маршруте стали утонение, шлифовка, химико-механическая полировка, анизотропное плазмохимическое травление Si, гидрофильное сращивание.

Изготовлены экспериментальные образцы ЧЭ МА, успешно проведены исследования и испытания. Проведенные испытания подтвердили все установленные требования к ЧЭ МА.

Литература

1. Никифорова-Денисова С. Н. Механическая и химическая обработка. М.: Высшая школа, 1989.

2. Tong Q.-Y., Gosele U. Semiconductor Wafer Bonding: Science, Technology. Wiley, New York. 1998.

3. Гироскопы и акселерометры для систем навигации. Тематическая подборка. М.: 2011. № 11/870117.

4. Шапорин А. Несколько технологий для высокоточных элементов МЭМС. Fraunhofer, 2011.

5. Hiller1 K., Hahn1 S., Kuchler M., Gebner T. MEMS technology for fabrication of electrostatic actuators and application examples // Zentrum fur ikrotechnologien, Reichenhainer Str. 70, 09126.

ТРАНСПОРТНЫЙ УПАКОВОЧНЫЙ КОМПЛЕКТ ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ЖИДКОГО ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

С. Ф. Долбищев, А. В. Бондарев, Е. В. Чесноков

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

В ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» на базе усовершенствованного растворного ядерного реактора «Аргус-М» разрабатывается комплекс для получения медицинского радиоактивного изотопа молибден-99. Из всех продуктов ядерной медицины изотоп молибден-99 является наиболее востребованным, поскольку занимает около 80 % данного рынка услуг.

Молибден-99 используется для производства генераторов технеция-99 – основного диагностического радионуклида современной ядерной медицины. С помощью технеция-99 методом однофотонной эмиссионной компьютерной томографии в настоящее время диагностируется большое количество онкологических и сердечно-сосудистых заболеваний.

Несмотря на то, что в России и за рубежом действуют растворные реакторы, работающие на жидком отработавшем ядерном топливе(ОЯТ), технологий и контейнеров для транспортирования жидкого ОЯТ практически нет. Единственным аналогомявляется контейнер, разработанный ООО НПФ «Сосна», который был использован для перевозки жидкого ОЯТ из Узбекистана в Россию. При этом перевозимое топливо имело низкую активность.

В процессе работы комплекса образуется несколько видов радиоактивных отходов: твердые, газообразные и жидкие. Объем жидкого ОЯТ составляет 30 л.

Несмотря на то, что топливо в реакторе подлежит замене каждые 10 лет, ТУК для его хранения и транспортирования должен быть разработан и изготовлен еще до запуска комплекса.

Основная часть

Проанализировав требования технического задания, были определены основные конструктивные особенности транспортного упаковочного комплекта (ТУК-164):

– внутренняя полость корпуса демпфирующего должна быть рассчитана на размещение одного контейнера;

– ТУК должен быть оснащен твердой биологической защитой от фотонного и нейтронного излучения;

– материал наружных поверхностей корпуса контейнера – коррозионностойкая сталь;

– конструкция контейнера должна обеспечивать возможность подъема и переноса в вертикальном положении;

– конструкция ТУК при его перевозке железнодорожным транспортом, должна удовлетворять условиям прочности и жесткости.

В рамках работы по проекту «Аргус-М» был разработан ТУК-164 предназначенный для безопасной перевозки и временного хранения жидкого ОЯТ с соблюдением требований [1–4].

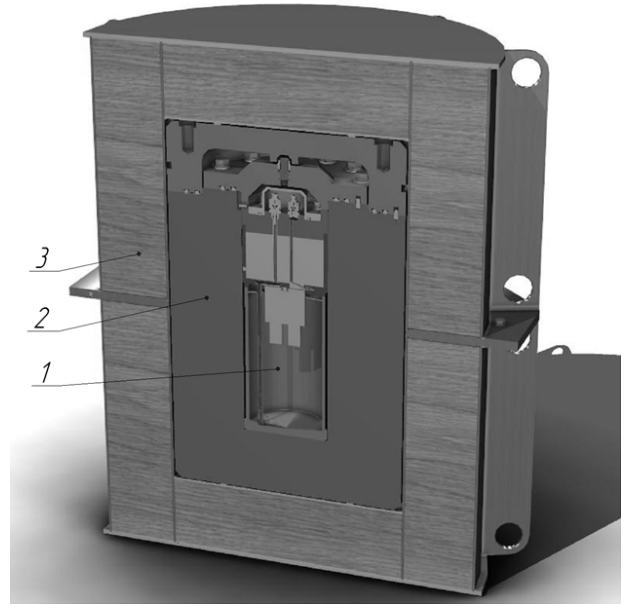


Рис. 1. Транспортный упаковочный комплект ТУК-164:
1 – пенал; 2 – контейнер; 3 – корпус демпфирующий

Конструкция ТУК-164 (рис. 1) обеспечивает:

– загрузку жидкого ОЯТ из корпуса реактора;

– перевозку жидкого ОЯТ железнодорожным, автомобильным, морским и речным транспортом;

– защиту радиоактивного содержимого от внешних воздействий в нормальных и аварийных условиях транспортирования и хранения;

– временное технологическое хранение жидкого ОЯТ (до 1 года);

– радиационную безопасность обслуживающего персонала, населения и окружающей среды;

– исключение выхода радиоактивного содержимого в окружающую среду выше установленных пределов согласно правилам [1, 4];

– ядерную безопасность при нормальной эксплуатации и в аварийных ситуациях.

ТУК-164, в соответствии с рис. 1, состоит из корпуса демпфирующего, контейнера и пенала.

Корпус демпфирующий состоит из двух половин, скрепляемых между собой крепежными элементами. Внутренняя полость корпуса заполнена деревом, пропитанным специальным составом, повышающим антисептическую и противопожарную стойкость. Так же для повышения противопожарной стойкости поверхность дерева обклеена тканью МБОР. К наружной цилиндрической поверхности приварены восемь ребер.

Контейнер предназначен для размещения в нем пенала с жидким ОЯТ.

Контейнер защитный состоит из корпуса 1, крышки наружной 2 и крышки внутренней 3 (рис. 2).

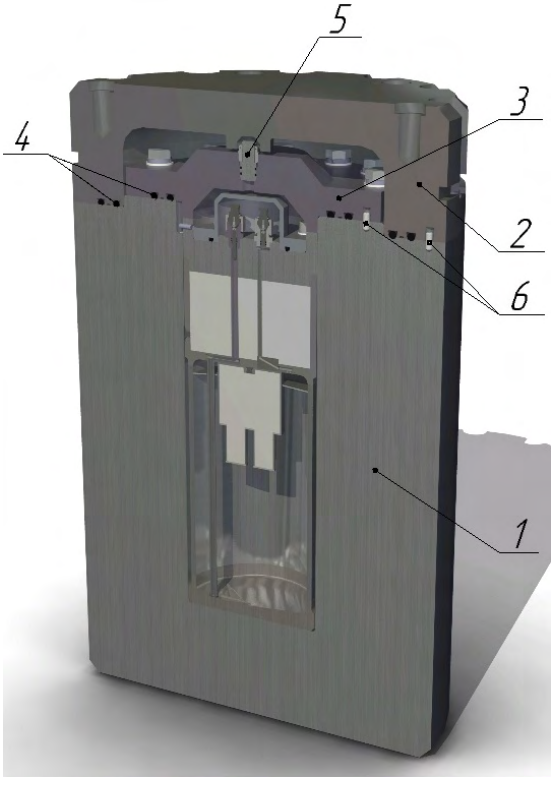


Рис. 2. Контейнер: 1 – корпус; 2 – крышка наружная; 3 – крышка внутренняя; 4 – уплотнительные кольца; 5 – заглушка; 6 – штифты

Корпус представляет собой массивный стакан, выполненный из нержавеющей стали. Помимо защиты от механических повреждений пенала массивная стальная оболочка также обеспечивает радиационную защиту.

В верхней части контейнера устанавливаются наружная 2 и внутренняя крышки 3. В каждой крышке имеются по два кольцевых паза, имеющих форму «ласточкиного хвоста». Для проверки на герметичность уплотнительных колец 4, без вскрытия контейнера, в корпусе контейнера предусмотрено два канала. Внутренняя крышка имеет отверстие для проверки полости контейнера на герметичность. После проверки на герметичность в отверстие устанавливается заглушка 5.

Пенал (рис. 3) представляет собой сосуд, состоящий из днища 1, цилиндрической обечайки 2 и массивного колпака 3. В верхней части пенала устанавливается защитная крышка 4, защищающая топливный 5 и газовый 6 штуцеры. Штуцеры снабжены герметизирующими пробками 7.

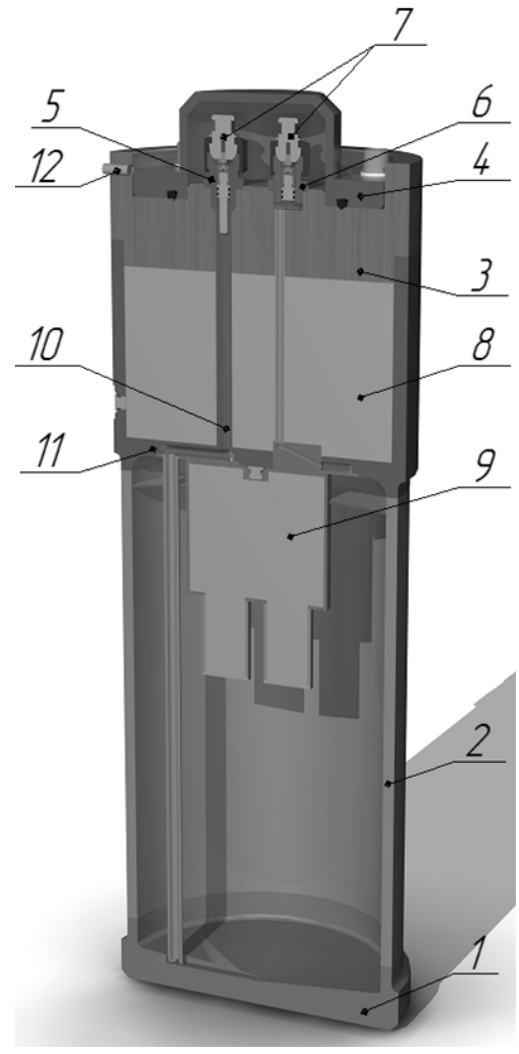


Рис. 3. Пенал: 1 – днище; 2 – обечайка; 3 – колпак; 4 – защитная крышка; 5 – штуцер топливный; 6 – штуцер газовый; 7 – пробка; 8 – защита; 9 – защита; 10 – канал; 11 – переборка; 12 – штифт

Для уменьшения уровня гамма излучения на наружной торцевой поверхности горловины, до безопасного уровня в верхнюю часть корпуса закладывается защита 8, выполненная из свинца марки С1. Кроме того, в верхней части внутренней полости

пенала установлена дополнительная радиационная защита 9, расположенная напротив каналов штуцера топливного и штуцера газового.

Канал подвода и отвода ОЯТ 10 выполнен составным, при этом оси трубок смещены и каналы трубок сообщаются друг с другом через имеющийся канал в переборке 11. Патрубок газовый в нижней части колпака пенала имеет переходник с угловым каналом, входящего в имеющуюся полость переборки 11 и закрытого перфорированной крышкой со стороны нижней части корпуса, предотвращающей попадание жидкого ОЯТ в патрубок газовый.

Объем внутренней полости пенала составляет 6,3 $дм^3$.

Использование ТУК-164 по назначению осуществляется следующим образом:

– устанавливают ТУК-164 на ровную поверхность и снимают верхнюю часть;

– закручивают в наружную крышку контейнера два рым-болта и транспортируют его в помещение для загрузки жидким ОЯТ;

– установив контейнер, снимают наружную и внутреннюю крышки контейнера, защитную крышку пенала и пробки штуцеров топливного и газового;

– подсоединяют к штуцеру газовому трубопровод системы вакуумирования, к штуцеру топливному трубопровод системы подачи жидкого ОЯТ;

– обслуживающий персонал покидает помещение;

– дистанционно включают систему вакуумирования и создают в полости пенала разряжение;

– дистанционно включают систему подачи жидкого ОЯТ;

– после заполнения пенала жидким ОЯТ для дезактивации трубопровода подачи жидкого ОЯТ подают дезактивирующий раствор. От штуцера газового отсоединяют трубопровод для вакуумирования и устанавливают на него герметизирующую пробку. Затем от штуцера топливного отсоединяют трубопровод подачи жидкого ОЯТ и устанавливают на него герметизирующую пробку;

– устанавливают защитную крышку пенала, внутреннюю и наружную крышку контейнера, и пломбируют крепежные элементы;

– транспортируют и устанавливают контейнер в полость корпуса демпфирующего;

– соединяют две половины корпуса демпфирующего крепежными элементами и пломбируют.

Заключение

По результатам выполненной работы разработано РКД на ТУК-164. Проведены прочностные, радиационно-ядерные, тепловой расчеты и расчет утечек радиоактивного содержимого, которые показали, что конструкция пенала в составе транспортного упаковочного комплекта обеспечивает:

– загрузку жидкого ОЯТ поступающего из комплекса временного хранения;

– транспортирование ТУК с пеналом, содержащим жидкое ОЯТ автомобильным, железнодорожным и водным транспортом;

– защиту радиоактивного содержимого от внешних механических, термических и других воздействий в обычных и нормальных условиях транспортирования и хранения;

– радиационную безопасность обслуживающего персонала, населения и окружающей среды;

– ядерную и радиационную безопасность при нормальной эксплуатации, нарушениях нормальной эксплуатации, включая аварии.

Поданы ряд заявок на выдачу патента РФ на изобретения. В ближайшее время в рамках проекта «Аргус-М» будет изготовлен опытно-промышленный образец, будут проведены приемочные испытания, технологические «холодные» испытания на исследовательской ядерной установке и получен сертификат-разрешение на конструкцию упаковки.

Литература

1. НП-053-16. Правила безопасности при транспортировании радиоактивных материалов.

2. НП-061-05. Правила безопасности при хранении и транспортировании ядерного топлива на объектах использования атомной энергии.

3. НП-030-12. Основные правила учета и контроля ядерных материалов.

4. МАГАТЭ, № SSR-6. Правила безопасной перевозки радиоактивных материалов, 2012.

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗНАЧЕНИЙ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ КОРПУСА И ПАРАМЕТРОВ КОРПУСА, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ЭТИ ЗНАЧЕНИЯ

А. В. Проскурин, А. В. Шлишевский

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина», г. Снежинск Челябинской обл.

Введение

В работах [1, 2] приведен опыт использование модального анализа на базе МКЭ в сравнении с экспериментальными данными для верификации расчетных моделей, а также для идентификации собственных частот и форм колебаний различных конструкции. Основным недостатком данных работ является то, что приводятся расчетно-экспериментальные исследования без определения параметров влияющих на собственные частоты и формы колебаний конструкции, которые в некоторых задачах могут представлять практический интерес. При ударных и виброударных испытаниях конструкций практический интерес представляет оценка возможности влияния на реакцию конструкции при механическом воздействии, то есть определение параметров конструкции влияющих на ее реакцию. Этому и будет посвящена данная статья.

Объект исследований

В качестве объекта исследований был выбран корпус, представленный на рис. 1, имеющий практический интерес при ударных и виброударных испытаниях конструкций. Корпус изготовлен из алюминиевого сплава Д16 с механическими характеристиками: плотность $\rho = 2640$ кг/м^3, модуль Юнга $E = 0,72 \cdot 10^{11}$ Па, оэффициент Пуассона $\mu = 0,33$ [3]. В отверстия ввернуты стальные резьбовые втулки. Габаритные размеры корпуса: радиус описанной окружности – 290 мм, длина – 540 мм.

Как видно из рис. 1 корпус представляет собой конструкцию, состоящую из восьмигранных подкрепляющих фланцев, соединенных цилиндрическими оболочками с прямоугольными окнами. В корпусе используются подкрепляющие фланцы двух типов, отличающиеся величиной внутреннего диаметра, один фланец имеет внутренний диаметр d = 72 мм (фланец № 1), а три – d = 27 мм (фланец № 2). Толщина фланцев равна h = 35 мм.

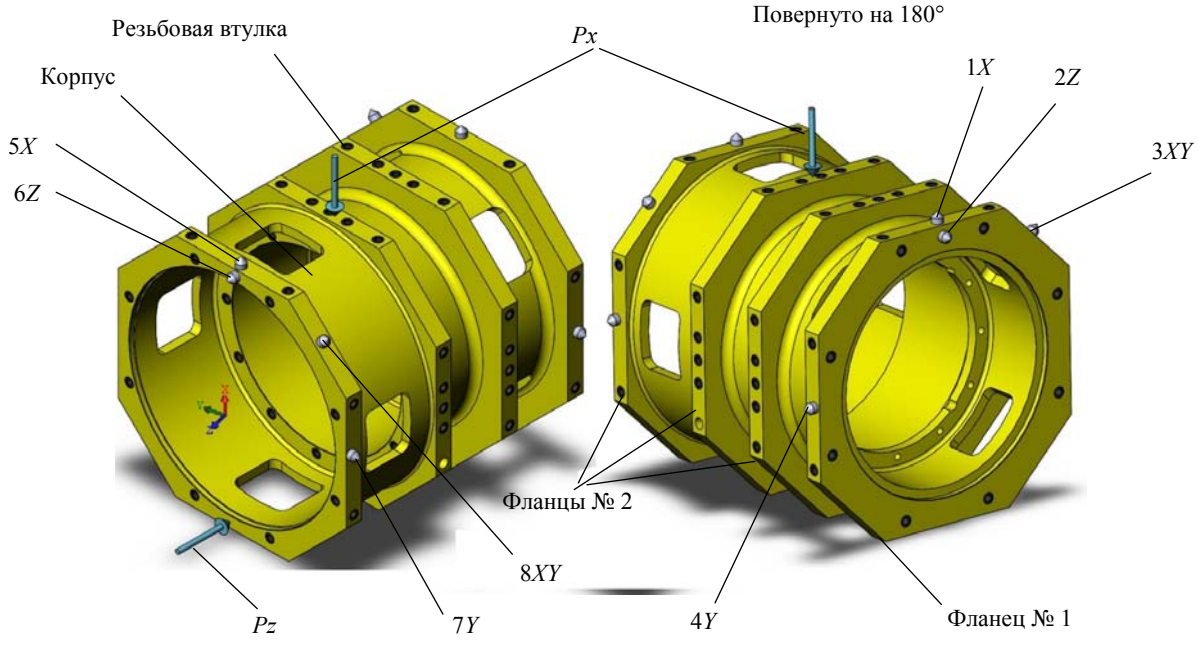


Рис. 1. Модель корпуса, места приложения нагрузки и устатановки пьезоакселерометров

Задачей исследования является нахождение значений собственных частот колебаний и параметров корпуса, влияющих на эти значения. Проводилось определение первых восьми частот собственных колебаний корпуса.

Расчетные исследования частот собственных колебаний корпуса

Определим собственные частоты корпуса с использованием метода конечных элементов (МКЭ).

Расчет проводился с использованием модуля для расчета собственных частот, при свободных граничных условиях корпуса.

В первых расчетах была проведена оценка влияния учета наличия резьбовых втулок, отверстий под резьбовые втулки, фасок и скруглений на собственные частоты корпуса. Отличие значений собственных частот колебаний корпуса без отверстий под резьбовые втулки, фасок и скруглений и корпуса с втулками, фасками и скруглениями составило не более 6 %. Учитывая незначительность отличия частот, дальнейшие расчеты проводились без учета наличия отверстий под резьбовые втулки, фасок и скруглений, что значительно уменьшило требования к вычислительным ресурсам. Конечно-элементная сетка генерировалась из гексагональных элементов с размером ребра 10 мм. В результате генерации сетки модель была разбита на 44621 элемент. После создания сетки была проведена оценка ее качества, в результате чего было определено, что конечно-элементная модель состоит преимущественно из 20-ти узловых шестигранных элементов HEX20, что является вполне приемлемым результатом.

Вычисленные с помощью МКЭ значения первых восьми собственных частот корпуса приведены в табл. 1 (второй столбец). На рис. 2–5 приведены некоторые формы колебаний корпуса на этих частотах.

Из рис. 2–5 видно, что одна часть собственных частот колебаний корпуса определяется колебаниями одного из его элементов, например, одного из фланцев (рис. 2–3), при этом другие элементы корпуса практически не деформируются. Другая же часть частот собственных колебаний определяется колебаниями нескольких элементов корпуса (рис. 4).

Нахождение параметров корпуса, определяющих значения частот собственных колебаний

Для нахождения параметров, определяющих значения собственных частот колебаний рассматриваемой конструкции, заменим ее конструктивные элементы более простыми по форме элементами, для которых найдены аналитические зависимости, определяющие собственные частоты колебаний, такими как круговые кольца, квадратные и круглые пластины, цилиндрическая оболочка. Начнем рассмотрение с круговых колец. В качестве наружного диаметра кольца примем среднее значение диаметра описанной окружности и диаметра вписанной окружности

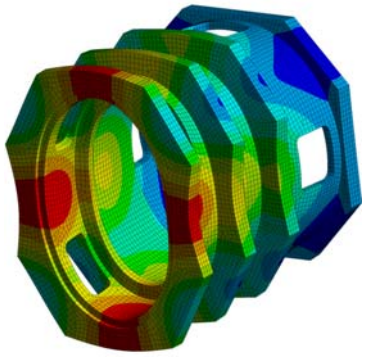


Рис. 2. f = 843,78 Гц

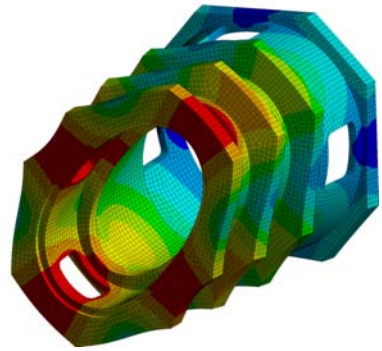


Рис. 3. f = 908,77 Гц

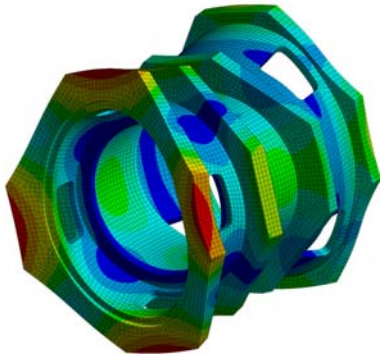


Рис. 4. f = 1016 Гц

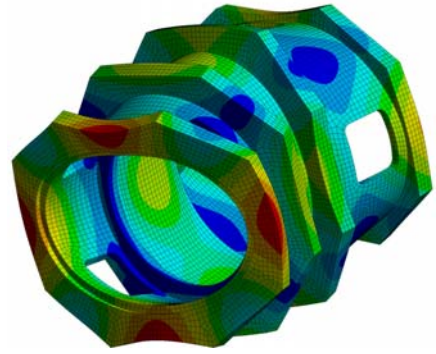


Рис. 5. f = 1081,5 Гц

в восьмиугольник. Таким образом, кольца, имеют внешний диаметр D = 550 мм, внутренние диаметры d = 472 мм (кольцо № 1 для фланца № 1) и d = 427 мм (кольцо № 2 для фланца № 2), толщину h = 35 мм.

Известно [4], что круговое кольцо может совершать несколько видов колебаний: колебания растяжения-сжатия, крутильные колебания, изгибные колебания в плоскости кольца и изгибные колебания, состоящие из перемещений перпендикулярных к плоскости кольца и кручения.

Частоты колебаний растяжения-сжатия определяются, согласно [4], по формуле

$$f_{\text{раст-сж}\,i}=\frac{a}{2\pi r}\sqrt{\left(1+i^2\right)},\qquad i=0,1,2,3... \qquad (1)$$

где $a=\sqrt{\frac{E}{\rho}}$ – скорость распространения звука в материале кольца; r – радиус центральной линии кольца; E – модуль упругости; ρ – плотность, i – число полуволн, расположенных по окружности.

Крутильные колебания кольца определяются, согласно [4], по формуле

$$f_{\text{кр}\,i}=\frac{a}{2\pi r}\sqrt{\left(1+i^2\right)\frac{J_x}{J_\rho}},\qquad i=0,1,2,3... \qquad (2)$$

где $J_x=\frac{(D-d)h^3}{24}$ – момент инерции поперечного сечения относительно своей главной оси, параллельной плоскости кольца; $J_z=\frac{(D-d)^3 h}{96}$ момент инерции поперечного сечения относительно своей главной оси, перпендикулярной плоскости кольца; J_P – полярный момент, определяемый как $J_P=J_x+J_z$.

Изгибные колебания в плоскости кольца определяются, согласно [4], по формуле

$$f_{\text{изг1}\,i}=\frac{a}{2\pi r}\sqrt{\frac{J_z}{Sr^2}\frac{i^2\left(1-i^2\right)^2}{\left(1+i^2\right)}},\quad i=2,3... \qquad (3)$$

где $S=\frac{(D-d)}{2}h$ – площадь поперечного сечения кольца.

Изгибные колебания, включающие как перемещения под прямым углом к плоскости кольца, так и кручение определяются согласно [4] по формуле

$$f_{\text{изг2}\,i}=\frac{a}{2\pi r}\sqrt{\frac{J_x}{Sr^2}\frac{i^2\left(i^2-1\right)^2}{\left(i^2+1+\mu\right)}},\quad i=2,3... \qquad (4)$$

где μ – коэффициент Пуассона.

Проведенные расчеты по формулам (1)…(4) показали, что низшие частоты колебаний колец определяются первыми двумя частотами для кольца № 1 и первой частотой для кольца № 2, формами изгибных колебаний в плоскости кольца и первыми формами изгибных колебаний, состоящих из перемещений перпендикулярных к плоскости кольца (334, 385, 1088Гц – кольцо № 1; 366, 664 Гц – кольцо № 2).

Колебания фланцев можно рассматривать также как колебания пластин со свободными по всему контуру краями. Частота собственных колебаний пластины определяется [4, 5] формулой

$$f_{пл}=\frac{1}{2\pi}\frac{\alpha}{r^2}\sqrt{\frac{D_{\text{Цил}}}{\rho h}}, \qquad (5)$$

где $D_{\text{Цил}}=\frac{Eh^3}{12\left(1-\mu^2\right)}$ – жесткость пластины на изгиб, h – толщина пластины, r –характерный размер пластины (радиус – для круглой пластины, размер стороны – для квадратной пластины), α – постоянная зависящая от формы колебаний. Для свободной круглой пластины радиуса $r=\frac{550+427}{4}=244,2$ мм и h = 35 мм (фланец № 2) и формы колебаний с двумя узловыми диаметрами (n = 2) и без узловых окружностей (s = 0) – α = 5,251, и соответственночастота колебаний равна $f_{\text{кр пл}}=783$ Гц ($f_{\text{кр пл}}=715$ Гц для фланца № 1 $r=\frac{550+472}{4}=255,5$ мм, h = 35 мм).

Для квадратной пластины со свободными краями стороной равной r = 488.4 мм и h = 35 мм (фланец № 2) и формы колебаний с двумя узловыми линиями, проходящими через середины сторон – α =14,1, соответственно частота колебаний равна $f_{\text{кв пл}}=526$ Гц ($f_{\text{кв пл}}=480$ Гц для фланца №1 при r = 511 мм и h = 35 мм).

Колебания корпуса можно рассмотреть, как колебания цилиндрической оболочки. Частоты собственных радиальных колебаний оболочки для случая одной полуволны n = 1 по ее длине могут быть рассчитаны по формуле В. Е. Бреславского [6]

$$f_{\text{рад. к.}\,i}=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{B}{mr}\cdot\frac{\left(1-\mu^2\right)\lambda^2+k\left(\lambda^2+i^2\right)^4}{\lambda^4+i^2\left(1+2\lambda^2\right)+i^4}}\quad i=2,3... \qquad (6)$$

$$B=\frac{E\delta}{1-\mu^2};\ \lambda=\frac{\pi r}{l};\ k=\frac{\delta^2}{12r^2}$$

где i – число узловых линий параллельно образующей, $\delta=\frac{D_0-d}{2}=17,5$ мм – толщина оболочки, D_0 – внешний диаметр оболочки, $m=\rho\delta$ – масса элемен-

та оболочки, $r = \frac{D_0 + d}{4} + \frac{\delta}{2} = 224$ мм – радиус оболочки, l=540 мм – длина оболочки.

Низшая частота радиальных колебаний оболочки (i = 2, n = 1) равна $f_{\text{рад. к.}}$ = 1147 Гц.

Результаты расчетов по формулам (3)…(6) сведены в столбце 5 табл. 1. Полученные частоты располагаются в тех строках табл. 1, для которых форма колебаний, показанная на рисунках 2…5, наиболее близка к форме колебаний рассматриваемого элемента.

Как следует из табл. 1 частоты собственных колебаний корпуса, полученные МКЭ, «соответствующие» формам изгибных колебаний в плоскости кольца достаточно хорошо совпадают с аналитическими решениями. Это можно объяснить следующим образом. Наличие цилиндрической оболочки, присоединенной к фланцу, можно учесть, увеличив толщину h кольца. В соответствии с (3) это не приведет к изменению частоты колебаний, так как соотношение $\frac{J_z}{S}$, останется неизменным.

Частоты собственных колебаний корпуса, полученные МКЭ, «соответствующие» формам изгибных колебаний из плоскости кольца значительно превышают результаты аналитического решения (4), особенно на первых формах колебаний. Это может быть объяснено тем, что цилиндрическая часть корпуса для фланца выступает в роли граничного условия, препятствуя движению сечений фланца в направлении перпендикулярном его плоскости. В тех случаях, когда эти граничные условия играют более важную роль в определении собственной формы колебаний, различия получаются более существенными.

Аналогичные рассуждения можно провести и при сравнении частот собственных колебаний корпуса, полученных МКЭ, и частот собственных колебаний пластин и цилиндрической оболочки.

Проанализируем зависимость полученных по (3)–(6) значений частот от параметров конструкции корпуса. Для этого перепишем формулы (3)–(6) в виде, раскрывающем зависимость получаемого значения частоты от параметров корпуса. Это материал корпуса, величины, описывающие фланцы: внешний (D)

Таблица 1

Собственные частоты и формы колебаний корпуса и соответствующие им собственные частоты колец

№ п/п	Собственные частоты корпуса, полученные с помощью МКЭ, Гц	№ рисунка	Форма колебаний упрощенных элементов	Частоты, полученные по аналитическим решениям, для упрощенных элементов, Гц	Пики спектра, Гц
1	463,93		Первая форма изгибных колебаний в плоскости кольца № 1	385	450…501 Фланец № 1
2	505,58		Первая форма изгибных колебаний из плоскости кольца № 1	334	450…501 Фланец № 1
3	843,78	2	Первая форма изгибных колебаний в плоскости кольца № 2	664	740…878 Фланец № 2
4	908,77	3	Первая форма изгибных колебаний из плоскости кольца № 2	366	740…878 Фланец № 2
5	1016	4	Колебания круглой пластины (фланец № 1 и фланец № 2) n = 2, s = 0, α = 5,251. Колебания квадратной пластины (фланец № 1 и фланец № 2) с двумя узловыми линиями, проходящими через середины сторон α = 14,1	783/526 (715/480)*	1073…1080 Фланец № 1
6	1074,3		Вторая форма изгибных колебаний в плоскости кольца № 1	1088	1073…1080 Фланец № 1
7	1074,4				
8	1081,5	5	Радиальные колебания цилиндрической оболочки (n = 1, q = 2).	1147	1073…1080 Фланец № 1
* – в скобках приведены значения частот для размеров фланца № 1.					

и внутренний (d) диаметры, толщины фланца (h), и величины, описывающие цилиндрическую оболочку: внешний (D_0) и внутренний (d) диаметры, длина корпуса (l). Формулы (3)–(6), соответственно, примут вид

$$f_{\text{изг1}\,i} = \frac{2}{\sqrt{3}\pi}\sqrt{\frac{E}{\rho}}\sqrt{\frac{i^2\left(1-i^2\right)^2}{1+i^2}}\frac{(D-d)}{(D+d)^2},\ i=2,3... \quad (7)$$

$$f_{\text{изг2}\,i} = \frac{4\sqrt{\frac{2}{3}}}{\pi}\sqrt{\frac{E}{\rho}}\sqrt{\frac{i^2\left(i^2-1\right)^2}{i^2+1+\mu}}\frac{h}{(D+d)^2},\ i=2,3... \quad (8)$$

$$f_{\text{пл}} = \frac{2h\alpha}{\pi(D+d)^2}\sqrt{\frac{E}{\rho}\frac{1}{12\left(1-\mu^2\right)}} \quad (9)$$

$$f_{\text{рад. к.}\,i} =$$

$$= \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{E}{\rho}\cdot\frac{1}{\frac{D_0+d}{4}(1-\mu^2)}\cdot\frac{(1-\mu^2)\left(\pi\frac{D_0+d}{4l}\right)^2+\frac{\left(\pi(D_0-d)\right)^2}{12}\cdot\left(\left(\pi\frac{D_0+d}{4l}\right)^2+i^2\right)^4}{\left(\pi\frac{D_0+d}{4l}\right)^4+i^2\left(1+2\left(\pi\frac{D_0+d}{4l}\right)^2\right)+i^4}}$$

$$i = 2,3... \quad (10)$$

Из полученных формул видно, что все частоты зависят от параметра $\sqrt{\frac{E}{\rho}}$, определяемого используемым материалом. Очевидно, что замена алюминиевого сплава сталью понизит частоты примерно на 3 %.

На рис. 6 приведены графики, иллюстрирующие зависимости значений частот от выбранного геометрического параметра корпуса (остальные параметры считаются неизменными). Изменение параметра задается в процентах от номинального значения.

Определим приближенные коэффициенты чувствительности значений частот колебаний к тому или иному параметру конструкции корпуса как частную производную соответствующей формулы по этому параметру, умноженной на величину параметра. Результаты вычислений для собственных частот, вычисленных по формулам (3)–(6) из табл. 1 приведены в табл. 2. Коэффициенты чувствительности для колец и пластин, для примера, определялись для фланца № 1

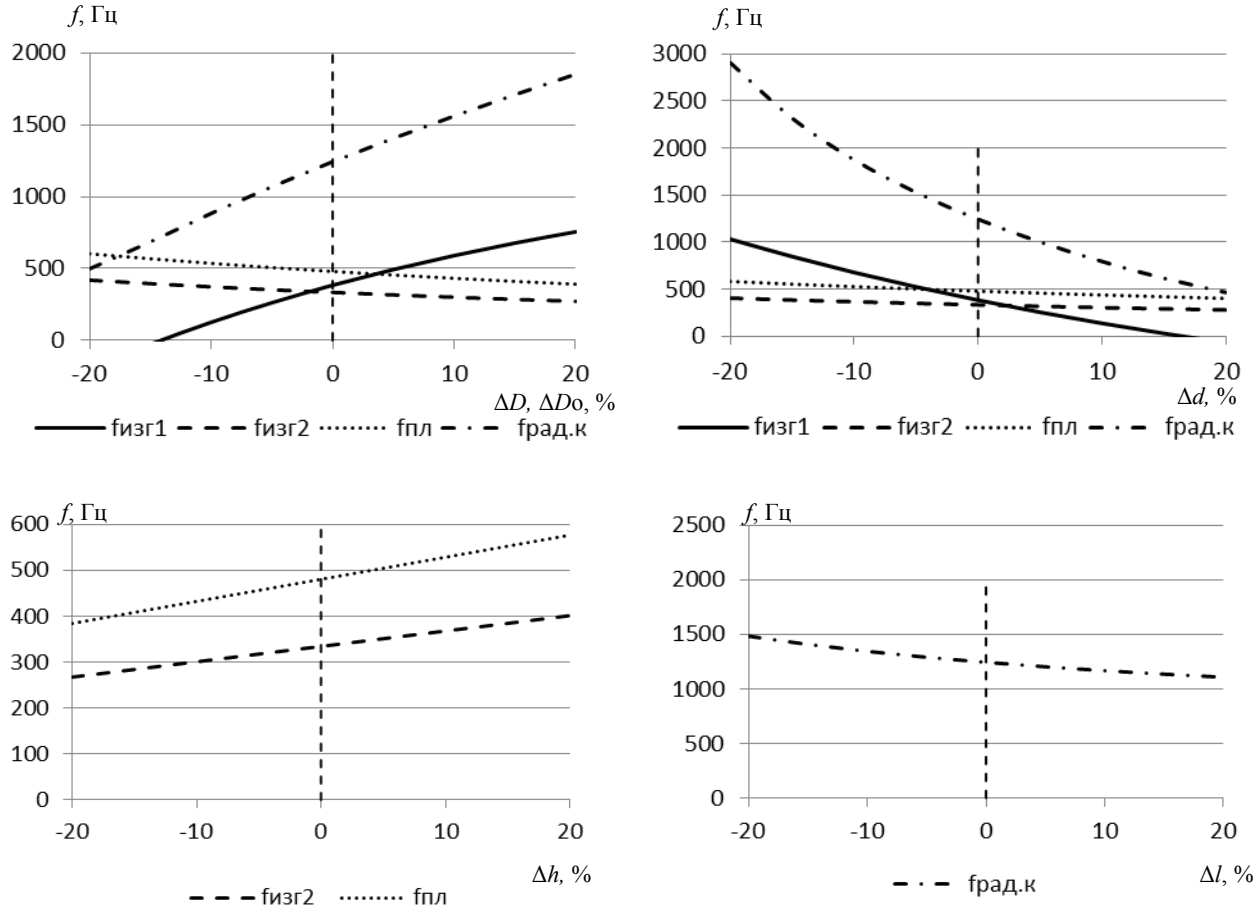


Рис. 6. Графики зависимости частот от изменения геометрического параметра корпуса

Таблица 2

Приближенные коэффициенты чувствительности

Вид колебаний	Параметр	Приближенный коэффициент чувствительности
Изгибные колебания в плоскости кольца, формула (3)	$\frac{(D-d)}{2}$	9.86
	h	0
	r	3
Изгибные колебания перпендикулярные к плоскости кольца, формула (4)	$\frac{(D-d)}{2}$	0
	h	9.5
	r	-2.6
Колебания пластин, формула (5)	h	13.7
	r	-1.9
Колебания цилиндрической оболочки, формула (6)	δ	44.1
	l	-2.8
	r	0.8

Из рис. 6 и табл. 2 видно, что:

– изменение величины внутреннего и внешнего диаметра колец, в большей мере влияет на частоту изгибных колебаний в плоскости кольца и частоту радиальных колебаний цилиндрической оболочки;

– частоты изгибных колебаний перпендикулярных к плоскости кольца и колебания пластин линейно зависят от толщины фланцев;

– на частоту радиальных колебаний цилиндрической оболочки заметно влияет ее длина.

Следует помнить, что частоты упругих тел, определяемые зависимостями (1)–(4), (6), зависят также от параметра i. То есть изменение одного размера элемента корпуса будет приводить к изменению нескольких частот собственных колебаний.

Экспериментальные исследования частот собственных колебаний корпуса

Для экспериментального определения собственных частот, корпус вывешивался на гибкой подвеске. Нагружение корпуса осуществлялось воздействием в виде механического удара с использованием маятниковой установки. P_x, P_z – точки приложения нагрузки (индекс указывает направление действия силы относительно осей корпуса). Точки приложения нагрузки представлены на рис. 1.

Для регистрации ускорений на корпусе были установлены 8 пьезоакселерометров-типа АП11 (коэффициент преобразования – 11±4 пКл/g, амплитуда регистрируемых ускорений – до 5000g, рабочий диапазон частот 2-15000 Гц) на клей-герметик ВГО-1. На рис. 1 показаны места установки пьезоакселерометров с условными обозначениями 1X, 2Z, 3XY, 4Y – на фланце № 2 и 5X, 6Z, 7Y, 8XY – на фланце № 1 (буква указывает направление оси чувствительности пьезоакселерометра относительно осей корпуса).

Для регистрациия сигнала с пьезоакселерометров использовался усилитель сигнала (номинальный предел преобразования зарядов Qв – $10 \cdot 10^4$ пКл, номинальные коэффициенты преобразования К – от 0,01 мВ/пКл до 10 В/пКл, верхняя граничная частота – 10 кГц) и аналого-цифровой преобразователь (АЦП) РСЦР2004 (пределы измерения входного напряжения - ±1, ±5 В, максимальная частота дискритизации на канал – 125 кГц).

В результате испытаний было проведено четыре нагружения: два по оси Y (опыты № 1, 2) и два по оси Z (опыт № 3, 4). Регистрация сигналов с пьезоакселерометров осуществлялась с верхней граничной частотой $f_{\text{В}}$= 10 кГц. После регистрации, для устранения промышленной частоты 50 Гц, сигналы фильтровались с нижней граничной частотой фильтрации $f_{\text{НЧ}}$ =50 Гц цифровым фильтром Баттерворта 4-го порядка.

Характерный вид зарегистрированного пьезоакселерометром сигнала приведен на рис.7. Спектральная плотность этого сигнала приведена на рис. 8. Сигналы пьезоакселерометров имеют длительность порядка 50 мс, что обеспечивает шаг по частоте 6…15 Гц.

Значения собственных частот определялось по графикам спектральной плотности сигналов, полученных с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ), как локальные экстремумы. Результаты определения собственных частот корпуса приведены в табл. 3.

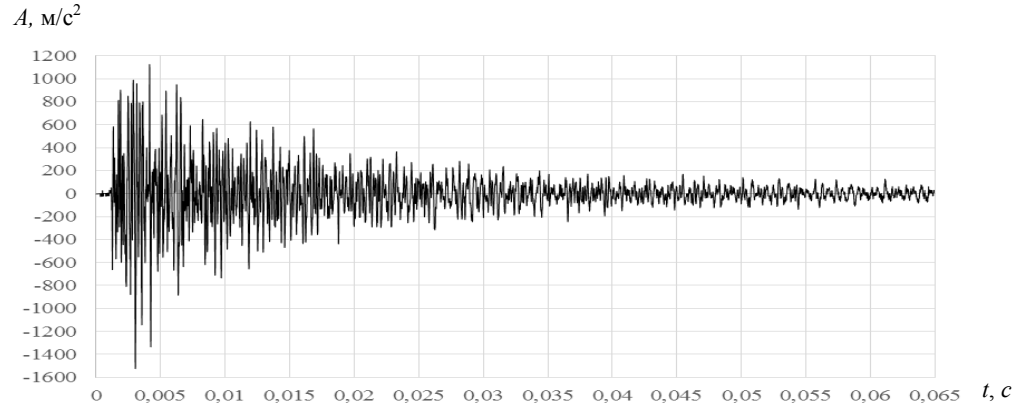


Рис. 7. График зарегистрированного ударного ускорения пьезоакселерометром 8*XY* в опыте № 2 без цифровой фильтрации

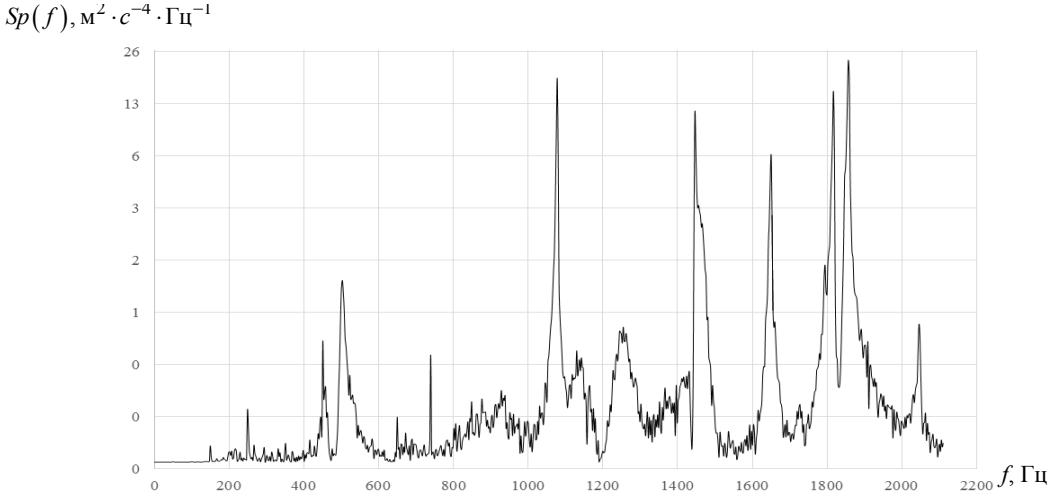


Рис. 8. График спектральной плотности (СП) зарегистрированного ударного ускорения

Таблица 3

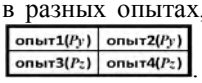
Значения частот колебаний, определенных по пикам графиков спектральных плотностей сигналов, зарегистрированных пьезоакселерометрами

Фланец 1								Фланец 2							
5*X*		6*Z*		7*Y*		8*XY*		1*X*		2*Z*		3*XY*		4*Y*	
459	**462**	*459*	*462*	**459**	**462**	**502**	**504**	*459*	*454*	*459*	*460*	*500*	*450*	*459*	*462*
459	**459**	*450*	**459**	*454*	**459**	*450*	*501*	*450*	*459*	*450*	*459*	*450*	*500*	*450*	**459**
790	*800*	*790*	*801*	*801*	*800*	*801*	*740*	**801**	**801**	*801*		**875**	**876**	**801**	**801**
		800	*794*	*739*	*794*	*739*		**801**	*794*			*740*	**878**	**801**	**794**
1078	**1074**	**1078**	**1074**	**1078**	**1074**	**1078**	**1074**				*1080*				
1080	**1073**	**1080**	**1073**	**1080**	**1073**	**1080**	**1073**				*1073*				

Таблица 4

Сравнение экспериментальных и расчетных данных

№ п/п	f_P, Гц	$f_Э$, Гц	Δ, %	№ п/п	f_P, Гц	$f_Э$, Гц	Δ, %	№ п/п	f_P, Гц	$f_Э$, Гц	Δ, %
1	463,93	464	0,01	4	908,77	798	13,88	7	1074,4	1076	0,14
2	505,58	464	8,96	5	1016	1076	5,57	8	1081,5	1076	0,51
3	843,78	798	5,73	6	1074,3	1076	0,15				

В табл. 3 приняты следующие обозначения: частоты, полученные в разных опытах, расположены в квадрате по схеме 

. Жирным шрифтом выделены частоты, амплитуда пиков на которых отвечает условию $A > 0{,}1A_{\max}$, где $A_{\max}$ – амплитуда максимального пика. Курсивом обозначены частоты, амплитуда пиков на которых отвечает условию $A < 0{,}1A_{\max}$.

Диапазоны частот, определенные табл. 3, приведены также в табл. 1 (столбец 6) в соответствующих строках.

Для оценки соответствия экспериментальных и полученных расчетом по МКЭ данных проведем их сравнение по формуле

$$\Delta = \frac{f_Э - f_P}{f_Э} \cdot 100\,\%,$$

где f_P – собственные частоты корпуса, полученные с помощью МКЭ, Гц; $f_Э$ – усредненное значение пиков спектра, Гц.

Результаты расчетов приведены в табл. 4.

Из табл. 4 видна достаточно хорошая сходимость экспериментальных и расчетных данных.

Анализируя полученные экспериментальные данные можно отметить следующее. Учитывая, что пьезоакселерометры хорошо регистрируют формы колебаний, при которых смещение сечений совпадает с осью чувствительности пьезоакселерометров, пьезоакселерометры 1*X*, 3*XY*, 4*Y*, 5*X*, 7*Y*, 8*XY* хорошо фиксируют колебания «соответствующие» изгибным колебаниям в плоскости кольца (частоты 450-501, 1073-1080 Гц для фланца № 1; частоты 740-878 Гц для фланца № 2), так как в этом случае смещения сечений носят радиальных характер и совпадают с осями чувствительности указанных датчиков. В других случаях, когда ось чувствительности пьезоакселерометра была перпендикулярна смещению сечений при определенной форме колебаний, на графиках спектральной плотности сигнала ускорения на частоте, соответствующей этой форме колебаний пики не были отмечены.

Экспериментальные исследования подтверждают результаты расчетов МКЭ.

Заключение

Использование МКЭ для определения собственных частот колебаний сложных конструкций позволяет получать самые точные решения, хотя и требует значительных вычислительных ресурсов. Использование аналитических решений, при замене элементов реальной конструкции более простыми элементами, позволяет находить те параметры конструкции, которые определяют значения соответствующих собственных частот колебаний конструкции, а также проводить оценку влияния изменения этих параметров на значение собственной частоты колебаний. Это поможет при проектировании конструкции, реакция которой должна обладать заданным спектральным составом.

При экспериментальном определении собственных частот колебаний с помощью пьезоакселерометров, для повышения точности получаемых результатов, необходимо стремиться к совпадению осей чувствительности используемых датчиков с перемещениями элементов конструкции на изучаемых формах колебаний, а также к тому чтобы установленные пьезоакселерометры не попадали в узловые точки собственных форм колебаний.

Литература

1. Яушев А. А., Тараненко П. А., Жестков А. В., Логиновский В. А. Расчетно-экспериментальное исследование частот и форм собственных колебаний сварного корпуса кориолисового расходомера // Вестник ЮУрГУ. Сер. Математика. Механика. Физика. 2018. Т. 10, № 1. С. 45–51. DOI: 10.14529/mmph180106.

2. Пономарев И. С., Махнович С. В., Пантилеев А. С. Особенности экспериментального определения частот и форм собственных колебаний цилиндрической оболочки // Научный вестник НГТУ, 2016. Т. 64, № 3. С. 44–58. DOI: 10.17212/1814-1196-2016-3-44-58.

3. Гохфельд Д. А., Гецов Л. Б., Кононов К. М., Кульчихин Е. Т., Ребяков Ю. Н., Садаков О. С., Тимашев С. А., Чепурский В. Н. Механические свойства сталей и сплавов при нестационарном нагружении: справочник. Екатеринбург: УрО РАН, 1996. С. 408.

4. Тимошенко С. П., Янг Д. Х., Уивер У. Колебания в инженерном деле. М.: ФИЗМАТЛИТ, 1985. С. 474.

5. Филиппов А. П. Колебания механических систем. Киев: Наукова думка, 1965. С. 716.

6. Скубачевский Г. С. Авиационные газотурбинные двигатели. Конструкция и расчет деталей. М.: Машиностроение, 1969.

СЕКЦИЯ 4

Информационные системы и технологии

Председатели секции:
д-р. техн. наук А. Н. Гетманец
канд. техн. наук Н. Н. Вовк

СИСТЕМА ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ КОМПЬЮТЕРНОЙ СЕТЬЮ «ARAMID-DS»

Алешкин В. А.

ФГУП «РФЯЦ ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Современный мир передовых научных технологий сложно представить без высокопроизводительных расчетов, выполняемых средствами многопроцессорных вычислительных комплексов (МВК).

Новые технологические задачи требуют не только наращивания аппаратных мощностей МВК, но и сохранение конфиденциальности обрабатываемой информации. По этим причинам создаются аппаратные и программные решения, позволяющие обеспечивать необходимый режим секретности при работе на МВК. Одним из таких решений является созданный коллективом разработчиков ФГУП «РФЯЦВНИИЭФ» дистрибутив специализированной защищенной операционной системы «Арамид» [1], который удовлетворяет требованиям ФСТЭК России по обработке информации, составляющей государственную тайну.

ЗОС «Арамид» предназначен для организации распределенных высокопроизводительных вычислений, содержащих сведения, составляющие государственную тайну, на супер-ЭВМ предприятий госкорпорации «РосАтом» и Оборонно-промышленного комплекса.

При создании и эксплуатации многопроцессорных вычислительных комплексов важным и моментом является организация системы управления компьютерной сетью.

Управление компьютерной сетью в данном случае представлено тремя основными направлениями:

– непосредственно управление ресурсами домена компьютерной сети – идентификационными данными для пользователей, хостов и сервисов.

– аутентификация или подтверждение подлинности объекта. Данный процесс также актуален для пользователей, хостов и сервисов.

– разграничение доступа. Здесь основными аспектами является управление политиками доступа и привилегиями пользователей.

Таким образом, можно ввести определение: система централизованного управления компьютерной сетью – это распределенная система, позволяющая организовать в рамках многопроцессорного вычислительного комплекса централизованное управление ресурсами домена компьютерной сети.

Основные задачи, которые стоят перед данной системой:

В рамках создания такой системы для ЗОС «Арамид» разработчикам необходимо было решить следующие задачи:

– создание централизованной модели хранения учетных данных вычислительного комплекса;

– предоставление механизмов безопасной идентификации и аутентификации;

– администрирование системы через единый интерфейс;

– реализация технологии «единого входа» пользователей;

– организация управления политиками безопасности;

– интеграция с средствами защиты информации реализованными в защищенной операционной системе «Арамид».

В условиях большого количества узлов, для создания системы централизованного управления идентификационными данными необходимо решить следующие подзадачи. А именно:

– создание единого хранилища для учетных данных – поскольку на каждом узле МВК хранятся собственные учетные записи пользователей, групп пользователей, файлов хостов и т.д.;

– создание централизованной системы идентификации и аутентификации – иначе настройки необходимо выполнять на каждом узле МВК;

– создание единого интерфейса администрирования – при его отсутствии необходимы дополнительные ресурсы для поддержания данных в актуальном состоянии;

– реализация единого поставщика аутентификационных данных – позволяет избежать накапливания учетных записей пользователей и паролей для различных сервисов;

– обеспечение возможности хранения конфигураций сервисов в едином точке – исключает необходимость настраивать сервисы на каждом узле, повторяя одни и те же операции.

А использование на узлах комплекса защищенной операционной системы добавляет к этому списку еще несколько критериев:

– организация централизованного механизма управления политиками безопасности – совместимого с собственной системой разграничения доступа операционной системы «Арамид»;

– разработка механизмов взаимодействия со средствами защиты информации – системное программное обеспечение необходимо адаптировать к работе средств защиты информации.

В начале работ был рассмотрен вопрос использования существующих реализаций систем центра-

лизованного управления компьютерной сетью. Рассмотренные варианты представлены в таблице.

Основные реализации систем централизованного управления компьютерной сетью

Реализация	Недостатки
Microsoft Active Directory	Коммерческий продукт компании Microsoft; закрытая реализация без возможности доработки.
Free IPA	Использование системы разграничения доступа на основе SELinux; большое количество предустановленных политик безопасности.
Open AM	Собственная модель политик безопасности, переход на коммерческую лицензию в новых версиях.
Open LDAP + Kerberos	Сложность конфигурирования и интеграции сервисов, сложность администрирования сервисов.

Кроме того все рассмотренные варианты не имели возможности работы с атрибутами безопасности ЗОС «Арамид» и не имели поддержки СЗИ ЗОС «Арамид».

В связи с этим было принято решение о создание собственной системы централизованного управления компьютерной сетью. Проект получил название «Aramid Directory Service» или «Aramid-DS».

Aramid Directory Service (Aramid-DS) – это система централизованного управления компьютерной сетью в рамках многопроцессорного вычислительного комплекса, реализованная на базе открытых программных решений.

В состав Aramid-DS входят следующие программные компоненты:

– служба каталогов OpenLDAP – обеспечивает централизованное хранение ресурсов домена компьютерной сети (учетные записи, атрибуты безопасности и т. д.);

– система безопасной аутентификации Kerberos – предоставляет протоколы безопасной идентификации и аутентификации, является основой для функционирования технологии «единого входа»;

– служба имен BIND – реализует централизованный механизм управления именами узлов вычислительного комплекса;

– подключаемые библиотеки аутентификации PAM – интегрируют различные механизмы аутентификации, управления учетными записями и сеансами пользователей, предоставляя единый высокоуровневый API;

– утилита системного администрирования политик SUDO – предоставляет возможность назначения административных привилегий для пользователей;

– модуль работы с мандатным окружением – обеспечивает интеграцию сервисов «Aramid-DS» с средствами защиты информации ЗОС «Арамид»;

– утилиты автоматического конфигурирования «Aramid-DS» – набор утилит, которые предоставляют возможность выполнить автоматическую настройку всех сервисов «Aramid-DS»;

– утилиты администрирования– предоставляют единый интерфейс администрирования системы без прямого взаимодействия с сервисами «Aramid-DS»;

– модуль синхронизации сетевых и локальных групп пользователей – механизм централизованное управление системными группами пользователей.

На рис. 1 представлена абстрактная схема функционирования компонентов Aramid-DS:

– обозначено взаимодействие компонентов серверной части «Aramid-DS»;

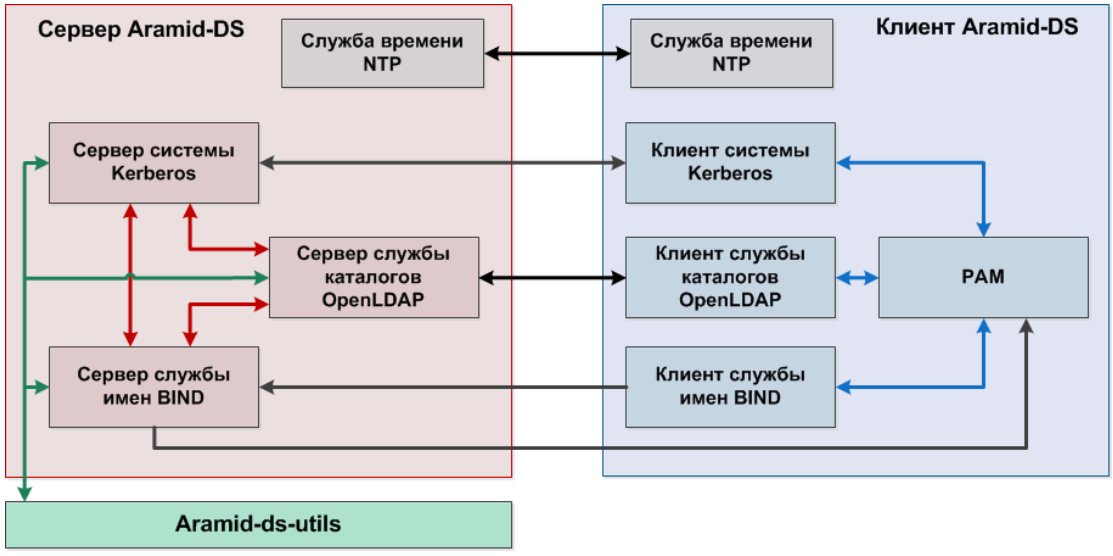


Рис. 1. Абстрактная схема функционирования компонентов Aramid-DS

– представлена модель централизации данных сервисов в службе каталогов OpenLDAP, а также использование сервера имен BIND системой Kerberos;

– сервер и клиент Aramid-DS синхронизированы по времени при помощи протокола NTP, поскольку это одно из необходимых условий работы системы Kerberos;

– обозначено взаимодействие компонентов клиентской части «Aramid-DS». Представлена модель работы набора библиотек PAMc прочими сервисами в составе Aramid-DS;

– обозначено межсерверное взаимодействие компонентов «Aramid-DS». Тут отображено взаимодействие клиентских и серверных частей различных узлов вычислительного комплекса;

– обозначено взаимодействие утилит администрирования с компонентами «Aramid-DS».

Рассмотрим основные функциональные возможности системы централизованного управления компьютерной сетью «Aramid-DS».

1. Централизованное хранение учетных данных

«Aramid-DS» предоставляет механизм централизованного хранения для учетных данных, к которым относятся:

– учетные записи пользователей;
– учетные записи групп пользователей;
– атрибуты безопасности пользователей;
– уровни и категории доступа (MAC);
– хосты и подсети МВК;
– конфигурации сервисов;
– информация о подключаемых носителях;
– политики SUDO.

2. Технология «единого входа» на МВК

Пользователь, выполнив процедуру аутентификации с использованием логина и пароля, получает билет Kerberos, который в дальнейшем используется для автоматического прохождения процедуры аутентификации без необходимости повторного ввода пароля.

Билет используется системой Kerberos для процедуры взаимной аутентификации пользователя и сервиса, которая выполняется при обращение пользователя к сервису. При этом процесс происходит не заметно для самого пользователя. Билет имеет настраиваемый срок действия и изменяемые функциональные ограничения. Схема функционирования для технологии «единого входа» представлена на рис. 2.

3. Автоматическое конфигурирование компонент системы

Конфигурирование компонент системы централизованного управления компьютерной сетью – процесс, требующий серьезных компетенций и знаний, поскольку каждый из компонентов уже является сложной системой, а организация их непосредственного взаимодействия – задача, которая требует глубоких познаний в администрировании системного программного обеспечения.

Система «Aramid-DS» предоставляет механизмы автоматического конфигурирования компонент системного программного обеспечения без специальных знаний и необходимости прямого конфигурирования каждого из компонентов. Администратору достаточно внести изменения в небольшой конфигурационный файл и запустить соответствующую роли узла утилиту.

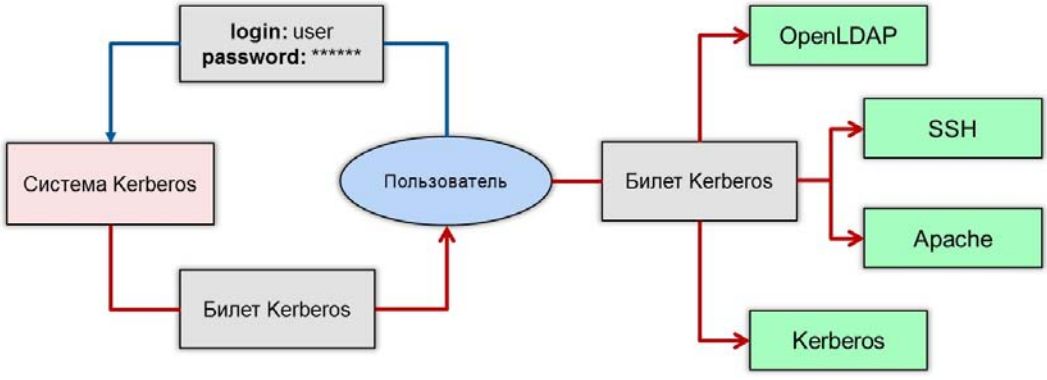


Рис. 2. Функциональная схема технологии «единого входа»

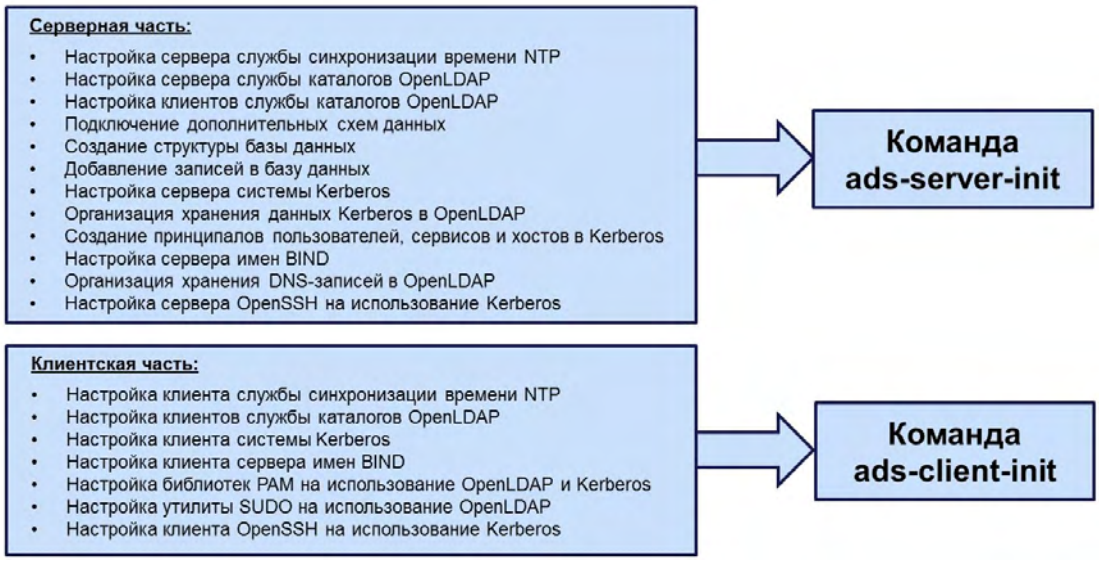


Рис. 3. Пример автоматизации конфигурирования компонент «Aramid-DS»

Рис. 4. Пример использования утилит администрирования

На рис. 3 представлен наглядный пример, сколько действий требуется для настройки компонент без использования специальных утилит.

Также в составе «Aramid-DS» входят утилиты, позволяющие выполнить откат изменений в конфигурации компонентов к их первоначальному состоянию.

4. Единый интерфейс администрирования

Специально разработанные утилиты администрирования исключают необходимость взаимодействия с каждым компонентом «Aramid-DS», предоставляя единый интерфейс управления удобный и понятный для пользователя.

Утилиты администрирования «Aramid-DS»предоставляют следующие возможности:

– создание/редактирование/удаление учетных записей пользователей и групп пользователей;

– управление привилегиями пользователей (административными полномочиями;

– создание/удаление категорий доступа, уровней доступа;

– создание/редактирование/удаление политик паролей пользователей;

– добавление/удаление пользователей в группы пользователей пользователе;.

– просмотр информации о пользователях, группах пользователей, хостах и устройствах;

– вывод идентификационной информации пользователей;

– блокировка/разблокировка учетных записей пользователей;

– управление паролями пользователей.

На рис. 4 представлен пример заведения пользователя с использованием консольной утилиты «ads-adduser». На схеме видно, насколько прост синтаксис

Рис. 5. Организация единого пользовательского пространства

утилиты для пользователя и сколько процедур скрывается за выполнением данной утилиты на стороне сервера.

5. Интеграция с web-интерфейсом администратора безопасности

Web-интерфейс администратора безопасности - это графическая интерактивна web-среда, выполняющая в операционной системе «Арамид» централизацию административных и пользовательских сервисов в режиме дистанционного доступа.

Web-интерфейс имеет поддержку «Aramid-DS», обеспечивая возможность визуализации хранящейся в «Aramid-DS» информации, а также предоставляя возможность управления ресурсами компьютерной сети через графический web-интерфейс.

6. Организация единого пользовательского пространства

Система «Aramid-DS» является источником необходимых данных и сервисных возможностей для различных компонент операционной системы «Арамид». Обеспечивая таким образом возможность организации Единого Пользовательского Пространства. На рис. 5 приведены примеры основных функциональных взаимодействий «Aramid-DS» в рамках организации единого пользовательского пространства.

Результатом выполненной работы является создание системы централизованного управления идентификационными данными «Aramid-DS», которая позволяет преодолеть сложности работы с учетными данными на многопроцессорных вычислительных комплексах, а также адаптирована для работы в защищенной операционной системе «Арамид».

Стоит также отметить, что в составе дистрибутива операционной системы «Арамид» успешно пройдены сертификационные испытания и проводится успешное внедрение в составе ЗОС «Арамид» на предприятия госкорпорации «Росатом и предприятия ОПК.

Созданный программный продукт является полноценным инструментом централизованного управления компьютерной сетью, функционирующим на многопроцессорных вычислительных комплексах с обеспечением необходимого режима безопасности.

В планах дальнейших работ по развитию системы централизованного управления компьютерной сетью «Aramid Directory Service» – реализация поддержки сетевых протоколов SAMBA, FTP и VNC, повышение отказоустойчивости за счет репликации сервисов и интеграция с наиболее значимыми аналогичными системами.

Литература

1. Петрик А. Н. Защищенная операционная система «Арамид» для супер-ЭВМ / VIII Форум «Информационные технологии на службе оборонно-промышленного комплекса России» // Сборник тезисов. Екатеринбург, 2019. С. 11.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ОБРАБОТКИ И ХРАНЕНИЯ ДАННЫХ, ПОЛУЧАЕМЫХ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ОБЛУЧАТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА ИМПУЛЬСНЫХ РЕАКТОРАХ И КРИТСТЕНДАХ

Г. В. Афонина, Г. А. Семёнов, И. Ю. Дроздов, М. А. Иошкина

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

В Институте Ядерной и Радиационной Физики (ИЯРФ) сотрудниками научно-исследовательского отделения ядерно-физических установок проводятся экспериментальные исследования на критсборках и облучательные эксперименты на импульсных ядерных реакторах. За время проведения работ накопился большой объем экспериментальных данных и сопутствующей информации, который продолжает увеличиваться по мере проведения новых экспериментов.

Накопленная за последние 20 лет информация находится в разрозненном и фрагментарном виде (рабочие журналы, отчеты, протоколы, отдельные файлы), она требует систематизации и унифицированной обработки наряду с вновь поступающими данными.

В настоящей работе предложена единая концепция организации данных и выработано решение по разработке программного обеспечения (ПО), предназначенного для обработки и хранения данных, получаемых при проведении облучательных экспериментов на пяти реакторах и двух критстендах института.

Требования к программному обеспечению

Сотрудниками научно исследовательского отделения ядерно-физических установок были предъявлены следующие требования к разрабатываемому ПО:

– открытая, модульная архитектура программы, позволяющая добавлять новые программные модули;

– многопользовательский режим работы;

– основные режимы работы: ввод, корректировка и удаление данных, математические алгоритмы обработки данных;

– вывод информации в текстовом, табличном или графическом видах по установленной форме;

– ПО должно функционировать в системах в защищенном исполнении.

Реализация поставленной задачи

При разработке программного обеспечения были рассмотрены следующие варианты выполнения поставленной задачи:

– использование коммерческого программного продукта;

– использование специализированного ПО разработки ВНИИЭФ;

– разработка нового программного обеспечения.

Коммерческие программные продукты не отвечают всем требованиям к функционалу ПО, который необходим для проведения исследований и испытаний на реакторах и критических стендах ИЯРФ. Наиболее часто используемые программные пакеты это MathCad, Matlab, MATHEMATICA, которые обладают мощным потенциалом математической обработки, являясь во многом специфическими средами программирования. В данных программах невозможно обеспечить гибкий и удобный пользовательский интерфейс и настройки узкоспециализированных алгоритмов.

Второй вариант – это использование программы «КАСКАД-Д». Эта комплексная вычислительная программа для расчета характеристик полей нейтронов по результатам измерений с интегральными детекторами (обобщенная совокупность методов, базирующихся на использовании формы отклика нейтронного детектора для определения формы спектра нейтронов и применения полученного спектрального распределения в прикладных целях).

Программа автономная и использует файловую систему организации хранения данных, что вызывает трудности с анализом информации, возникает избыточность данных или возрастает вероятность потери накопленных данных.

После изучения функционала программы, было принято решение на основе программы «КАСКАД-Д» разработать новое программное обеспечение, которое позволит хранить, систематизировать и использовать математические алгоритмы расчета данных.

Для решения вышеперечисленных задач требуется организация сервера баз данных и клиентских рабочих мест для инженера-исследователя, кроме этого необходимы средства локального доступа к серверу. Разработанное программное обеспечение представляет собой информационную систему – клиент-сервер.

Разработка программного обеспечения проводилась с учетом технических и программных возможностей подразделения – разработчика.

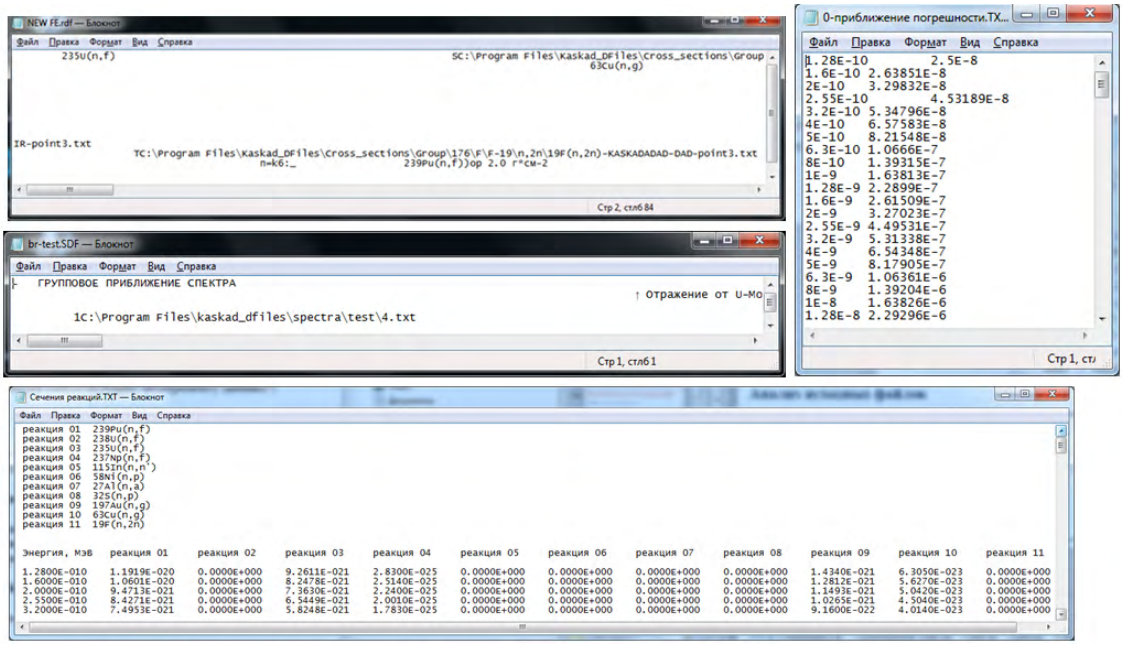


Рис. 1. Различные форматы данных

Анализ исходных данных

Создание базы данных начали с анализа исходных данных и сбора первичной информации.

Было проанализировано множество файлов, в которых в разрозненном виде и в разных форматах хранится информация по экспериментам, проведенным на ядерно-физических установках ИЯРФ, а именно, в файлах *.rdf хранится информация по реакциям, в файлах формата *.sdf по спектрам и в файлах *. txt. по сечениям. Данные файлы имеют различную организацию данных (рис. 1).

Для реализации архитектуры клиент-сервер и разработки ядра базы данных (БД) была выбрана система управления базами данных (СУБД) PostgreSQL [2]. Это свободно распространяемая система, СУБД «Postgre Pro» имеет сертификат соответствия по требованиям безопасности информации федеральной службы по техническому и экспортному контролю (ФСТЭК).

В разработанном программном обеспечении реализован многопользовательский режим работы, обеспечивающий выполнение требований по защите информации от несанкционированного доступа. Организация базы данных и адаптация программного кода программы «КАСКАД-Д» позволили отказаться от файловой системы хранения данных.

На сегодняшний день в БД успешно импортированы все данные, которые были предоставлены научно-исследовательским отделением ядерно-физических установок. Импортированные данные были проверены на контрольных примерах.

Ввод данных по новым экспериментам пользователи осуществляют в БД через пользовательский интерфейс разработанного программного обеспечения.

Функционирование программы

Клиентская часть разработанного ПО – это программа, состоящая из программных модулей, форм и различных запросов. Разработка клиентской части информационной системы проводилась в среде визуального программирования Borland Delphi 7 [3,4].

При запуске программы пользователю необходимо ввести учетную запись и пароль (рис. 2), после чего программа осуществит проверку учетной записи пользователя.

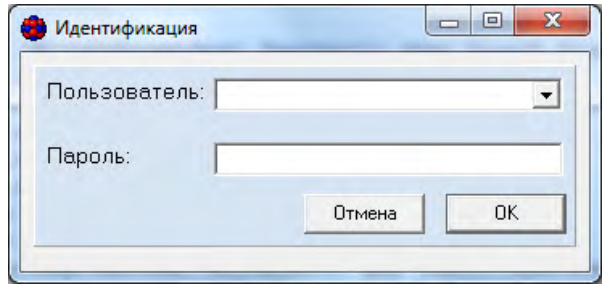


Рис. 2. Диалоговое окно идентификация пользователя

На основном диалоговом окне программы пользователю доступны режимы ввода, корректировки или удаления.

Пользователь может ввести данные по новому эксперименту или работать с информацией уже существующей в системе. В общем представлении данные по эксперименту выведены на основное диалоговое окно программы, как это показано на рис. 3.

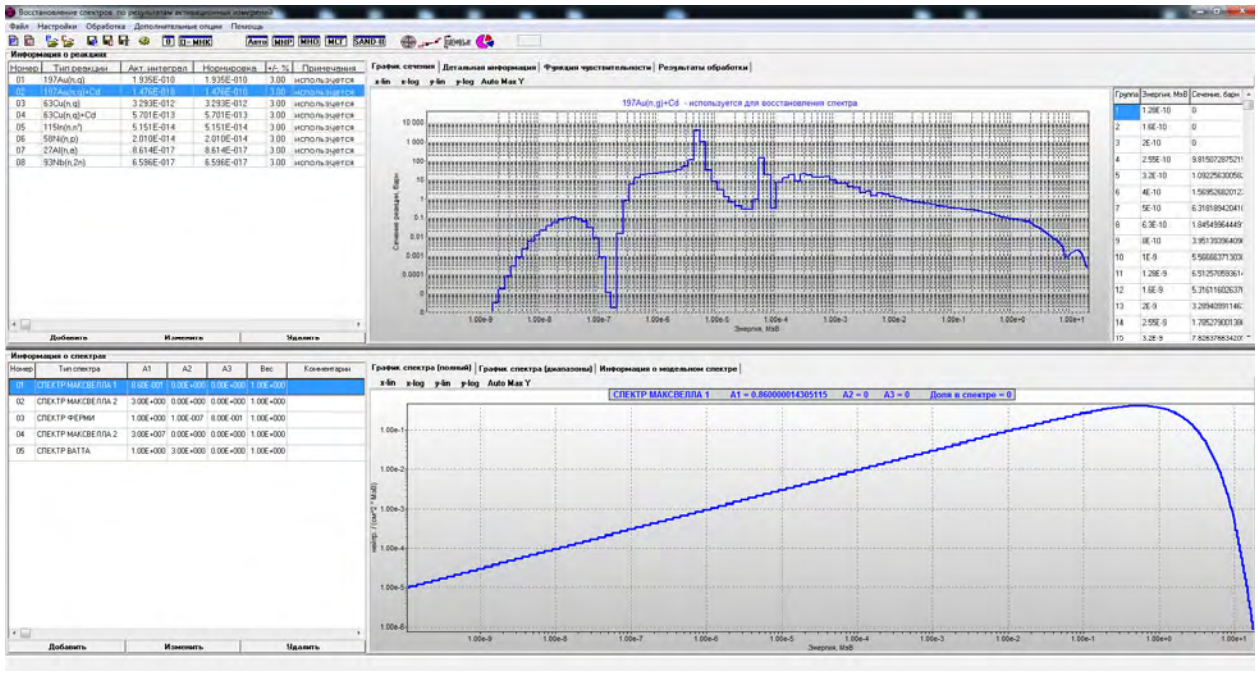


Рис. 3. Основное диалоговое окно программы

Данные в БД можно изменить, удалить, по каждому параметру можно просмотреть детальную информацию: активационный интеграл, погрешность активационного интеграла и т. д.

Экспериментальные данные включают в себя информацию по сечениям используемых реакций активации и спектрального распределения нейтронов, диалоговые окна программы представлены на рис. 4.

Информация по сечениям для изотопов предоставляется в открытом доступе мировыми исследовательскими центрами, такими как, например, Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ).

В программу импортированы сечения из библиотеки IRDF (Международные данные реакторной дозиметрии). В связи с этим в разработанной программе реализован широкий выбор реакций.

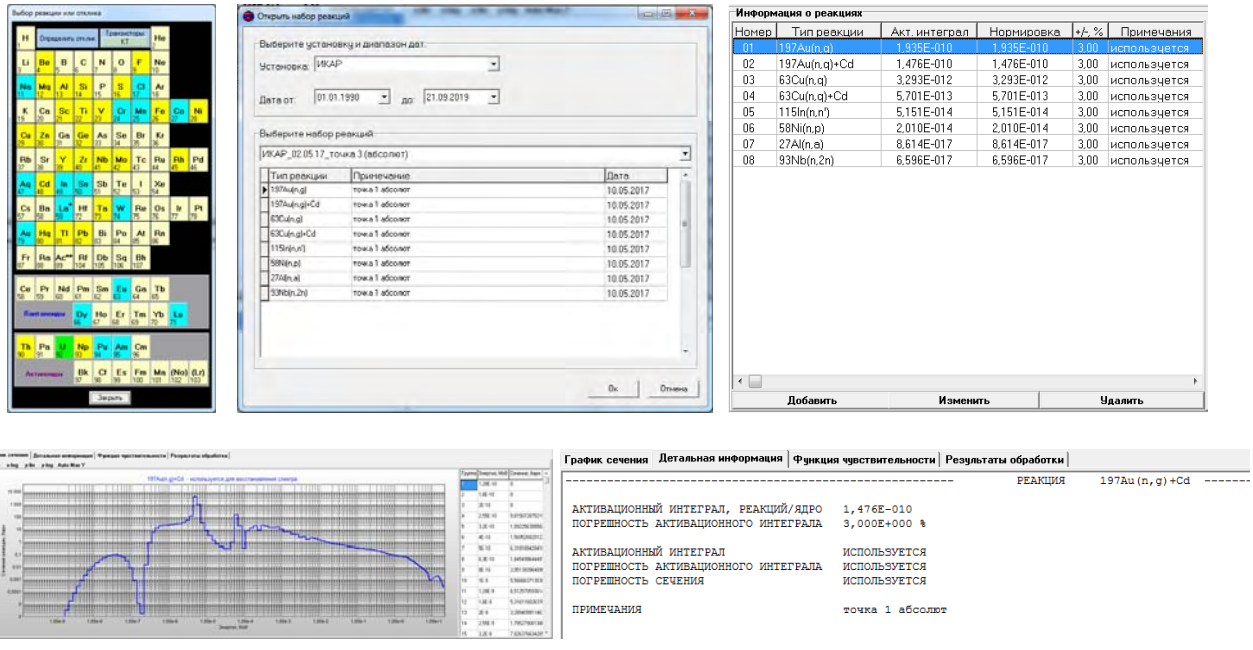


Рис. 4. Диалоговые окна программы «Реакции», «Сечения»

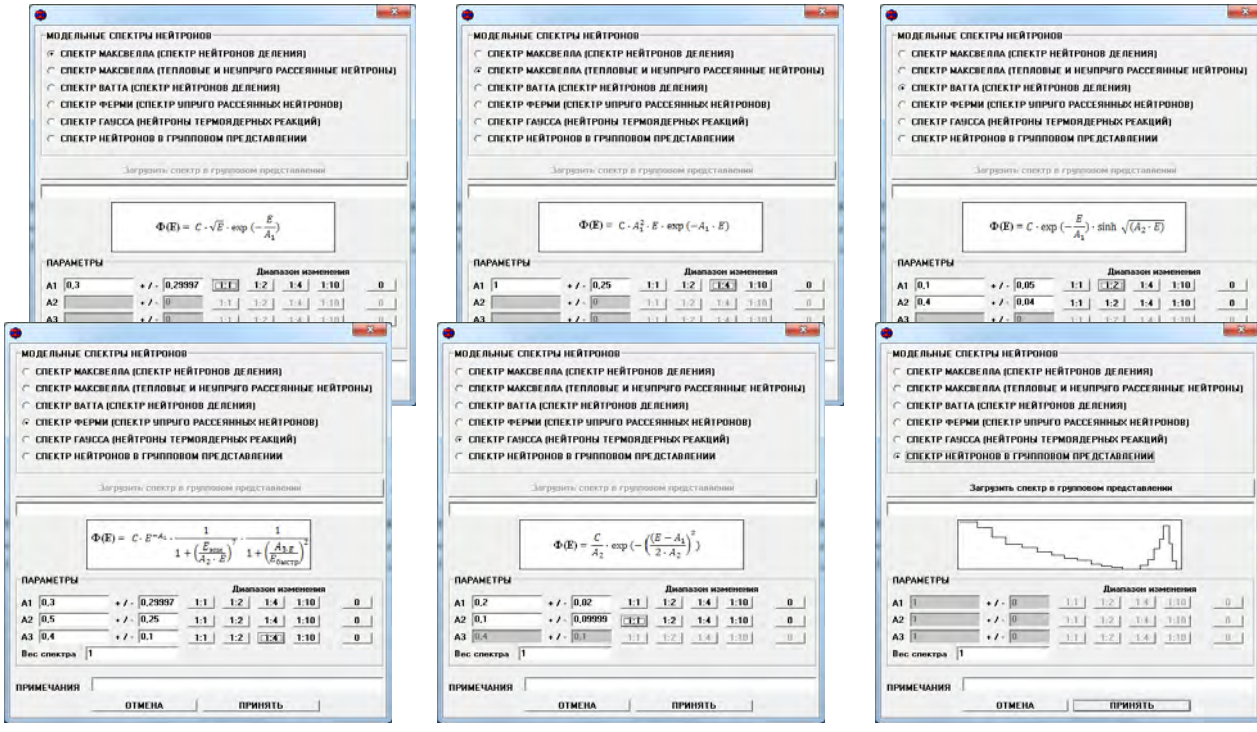


Рис. 5. Диалоговые окна программы «Спектры»

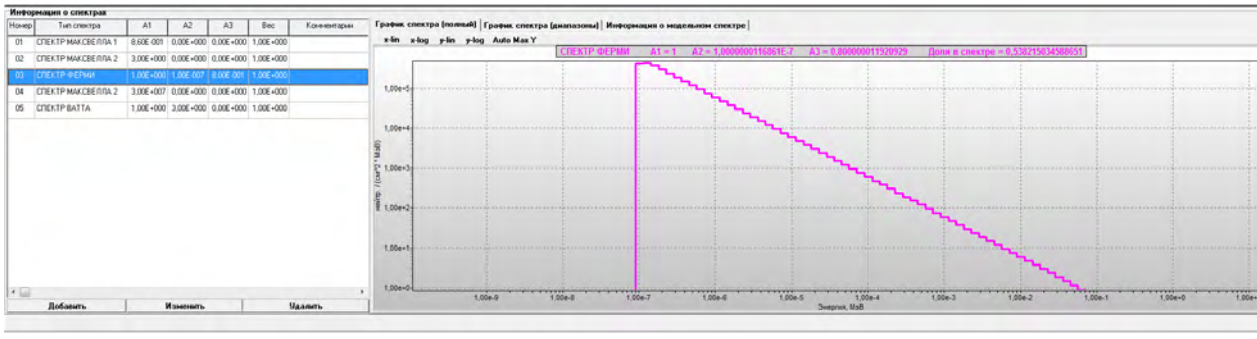


Рис. 6. Диалоговые окна программы «Спектры»

Данные по эксперименту содержат также информацию по спектрам нейтронов. В программе спектры нейтронов описываются аналитическими функциями: распределение Максвелла, спектр Ферми, спектр в виде нормального распределения и распределение Ватта.

При выборе модельного спектра нейтронов пользователю необходимо заполнить поля ввода на диалоговом окне: параметры для решения уравнения и вес спектра; как это реализовано в программе, представлено на рис. 5.

После ввода всей необходимой информации в основном окне программы, при выборе созданного набора по запросу строится график выбранной модельной функции. При необходимости график можно масштабировать (рис. 6).

Обработка данных

Обработка экспериментальных данных включает в себя восстановление нейтронного спектра по набору интегральных откликов активационных детекторов.

В качестве исходных материалов для разработки алгоритмов обработки данных, получаемых на ядерно-физических установках, были предоставлены методологические материалы и описание методов, применяемых для восстановления спектра. Одна из задач при разработке программного обеспечения состояла в алгоритмизации итерационной процедуры восстановления спектров.

Решение поставленной задачи сводится к решению уравнения, описывающего процесс активации.

$$Q_j = \int_{E_0}^{\infty} \varphi(E)\sigma_j(E)dE$$

Q_j – активационный интеграл (экспериментально получаемая величина); j – номер реакции в списке, $\varphi(E)$ – дифференциальный спектр нейтронов, $\text{см}^{-2}\cdot\text{МэВ}$, $\sigma(E)$ – энергетический ход сечения активации (деления), 10^{-24}см^2, E_0 – выбираемая нижняя граничная энергия нейтронов в спектре.

В этом уравнении интегральный отклик активационного детектора (активационный интеграл) Q_j связывается с искомым флюенсом нейтронов.

Для решения уравнения также требуется информация о виде сечения активации $\sigma_j(E)$.

Далее формируется начальное приближение спектра $\varphi_0(E)$, а затем, с помощью итерационной процедуры уточняется решение $\left[\varphi_0(E) \to \varphi(E)\right]$.

$$\varphi_0(E) = \sum_{j=1}^{J} H_l \cdot \varphi_l(E)$$

Начальное приближение задается в виде набора аналитических функций (модельных спектров) $\varphi_l(E)$, имеющих собственный вес H_l.

Итерационная процедура вычисления весов модельных спектров осуществляется по средневзвешенному коэффициенту расхождения R_j измеренных и вычисленных на текущей (k-ой) итерации активационных интегралов для каждой реакции.

$$H_l^{k+1} = H_l^k \frac{\sum_{j=1}^{J} R_j^k \sigma_{j,l} / Q_j^k}{\sum_{j=1}^{J} \sigma_{j,l} / Q_j^k}$$

Для остановки итерационных процедур предусмотрены два условия:

первое условие: $\text{SPD} = \sqrt{\frac{\sum_{1}^{n}(1 - Q_j / Q_j^k)^2}{n-1}} \le eps$

второе условие: превышение заданного числа итераций.

После проведения расчетов по эксперименту, выполняется процедура сохранения полученных данных.

Помимо результатов измерений и данных, необходимых для работы математических алгоритмов программы, с конкретным экспериментом связана сопутствующая информация: наименование, дата проведения, установка, на которой проводился эксперимент, энерговыделение, единица измерения, программа-методика испытаний, дата и номер приказа, организация и заказчик работы, номер облучения, геометрия эксперимента, описание, наборы реакций и спектров и используемые алгоритмы обработки данных. Диалоговое окно программы представлено на рис. 7.

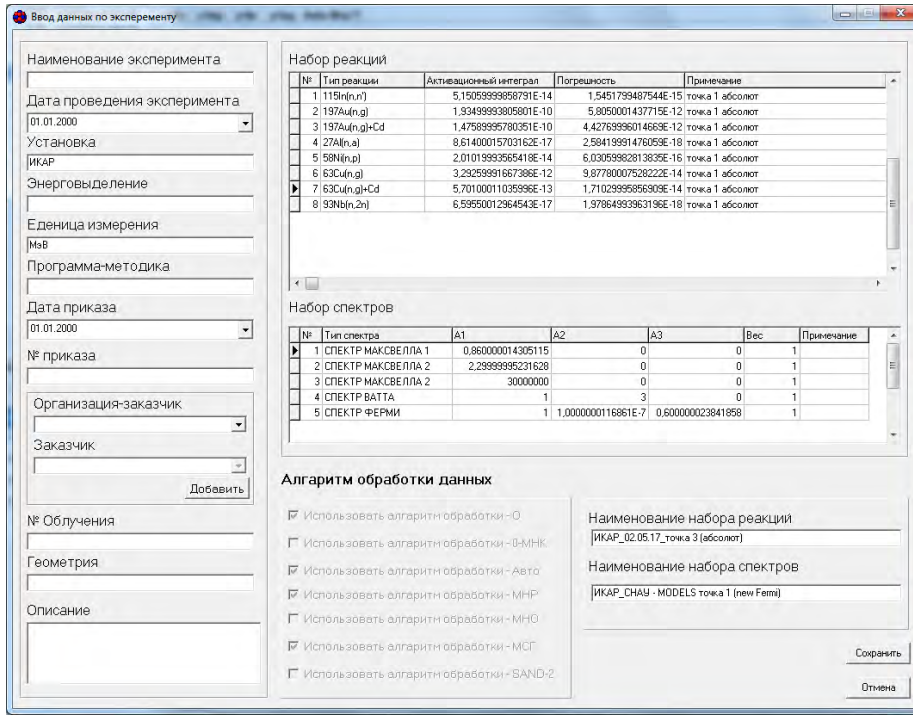


Рис. 7. Диалоговое окно «Эксперимент»

В программе реализована функция поиска данных, например: поиска эксперимента по дате, по наименованию установки, номеру программы работ или приказа, количество экспериментов, проведенных для конкретного заказчика и т. п. По запросу пользователю предоставляется полная информация по выбранным параметрам, пример представлен на рис. 8.

Сформированные массивы информации могут использоваться для формирования отчетов по проведенным экспериментам, шаблоны выходных документов представлены на рис. 9. Отчеты можно выводить на экран или печать.

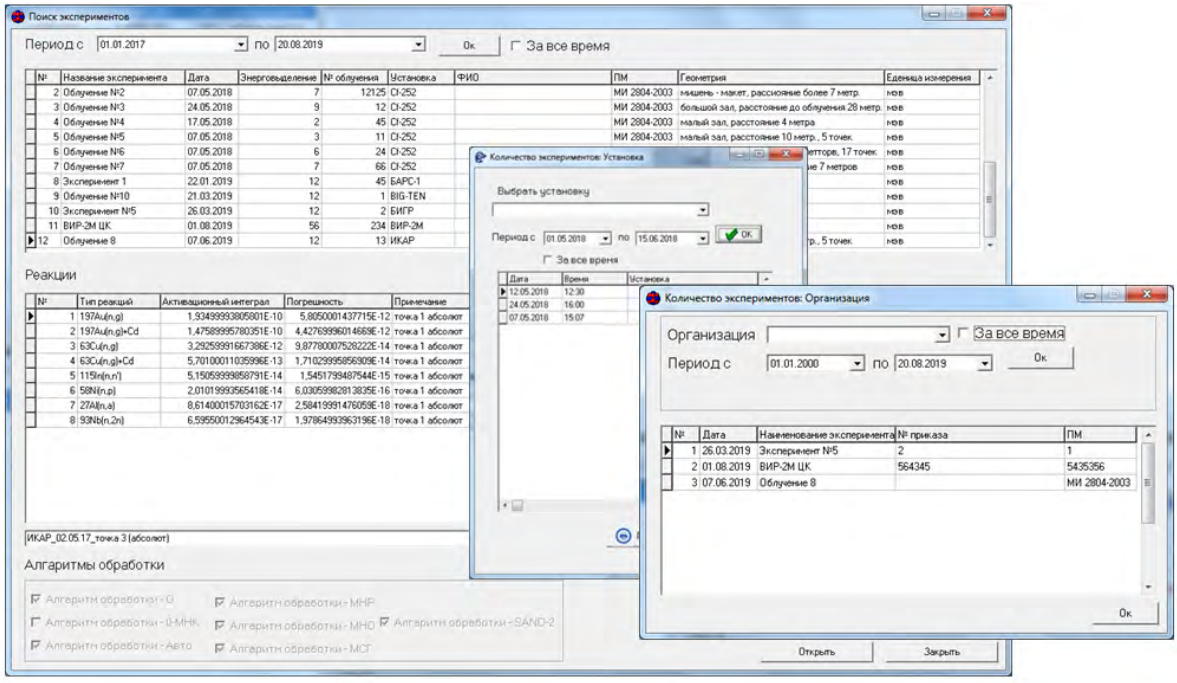


Рис. 8. Диалоговые окна программы «Поиск информации»

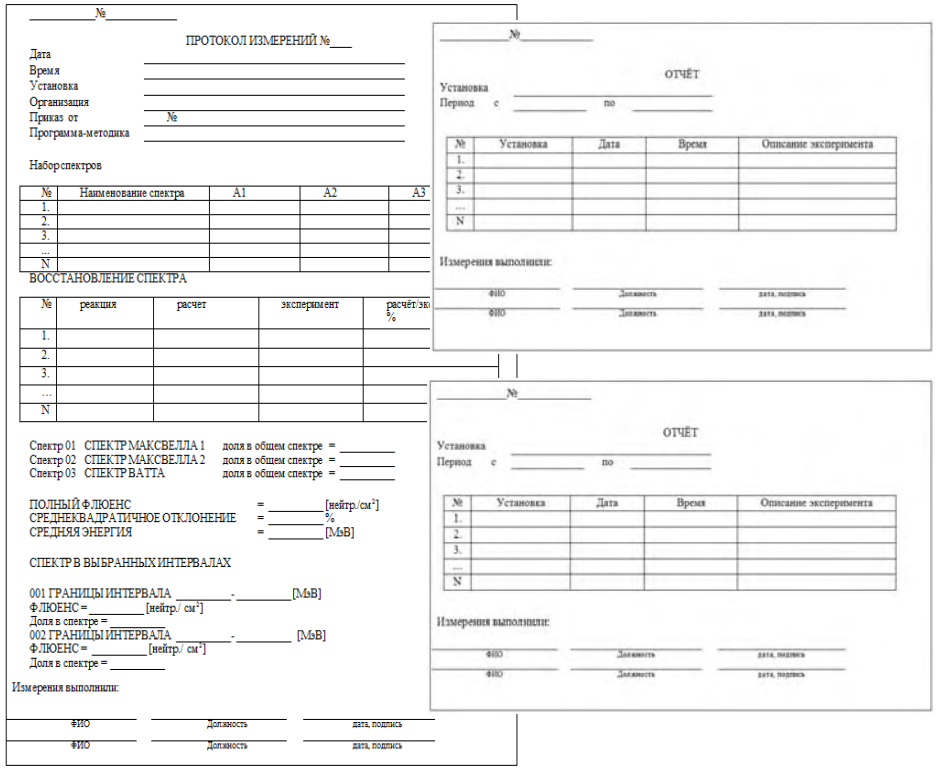


Рис. 9. Шаблоны выходных документов «Протокол измерений», «Отчеты»

Заключение

В заключение можно отметить, что разработанное ПО обеспечивает целостность данных, защиту информации, позволяет систематизировать информацию и применять алгоритмы обработки данных, получаемых в результате проведенных облучательных экспериментов на ядерно-физических установках ИЯРФ.

Разработанное программное обеспечение успешно прошло этап предварительных испытаний и этап опытной эксплуатации.

Литература

1. Маслов Г. Н., Севастьянов В. Д., Кошелев А. С. Метод расчета спектра нейтронов по результатам измерений с интегральными детекторами, реализованный в новой версии программы КАСКАД // Измерительная техника. 2003. С. 62–68.

2. Панченко И. PostgreSQL: вчера, сегодня, завтра // Открытые системы СУБД. 2015. № 3.

3. Фаронов В. В., Шумаков П. В. Delphi 7. Руководство разработчика баз данных. М.: Нолидж, 2013.

4. Дарахвелидзе П. Г., Марков Е. П. Программирование в Delphi 7. С-Пб.: БХВ, 2012.

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ СТРОЕМ С ИНТЕГРАЦИЕЙ В ПЛАТФОРМУ «ОПТИМУС»

Н. А. Баринов, Д. В. Ежов, Д. С. Собанин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Описание проблем

Имитационное моделирование позволяет решать множество задач, в которых иные методы работают плохо. Особенно это относится к динамике поведения людей, в том числе во время боевых действий. Движение агентов (людей, единиц техники и т. д.) в таких случаях, как правило, происходит не хаотично, а в выбранном строю. Поэтому очень важной задачей в имитационном моделировании является задача движения агентов в строю в пространстве, насыщенном различными препятствиями.

Движение в строю можно разделить на наборследующих подзадач:

- движение строя в целом;
- поддержание места в строю;
- избегание столкновения между агентами;
- избегание проникновение в непроходимые зоны (препятствия);
- обход препятствий;
- выход из тупиков.

Под движением строя в целом понимается движение точки, от координат которой отсчитываются координаты каждого из агентов в этом строю.

Поддержание места в строю означает следование той точкев строю, что задана для агента. При этом строй может меняться по заданной программе и в таком случае агент должен отреагировать на это изменение. Эта проблема порождает проблему гашения колебаний, которые образуются как при внешнем воздействии на агента, так и при изменении строя.

Если по каким-то причинам агент попал в тупик, то он должен найти путь выхода оттуда и присоединиться к строю.

Предлагаемый вариант решения

Для решения выше указанных проблем было предложено разделить навигацию на два «уровня».

На верхнем уровне ищется путь для группы агентов в целом. При этом используется модуль Navmesh [1]. Этот модуль представляет пространство в виде набора выпуклых многогранников (полигонов) и обеспечивает поиск оптимального пути между этими многогранниками по проходимым областям. Таким образом получается путь для группы агентов в целом.

Нижний уровень навигации – это движение собственно агента. Он должен поддерживать заданное ему место в строю (может меняться со временем в соответствии с программой), избегать столкновения друг с другом и не проникать в препятствия, а в случае попадания в тупик выходить из него. На этом уровне управление движением агента происходит с помощью «сил», обеспечивающих изменение ускорения, а через него и скорости агента. Эти «силы» аналогичны физическим по свойствам: могут векторно складываться, вычитаться, умножаться на число и т. д. Действуя на агент, они также порождают ускорение, как и обычная сила.

В случае столкновения с препятствием агент движется, используя алгоритмы модуля Navmesh, позволяющие двигаться вдоль препятствий, не нарушая их границ. В случае захода в тупик вновь задействуется модуль Navmesh для получения индивидуального пути для этого агента к его месту в строю. Во всех иных случаях движение обеспечивается с помощью расчета «сил»

Применяемые алгоритмы

Конфигурация строя в целом, так же, как относительное положение каждого агента в строю в каждый момент, являются заданными.

При движении агенты взаимодействуют с соседними объектами. Ими могут быть как агенты, так и препятствия. Для того, чтобы не тратить время на рассмотрение объектов, заведомо не являющимися соседними, необходим поиск по пространственному индексу.

Поиск по пространственному индексу реализован с помощью разбиения на прямоугольные ячейки всего пространства моделирования. Соседними являются агенты и препятствия, которые попадают в ячейку, в которой находится агент, и непосредственно соседствующие с ней ячейки.

При движении строя, как единого объекта, задается траектория точки, относительно которой каждый из агентов, составляющих строй, имеет определенное местоположение, которое он должен занимать.

Для моделирования движения в строю требуется, чтобы агенты следовали к заданному для текущего момента положению, при этом избегали столкновений друг с другом и с препятствиями. Кроме того, необходимо, чтобы эти движения были реалистич-

ными. В данной модели для решения этих задач за основу взят подход, описанный в [2] с некоторыми добавлениями из [3].

В модель вводятся величины, аналогичные физическим силам. Также, как и физические силы, они являются векторами, но безразмерными. Эти «силы» приложены к агентам и связываются с ускорением соотношением:

$$\vec{a} = \vec{F}/M \qquad (1)$$

В зависимости от степени инерционности объекта величина m, соответствующая массе в физическом мире, может быть разной. В данной модели принято $m = 1$, так как агенты считаются одинаковыми и имеют одинаковую инерцию.

Скорость и путь на одном шаге расчета определяются формулами

$$\vec{v} = \vec{a} * \Delta t \qquad (2)$$

$$\vec{s} = \vec{v} * \Delta t + \frac{\vec{a} * \Delta t^2}{2} \qquad (3)$$

Здесь Δt – шаг по времени.

Агенты движутся в соответствии с вычисленными силами, однако, в случае столкновения с непреодолимой зоной (т. е. препятствием), они перемещаются вдоль границ этих зон, руководимые модулем Navmesh.

1. Расчет силы, действующей на агента

Эти «силы» складываются из нескольких «сил», моделирующих отдельные аспекты движения:

$$\vec{F} = \vec{F}_{\text{строй}} + \vec{F}_{\text{трения}} + \sum_i \vec{F}_{\text{расталк}} + \vec{F}_{\text{преп}} \qquad (4)$$

Здесь $\vec{F}_{\text{строй}}$ – «сила», определяющая движение в направлении точки, которую в данный момент должен занимать агент. $\vec{F}_{\text{трения}}$ – «сила», обеспечивающая демпфирование колебаний относительно заданной для агента скорости в движущимся строю. – «сила» отталкивания агента, к которому приложена эта сила, с агентом i. $\vec{F}_{\text{преп}}$ – сила, действующая на агента со стороны препятствия.

2. Расчет $\vec{F}_{\text{строй}}$ – «силы», определяющей движение в направлении точки, которую в данный момент должен занимать агент

Эта «сила» определяется по формуле:

$$\vec{F}_{\text{строй}} = \vec{r} + \vec{v} * \Delta t - \vec{r}_{\text{задан}} \qquad (5)$$

Здесь $\vec{r}$ – текущее положение агента, $\vec{r}_{\text{задан}}$ – заданное положение агента, $\vec{v}$ – текущая скорость, Δ – шаг по времени. На рис. 1 показан принцип определения этой силы.

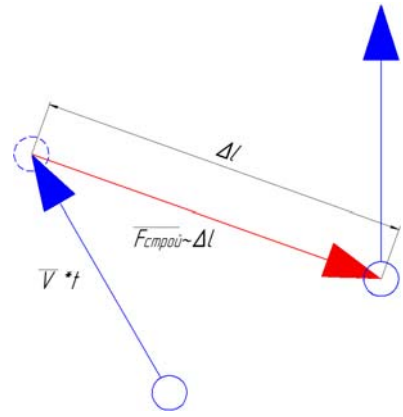


Рис. 1. Определение «силы», ведущей агента к заданному месту в строю

3. Расчет $\vec{F}_{\text{трения}}$ – «силы», обеспечивающей демпфирование колебаний относительно заданной для агента скорости в движущимся строю

$$\vec{F}_{\text{трения}} = k * \left(\vec{V}_{\text{строй}} - \vec{V}_{\text{агента}} \right) \qquad (6)$$

Заданная скорость агента – относительно неподвижной точки.

4. Расчет $\vec{F}_{\text{расталк}^i}$ – «силы» отталкивания агентов

$\vec{F}_{\text{расталк}^I}$ – «сила» отталкивания (см. рис. 2) текущего агента от агента i.

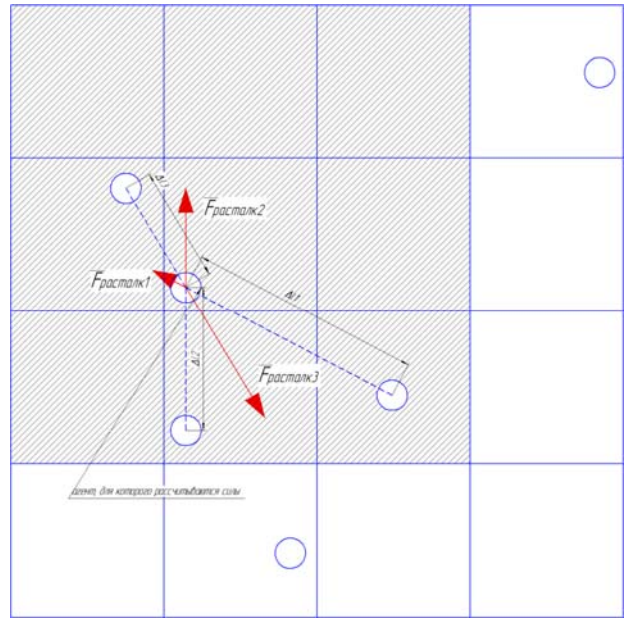


Рис. 2. Определение «силы» отталкивания. Штриховкой показаны соседние с рассматриваемым агентом ячейки. Агенты, находящиеся в не соседних ячейках не учитываются

Она направлена противоположно направлению вектора от центра рассматриваемого агента до агента i и по величине равна

$$\left|\vec{F}_{\text{расталк}}\right| = \frac{k}{\Delta l^2} \qquad (7)$$

Здесь Δl – расстояние между агентами, м; $k = 1$ м2 – коэффициент, позволяющий соблюсти размерность. «Силы» отталкивания не допускают столкновения агентов. Все силы от агентов, ближайших к рассматриваемому агенту, векторно суммируются. Ближайшими агентами считаются те, что попадают в соседние ячейки (показаны на рис. 2 заштрихованными). Остальные агенты игнорируются (их ячейки показаны незаштрихованными).

5. Расчет «силы», позволяющей избегать препятствия

Для избегания столкновения с препятствием вводится «сила», уводящая агент от препятствия. На пути агента возможно нахождение множества препятствий. Наиболее важным считается первое, лежащее на пути.

В случае, если агент не движется, данная сила не вычисляется.

При вычислении силы определяется линия, по которой движется агент. Первой ее точкой является текущее положение агента, второй – предположительное положение агента при движении, вычисляемое по формуле

$$\vec{l}_{motion} = \vec{p} + \vec{v} * t + \vec{a} * \frac{t^2}{2} \qquad (8)$$

Здесь $\vec{p}$ – исходное положение, $\vec{v}$ – скорость, $\vec{a}$ – ускорение.

Далее перебираются все близко расположенные к агенту препятствия. Для поиска расстояния до препятствия используется алгоритм, изложенный в 1.7. Линия, по которой движется агент, аппроксимируется прямой. Тогда ее можно представить в параметрическом виде:

$$\vec{r}1 = \vec{r}0 + \vec{k} * l \qquad (9)$$

Здесь $\vec{k}$ – вектор между начальной и предполагаемой точкой $\vec{l}_{motion}$, l – параметр. Если он попадает в интервал от 0 до 1, то точка $\vec{r}1$ находится на векторе движения.

Аналогичным образом параметризуется и линия препятствия:

$$\vec{r}1_{obs} = \vec{r}0_{obs} + \vec{k}1 * l1 \qquad (10)$$

Тогда, решая систему уравнений, можно найти значения параметров l и $l1$ для точки пересечения этих линий. Если оба параметра при этом принадлежат интервалу 0…1, то линии пересекаются. Если $l1$ входит в этот интервал, а $l > 1$, то пересечения нет, но препятствие лежит на пути агента. В общем случае

$$l = \frac{r0.x - r0obs.x - \frac{k1.x}{k1.y} * ro.y + \frac{k1.x}{k1.y} * ro.obs.y}{k1.x * \frac{k.y}{k1.y} - k.x} \qquad (11)$$

Когда $k1.x * \left(k.y/k1.y\right) - k.x) = 0$, данная формула дает деление на 0. В таком случае возможны два варианта. Первый – если $r1.x = r0obs.x$, то агент находится в точке пересечения с препятствием, т. е. $l = 0$. Второй – движение будет параллельно препятствию и, в таком случае, $l = \infty$.

Когда $k1.y = 0$, координата по y равна этой координате препятствия. Предположительная координата пересечения по x вычисляется следующим образом:

$$predpol_\text{crossing_point}_X = ro.x + k.x * l \qquad (12)$$

Здесь $$l = \left(r0_obstacle_y - r0.y\right)/k.y \qquad (13)$$

Но в этом случае координата должна попадать в интервал между $r0obs.x$ и $r1obs.x$. Иначе пересечения линий тоже не происходит.

Если предполагаемая траектория агента проходит через несколько препятствий, то для дальнейшего рассмотрения выбирается ближайшее из таковых препятствий.

Когда выбрано препятствие, столкновения с которым следует избежать, вычисляется сила (см. рис. 3), позволяющая это сделать. В случае если агент на текущем шаге пересекает препятствие (при неизменных параметрах движения агента), необходимо определить, в какую сторону от препятствия следует уклоняться.

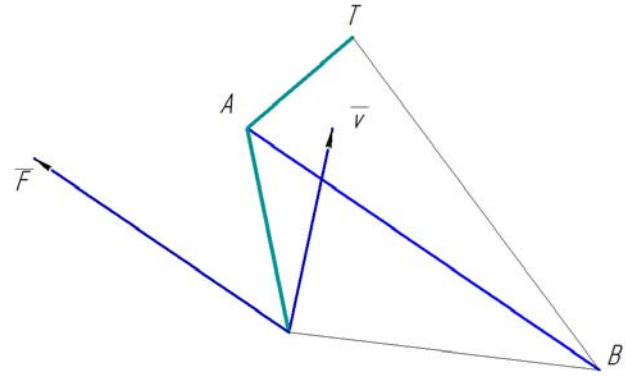


Рис. 3.Определение силы избегания препятствий

Вектор силы направлен параллельно препятствию и равен 100 Н. Поскольку препятствие представляет собой отрезок или последовательность отрезков, то движение параллельно препятствию означает движение параллельно ближайшей его стороне.

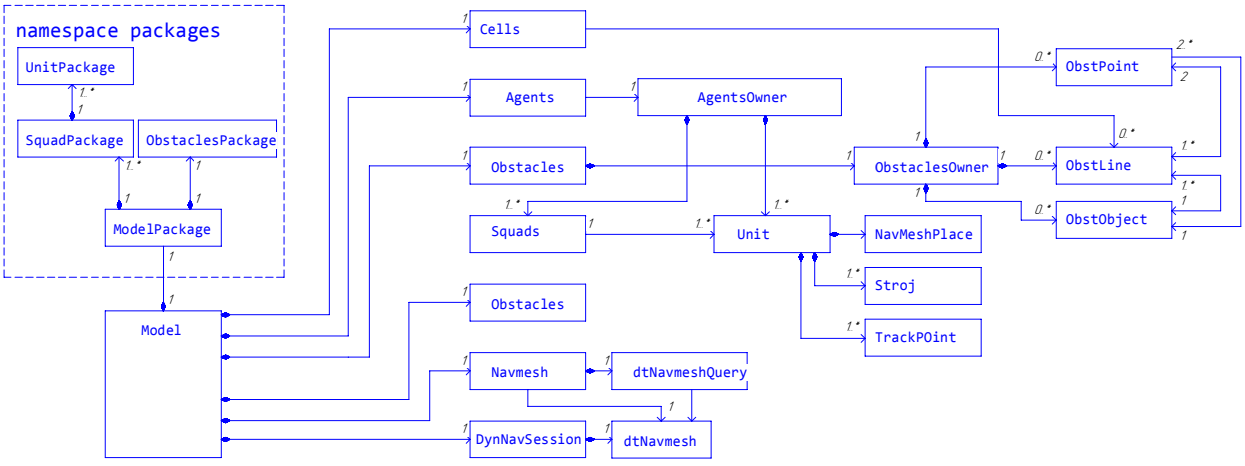


Рис. 4. Диаграмма классов

Так как m = 1 кг, а максимальное ускорение заведомо меньше 100 м/с^2, то при ограничении суммы действующих на агента сил, равнодействующая будет практически совпадать по направлению с данным вектором.

В случае, если препятствие только лежит на пути агента, но на текущем шаге оно не будет достигнуто, сила равна 100 Н и направлена вдоль перпендикуляра от линии препятствия.

6. Расчет движения в случае захода в тупик

Ситуация попадания агента в тупик определяется по разнице между движением агента без учета препятствий и реальным движением агента. На каждом шаге находится изменение координат, которое произошло бы, если бы препятствий не было. Затем рассчитывается аналогичная величина уже с учетом препятствий. После этого изменение координат с учетом препятствий вычитается из изменения координат без учета препятствий и находится модуль итоговой разницы. Эта итоговая разница суммируется на каждом шаге до тех пор, пока не достигнет заданного предела. Если этот предел преодолевается, то считается, что агент застрял. Предел в текущей реализации положен равным 1 м.

Если агент застрял, то начинается поиск выхода из тупика. От агента посылаются «лучи» – отрезки заданной длины, начало которых лежит в точке агента, а конец – на заданном расстоянии в заданном направлении. Цель этого – найти «луч», не пересекающийся с препятствием. Это и будет направлением выхода из тупика для агента. Первый «луч» посылается вдоль направления движения, второй – с углом в 10 градусов по часовой стрелке от первого, третий с углом 10 градусов от первого против часовой стрелки и так далее. Если среди них находится такой «луч», что не встречает препятствий, то перебор «лучей» прекращается и агент получает ускорение вдоль этого луча.

Программная реализация

Программный модуль состоит из расчетной части, написанной на C++ и ответственной за визуализацию части, написанной на Python.

Расчетная часть написана с применением методологии объектно-ориентированного программирования.

В программе разделяется ввод данных и их обработка. Основным классом программы является класс Model, включающий в себя структуры:

- Cell – отвечает за разбиение пространства на ячейки для локальной навигации
- Navmesh – обеспечивает доступ к функционалу Navmesh библиотеки Detour [1]
- DynNavSession – обеспечивает построение навигационной сетки.
- Obstacles – класспрепятствий.
- Squad – классоднойгруппыобъектов
- Agents – классагентов

Структура представлена на рис. 4. Класс Vector 3D условно не показан.

Визуализационная часть разбита на три файла: главный файл visualizer_.py, ответственный за считывание данных из файлов с результатами расчетов xml_reader_py и модуль визуализации vis_base.py.

Использование модуля движения строем

В качестве примера работы программы взято движение 200 агентов. Время конца моделирования 50 с, шаг 0,01 с, длина ячейки 0,5 м, масштаб содержимого файла obs.svg по x 0,0009, по y 0,0009. Движение группы агентов происходит по заранее заданному в Input.xml маршруту. В заданный момент изменяется строй. Для демонстрации пути отдельного агента выбран агент под номером 1 с координатой относительно нулевой точки строя {1, 0}.

В начальный момент времени агенты выстроены в 10 шеренг по 20 агентов в каждом. Координаты

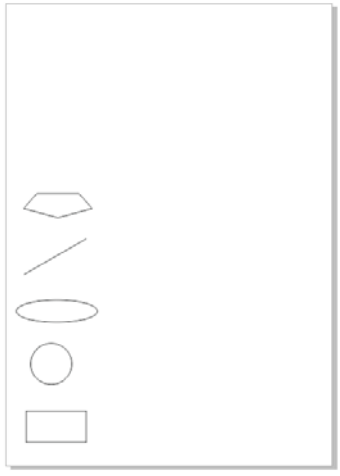


Рис. 5. Препятствия, представленные в файле obs.svg

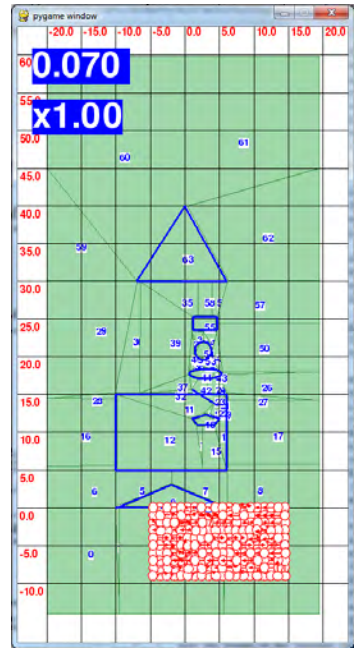


Рис. 6. Начальное положение

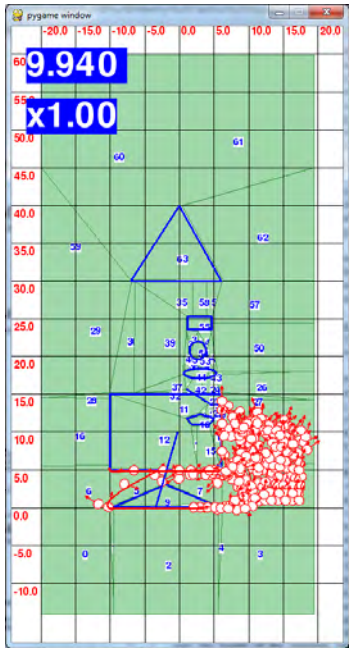


Рис. 7. Строй при обходе препятствия

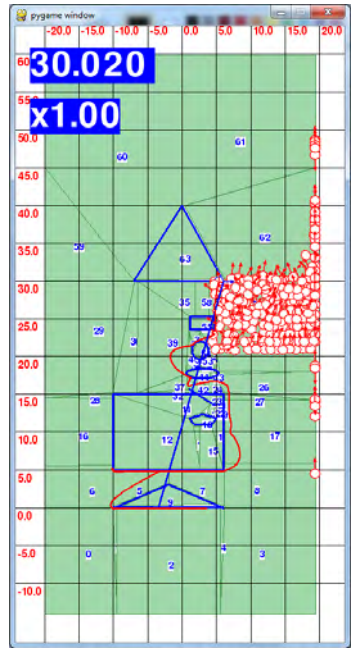


Рис. 8. Группа агентов перед перестроением

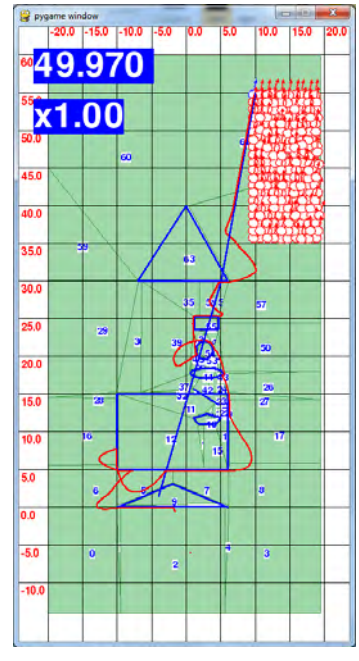


Рис. 9. Группа агентов в конце движения

точки, относительно которой даются координаты в строю {–4,5; 0}. Расстояние между агентами в шеренге и между шеренгами по 1.

Далее к моменту 30 с с начала моделирования группа агентов должна достичь точки с координатами {5;30}. При этом первый агент должен занять точку с координатами {6;30}, второй агент точки с координатами {7;30} и так далее. В этот момент агенты начинают менять строй на шеренги по 10 агентов в каждой. К моменту 50 с отделение достигает точки {10;55}.При этом агентам встречаются препятствия, описанные в Input.xml и в созданном в CorelDraw файле obs.svg.

В файле Input.xml записаны координаты линий трех препятствий: прямоугольника, равностороннего треугольника и равнобедренного треугольника.

В файле obs.svg представлены: прямоугольник, круг, эллипс, прямая, пятиугольник. На рис. 5 представлен пример препятствий, нарисованных в CorelDraw и использованный в тестовом расчете.

Важно, что в CorelDraw картинка развернута на 180 градусов в силу иного расположения осей координат.

На рис. 6 представлено положение агентов сразу после старта.

На рис. 7 представлен строй во время обхода препятствия, когда точка, от которой отсчитываются координаты внутри строя находится внутри препятствия.

На рис. 8 представлена группа агентов перед перестроением.

На рис. 9 представлена группа агентов в конце движения.

Выводы

Разработан программный модуль, позволяющий моделировать в двумерном режиме движение строя в целом, поддержание места в строю каждым из агентов, избегание столкновения между агентами, избегание проникновение в непроходимые зоны (препятствия), обход препятствий, выход из тупиков. Программный модуль выполнен на C++ (расчетная часть) и Python 3.5 (часть, ответственная за визуализацию результатов. При тестировании показана возможность задания движения 200 объектов в пространстве, наполненном препятствиями.

Литература

1. Коваленко О. В., Крючков И. А., Ерошкина И. В., Собанин Д. С., Хочкин Н. И. Алгоритмы генерации графодинамической модели по планам охраны и обороны производственных площадок в ПО ОЭ СФЗ //ОтчетВНИИЭФ инв.№ 01/6148 дсп. Саров, 2017.

2. Reynolds C. Steering behaviors for autonomous characters // Game developers conference. 1999. P. 763–782.

3. Искусственный интеллект: современный подход, 2-е изд.. : Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2007. С. 1408. : ил. Парал. тит. англ. ISBN 978-5-8459-0887-2 (рус.)

4. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). М.: Наука, 1973. С. 832.

БАЗА ДАННЫХ «УЧЕТ НЕСЧАСТНЫХ СЛУЧАЕВ В РФЯЦ-ВНИИЭФ»

Е. А. Бутенко, С. А. Тростин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

База данных «Учет несчастных случаев в РФЯЦ-ВНИИЭФ (Российский федеральный ядерный центр – всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики)» предназначена для информационного обеспечения специалистов, осуществляющих учет несчастных случаев на предприятии РФЯЦ-ВНИИЭФ.

Основания для разработки:

– разработка БД (база данных) «Учет несчастных случаев в РФЯЦ-ВНИИЭФ» ведется на основании «Заявки на разработку ПО (программное обеспечение)» от __.__._____ № 195-____/_____ и запроса от __.__._____ № 195-_____/_____ «О формировании плана на разработку ПО»;

– наличие утвержденного ТЗ (техническое задание) на создание БД «Учет несчастных случаев в РФЯЦ-ВНИИЭФ».

Компоненты системы

Информационная система, поддерживающая работоспособность базы данных «Учет несчастных случаев в РФЯЦ-ВНИИЭФ», состоит из следующих компонентов:

– клиент-серверная часть ПО, реализованная на языках программирования PHP и JavaScript (+JQuery);

– клиентская часть программного обеспечения (дизайн), реализованная на языках разметки гипертекста HTML и CSS;

– база данных, включающая таблицы и запросы, разработанные на языке управления данными SQL;

– серверное программное обеспечение, включающее средства интерпретации языков программирования PHP, SQL и т. д.;

– АРМ (автоматизированное рабочее место), включающее в себя персональный компьютер, подключенный к служебной вычислительной сети, выполняющей задачи сервера и клиента.

Требования технического задания

Цель создания системы:

– сокращение трудовых и временных затрат на поиск информации об имеющихся несчастных случаях;

– повышение качества учета и контроля исполнения отчетности;

– сокращение трудозатрат на поиск необходимой информации в случаях подбора сведений и документов.

Функции базы данных:

– автоматизация процесса сбора, хранения, актуализации и поиска данных о несчастных случаях;

– предоставление аналитических отчетов о несчастных случаях для разработки мероприятий по профилактике травматизма.

Причина создания базы данных:

Отсутствие в ТИС (типовая информационная система), ЕОСДО (единая отраслевая система документооборота), ERP (Enterprise Resource Planning, система планирования ресурсов предприятия) необходимого функционала в части контроля сроков исполнения актов, поручений и других документов, связанных с несчастными случаями в РФЯЦ-ВНИИЭФ.

Авторизация пользователей

Авторизация пользователей происходит стандартным способом по «Логину» и «Паролю» (рис. 1). При бездействии пользователя (более 15 мин) происходит выход из системы. Используется необратимое шифрование «хеширование» пароля алгоритмом MD5 (MessageDigest 5).

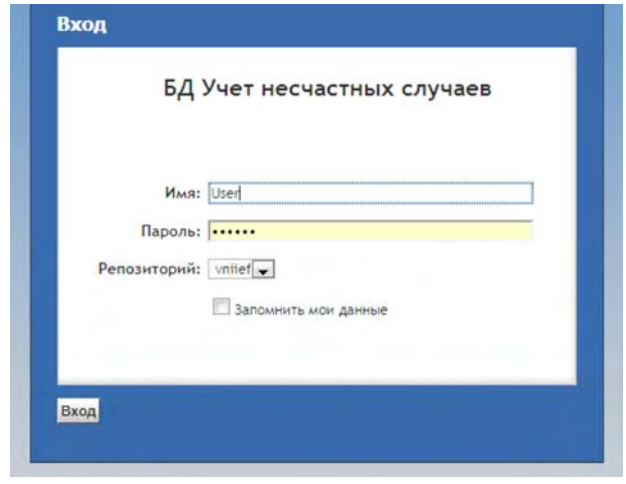


Рис. 1. Окно авторизации пользователя

Алгоритм хеширования паролей MD5 используется для необратимого шифрования кодовых слов, по которым происходит авторизация пользователей.

Основная идея использования необратимого шифрования паролей состоит в следующем:

– на вход алгоритма поступает входной поток данных, хеш которого необходимо найти. Длина входного сообщения может быть любой;

– после хеширования пароля алгоритмом MD5, получившийсяхеш (например, из пароля 123 всегда получается следующий хеш: «202cb962ac59075b964b07152d234b70») сравнивается с таблицей хешей паролей, которая хранится на сервере.

Цель описанного выше алгоритма в том, что даже если злоумышленник получит доступ к таблице паролей на сервере, он все равно не сможет украсть пароли пользователей, т. к. они хранятся в нерасшифровываемом виде – в виде хешей. Кроме того, исключается возможность кражи пароля в процессе передачи его по сети от клиента до сервера, так как пароль передается уже в зашифрованном виде.

Раздел «Список несчастных случаев» – «Обзор»

База данных имеет следующие разделы (рис. 2):

– «Список несчастных случаев» (НС) – основной раздел, в котором пользователю предоставляется доступ к введенной в БД информации о НС;

– «Отчетные документы»;

– «Квалификация НС»;

– «Тяжесть НС»;

– «Виды НС»;

– «Подразделения»;

– «Пострадавшие».

В каждом разделе пользователю доступны кнопки:

– «Найти» – предоставляет пользователю доступ к элементам поиска по текущему разделу БД;

– «Добавить» – дает возможность добавить элемент в выбранном разделе БД;

– «Редактировать» – предоставляет возможность редактирования любого элемента в выбранном разделе БД. Непосредственно окно подробного редактирования элемента открывается по щелчку мышкой по иконке «» напротив пункта списка;

– «Удалить» – дает возможность удалить один элемент в выбранном разделе БД. Элемент удаляется по щелчку мышкой по иконке «» напротив удаляемого пункта списка;

– «Распечатать» – предоставляет пользователю упрощенный вид выбранного пункта БД и предлагает вывести отчет на печать.

Раздел БД «Список несчастных случаев» представляет собой таблицу с параметрами:

– порядковый номер (№) – номер выводимой записи от 1;

– аннотация – краткое описание НС;

– отчетный документ о НС – документы, подгружаемый из раздела «Отчетные документы» и доступный для просмотра по щелчку мышью;

– регистрационный номер акта – номер документа (необязательное поле);

– пострадавшие – список пострадавших, подгружаемый из раздела «Пострадавшие»;

– подразделение пострадавшего – подразделение, подгружаемое из раздела «Подразделения»;

– дата НС – дата в формате «ДД.ММ.ГГГГ»;

– напоминание–ячейка, в которой содержится информация о привязанных к этой записи напоминаниях;

– квалификация – информационные метки, позволяющие классифицировать НС по типам, подгружаемым из раздела «Квалификации НС», к примеру «Производственный НС», «Одиночный НС», и т. д.

– вина администрации – поле принимает одно из двух значений: Да/Нет;

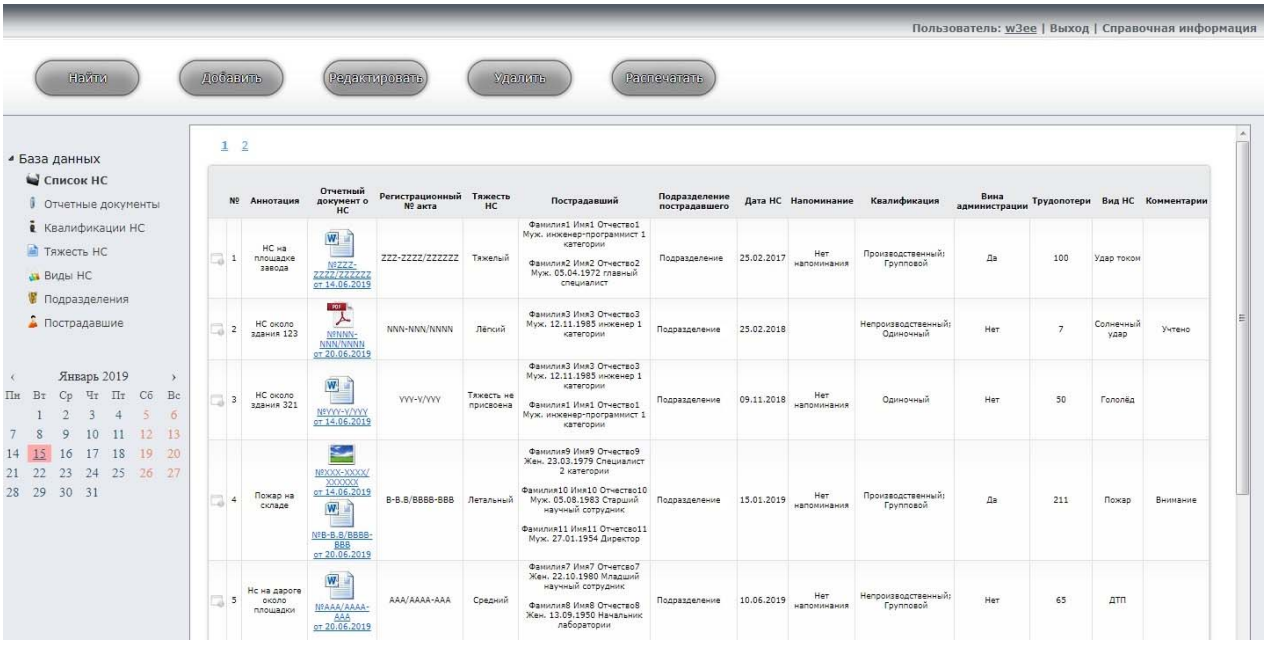


Рис. 2. Основное окно и разделы базы данных

– трудопотери – числовое значение, обозначающее количество рабочих дней, которые были потеряны по причине НС;

– вид НС – один из видов НС, подгружаемый из раздела «Виды НС»;

– комментарии – необязательное поле, в котором пользователь может записать любую полезную ему информацию.

Информация в БД выводится постранично, предоставляя пользователю доступ к перемещению по страницам по нажатию на номера страниц вверху БД « 1 2 ».

Раздел «Список несчастных случаев» – «Поиск»

Раздел «Поиск» открывается по щелчку на кнопку «Поиск». В верхней части окна появляется форма поиска (рис. 3).

В БД доступен поиск по всем ячейкам таблиц кроме ячейки «Отчетный документ о НС». Пользователь может комбинировать параметры поиска любым удобным ему способом. Если одна из ячеек поиска не выбрана, то считается, что ей соответствуют все записи БД.

На рис. 3 продемонстрировано два различных поиска. Первый – поиск всех НС по выбранному подразделению. Второй – поиск по виду НС.

В обоих случаях были найдены строки БД, соответствующие указанным параметрам поиска.

Раздел «Список несчастных случаев» – «Добавить/Редактировать»

Переход в информационную панель «Добавить/Редактировать» происходит по щелчку на кнопку «Добавить» или через щелчок по иконке «» при редактировании БД (рис. 4).

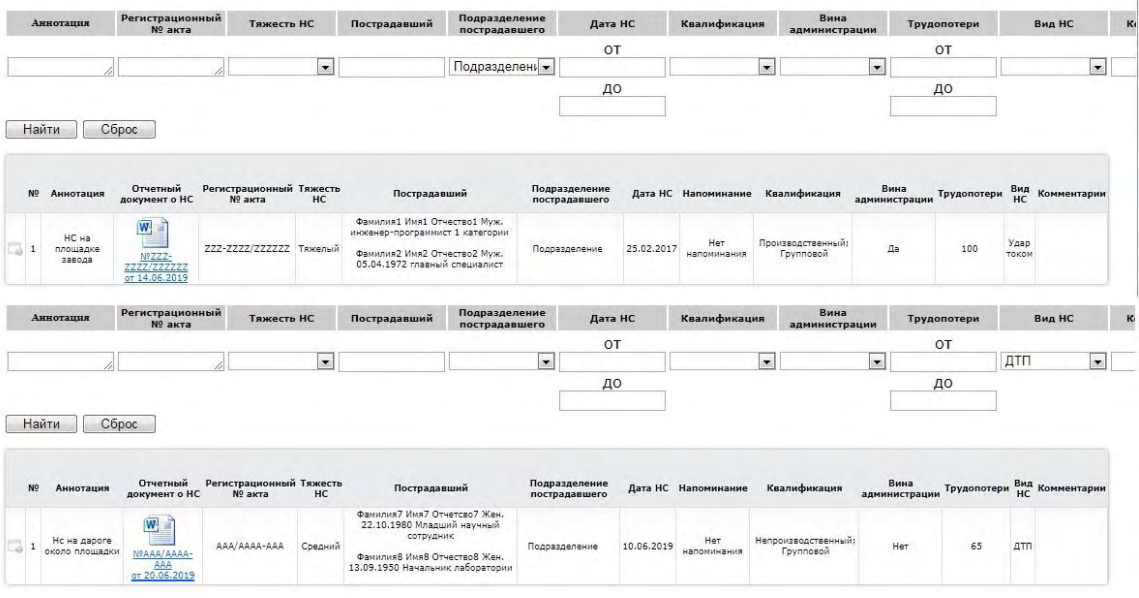


Рис. 3. Образец формы поиска

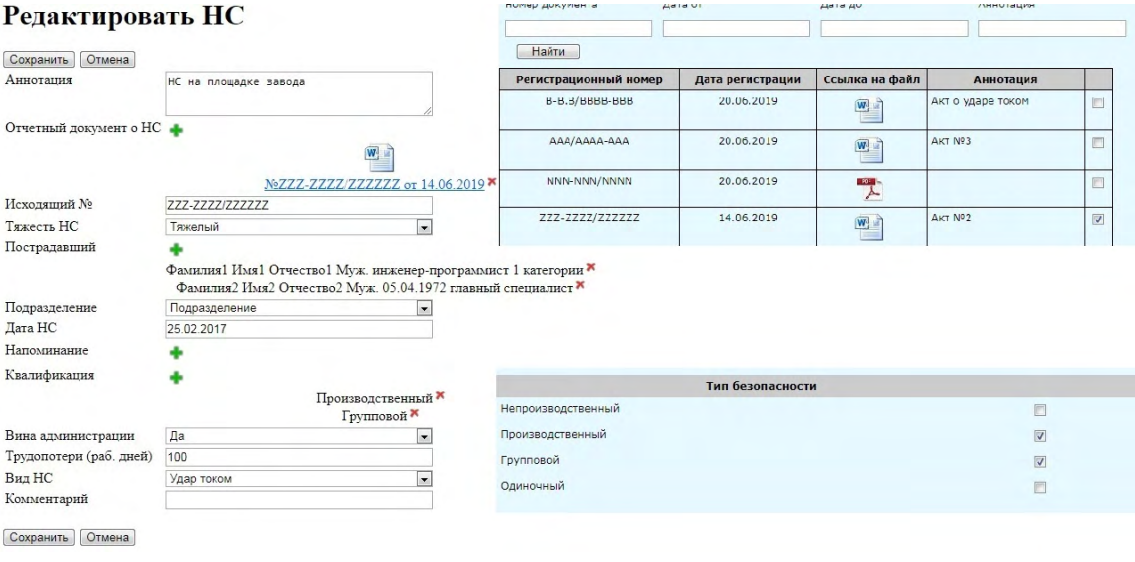


Рис. 4. Образец информационной панели «Добавить/Редактировать»

В этом разделе пользователь может внести изменения в любой НС, включая прикрепление к записи любого количества документов, любого количества пострадавших и любого количества квалификаций НС.

При редактировании существующей записи, в текстовые поля добавляются все данные, которые были связаны с редактируемым НС.

Поля «Тяжесть НС», «Пострадавший», «Подразделение», «Напоминание», «Квалификация», «Вид НС» подгужаются из других частей БД и доступны для выбора. При необходимости добавления в эти поля нового элемента, необходимо закрыть страницу редактирования и перейти в соответствующий раздел БД.

При добавлении в НС документов, пользователю доступен удобный поиск по аннотации документа, его номеру и дате регистрации.

Раздел «Отчетные документы»

При переходе в раздел «Отчетные документы» пользователю предоставляется список всех загруженных в БД файлов (доступен постраничный просмотр). Файлы доступны для свободного просмотра по щелчку по иконке файла в столбце «Ссылка на файл». При нажатии на кнопку «Добавить», пользователю предоставляется форма загрузки документа с указанием даты регистрации, номера документа, краткого описания и кнопки, отвечающей за выбор файла из файловой системы. Для загрузки доступны файлы в форматах doc, docx, jpg, pdf, png, txt и rar (рис. 5).

Разделы «Квалификация, тяжесть, виды, подразделения, пострадавшие»

Разделы «Квалификация», «Тяжесть», «Виды», «Подразделения» и «Пострадавшие» являются вспомогательными. Здесь пользователю доступен функционал «Добавить», «Удалить», «Редактировать» (рис. 6). Указанные разделы существует для подгрузки в основной раздел БД «Список НС».

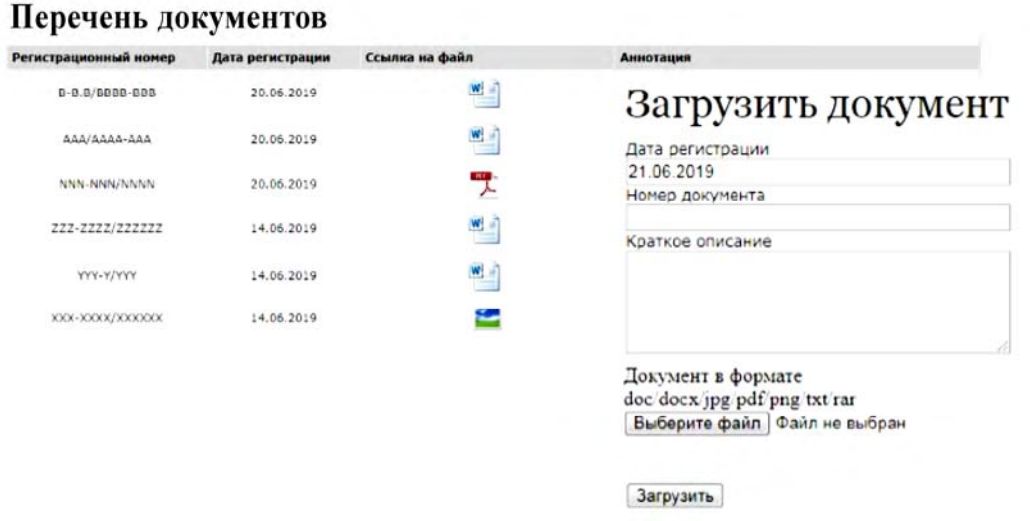


Рис. 5. Окно загрузки файлов

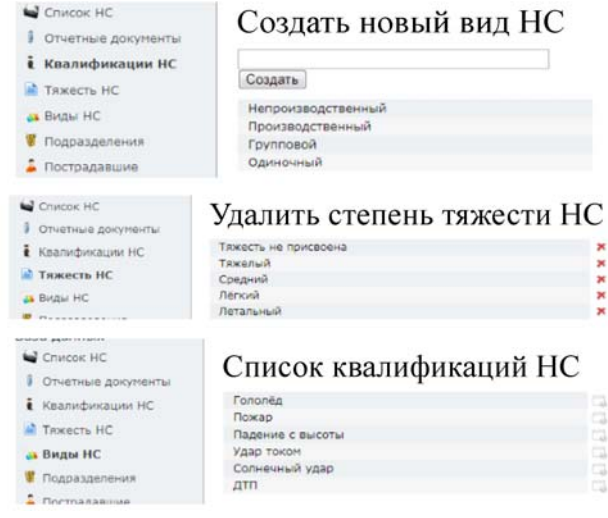


Рис. 6. Краткий обзор информационных панелей «Добавить», «Удалить» и «Редактировать»

Раздел «Пострадавшие» был доработан с целью возможности включения в БД более полной информации о сотрудниках предприятия. Были добавлены разделы «Фамилия», «Имя», «Отчество», «Пол», «Дата рождения», «Должность» (рис. 7).

Функционал панели «Календарное планирование»

В любом разделе БД пользователю доступна интерактивная панель «Календарное планирование». На этой панели автоматически отмечаются все НС, которые были внесены в систему и для которых был заполнен столбец «Дата НС». Указанные несчастные случаи отображаются на календаре подчеркнутой цифрой с красным фоном. При клике на отмеченный день происходит переход на страницу БД «Поиск» и пользователю предоставляется вся информация о НС, произошедших в этот день (рис. 8).

По месяцам панели «Календарное планирование» пользователь может свободно перемещаться, нажимая на кнопки «<»и «>».

Функция «Распечатка отчетов»

В любой панели БД пользователю доступна кнопка «Распечатка отчетов». Данная кнопка позволяет вывести результат поиска по БД в удобном для печати формате и предлагает отправить данный отчет на принтер (рис. 9).

Рис. 7. Образец раздела «Пострадавшие»

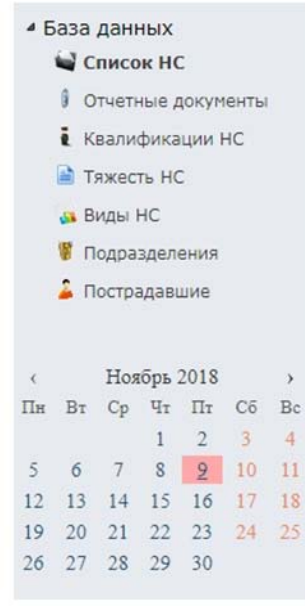


Рис. 8. Информационная панель «Календарное планирование»

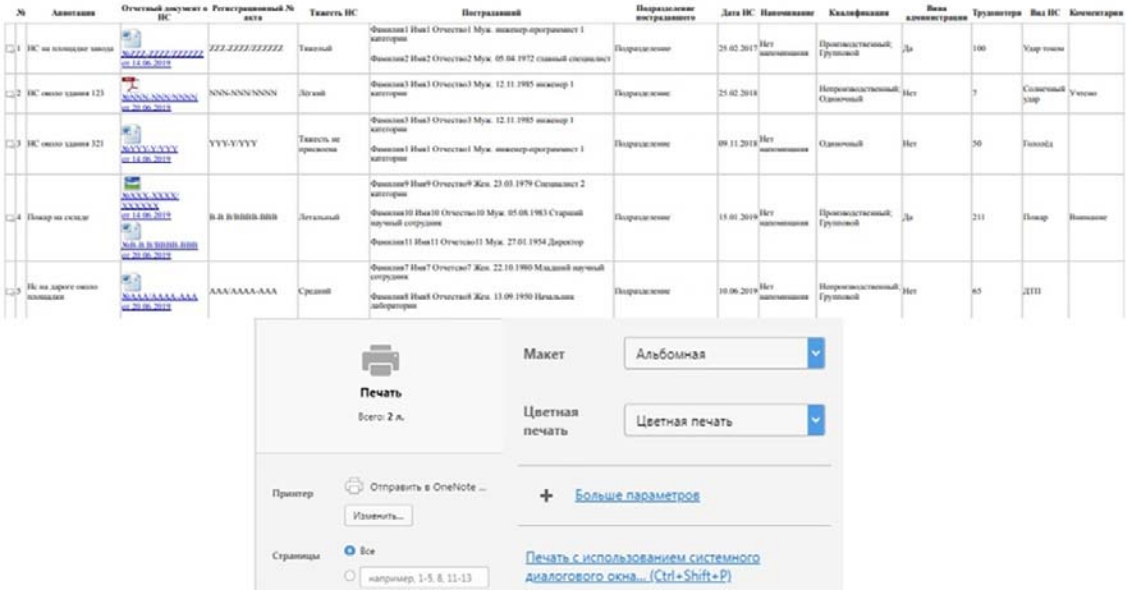


Рис. 9. Раздел «Распечатка отчетов»

Заключение

БД «Учет несчастных случаев в РФЯЦ-ВНИИЭФ» соответствует требованиям, описанным в ТЗ, и позволяет организовать учет несчастных случаев на предприятии.

БД «Учет несчастных случаев» создана и введена в промышленную эксплуатацию в РФЯЦ-ВНИИЭФ.

Литература

1. Кузнецов М. В., Симдянов И. В., Голышев С. В. PHP 5 на примерах.Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2015.

2. Орлов С. А. Технологии разработки программного обеспечения // Учебник для вузов. 3-е издание, Санкт-Петербург, 2007;

3. Зуховицкий С. И. Математические методы сетевого планирования. М.: Наука, 1965.

СТОХАСТИЧЕСКО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОРАЖЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ МУЛЬТИАГЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Е. А. Васильева, А. В. Огородников, И. А. Крючков

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В последние годы у крупных предприятий и ведомств РФ, включая Министерство обороны РФ, выросла потребность в различных средствах поддержки принятия решений, основанных на имитационном моделировании и оптимизации поведения действующих или перспективных пространственно-распределенных систем. В частности, одной из актуальных задач является задача моделирования боевых действий и поиск оптимальных режимов ведения боя. Анализ результатов такого моделирования является важным аспектом с точки зрения оценки возможностей, как отдельных боевых единиц, так и имеющихся боевых сил в целом в различных условиях при заявленных и перспективных характеристиках.

В реальных условиях взаимодействие между различными тактическими единицами, участвующими в бою, подчиняется сложным закономерностям, описать которые точно и полно не представляется возможным. Задача усложняется при возрастании числа рассматриваемых тактических единиц. В силу этого любая математическая модель будет обладать некоторой степенью приближенности, позволяющей различать более точные и менее точные модели одного и того же физического процесса.

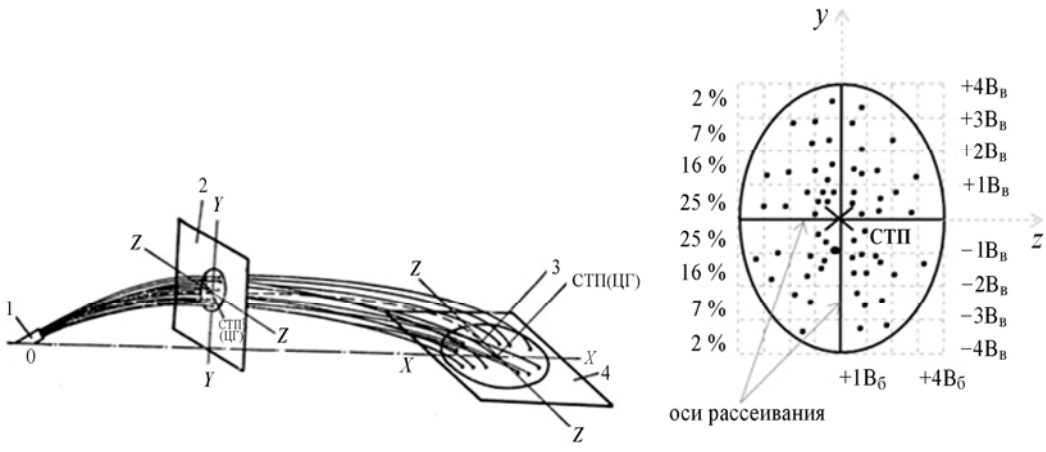
В различных работах [1–7], посвященных моделированию боевых действий, встречаются два основных типа моделей: аналитические и стохастические. В аналитических моделях результаты моделирования связываются с исходными данными формульными математическими зависимостями. Суть любой стохастической модели состоит в том, что некоторое исследуемое явление рассматривается как случайный процесс. Стохастические модели применяются в случаях, когда их использование позволяет быстрее и проще, с точки зрения затрачиваемых ресурсов, получить окончательный результат, чем при использовании аналитических моделей, а также, когда цели исследования аналитическими методами достичь невозможно.

Рассматриваемая в докладе тема актуальна в связи с отсутствием на данный момент времени моделей поражения, которые бы, с одной стороны, учитывали исходные данные и различные параметры задачи, а с другой стороны, позволили бы исследовать динамику боя в процессе имитационного мультиагентного моделирования.

Рассматривается способ моделирования боевых действий, который сочетает аналитические и стохастические подходы к моделированию боевых действий. Стохастические подходы позволяют смоделировать взаимодействия объектов, между которыми имеются сложные зависимости, учесть случайные факторы, а аналитические – получить ответ для конкретной реализации таких взаимодействий.

Во многих современных моделях поражения целей, в том числе в тех, которые используются в компьютерных играх, ущерб, нанесенный цели, определяется аналитической формулой: количество попавших в цель пуль × ущерб от одной пули. Другой подход основан на том, что уничтожение цели является случайным событием, разыгрываемым в результате статистических испытаний. Однако такие модели полностью исключают из рассмотрения всевозможные параметры, учитывающие сложные реальные зависимости и влияющие на результат моделирования, и, таким образом, не отражают в полной мере реальной картины мира.

Ключевыми сущностями в разработанной авторами модели являются стрелок, оружие и цель. При стрельбе из одного и того же образца оружия даже при строгом соблюдении одинаковых условий наблюдается рассеивание пуль, связанное со всевозможными систематическими и случайными ошибками (неточное определение координат цели; погрешность прицеливания; влияние метеорологических факторов и т. п.). Большинство факторов, от которых зависит рассеивание – это ошибки, подчиняющиеся нормальному закону распределения. Следовательно, точки попадания пуль также будут распределены по нормальному закону на плоскости попаданий (плоскости рассеивания). Площадь рассеивания имеет форму эллипса. Для дальнейшего понимания изложенного материала необходимо ввести некоторые понятия. Точка пересечения средней траектории пули с поверхностью цели называется средней точкой попадания (СТП) (рис. 1а). Взаимно перпендикулярные линии, проведенные через СТП так, чтобы одна из них совпадала с направлением стрельбы, называются осями рассеивания. Основной мерой рассеивания пуль являются срединные отклонения по дальности, высоте и боковому направлению, обозначаемые буквами $B_д, B_в, B_б$ соответственно. Если от какой-либо оси рассеивания в плоскости рассеивания отложить в обе стороны последовательно полосы, равные по ширине соответствующему срединному отклонению, то вся площадь рассеивания окажется



а б

Рис. 1. Траектории пуль и шкала рассеивания: а – траектории пуль: 1 – ствол оружия, 2 – вертикальная плоскость попаданий, 3 – средняя траектория пули, 4 – горизонтальная плоскость попаданий; б – шкала рассеивания

разделенной на 8 полос, а полное рассеивание по любому направлению будет равно восьми срединным отклонениям (рис. 1б). Отклонения от центра рассеивания могут превышать четыре срединных отклонения, но вероятность их появления составляет менее 1 % .

Величины срединных отклонений зависят от расстояния до цели. Данные об этих величинах берутся из таблиц стрельбы для данного типа оружия [8]. Такие таблицы также содержат переходные коэффициенты изменения срединных отклонений при изменении положения стрельбы.

Далее будет рассматриваться только вертикальная плоскость рассеивания – плоскость *Oyz*. Плотность вероятности точек попадания пуль в этойплоскости имеет вид:

$$f(y,z)=\frac{\rho^2}{\pi B_B B_б}e^{-\rho^2\left[\left(\frac{y-y_c}{B_B}\right)^2+\left(\frac{z-z_c}{B_б}\right)^2\right]}, \qquad (1)$$

где y_c, z_c – отклонение СТП от центра цели.

Чтобы найти вероятность попадания в цель, нужно проинтегрировать плотность вероятности из (1) по площади цели:

$$P=\iint_S f(y,z)\,dS. \qquad (2)$$

Так для прямоугольной цели с полуразмерами a и b и сторонами, параллельными осям рассеивания, эта формула примет вид:

$$P=\frac{1}{4}\left[\widehat{\Phi}\left(\frac{y_c+a}{B_B}\right)-\widehat{\Phi}\left(\frac{y_c-a}{B_B}\right)\right]\times \left[\widehat{\Phi}\left(\frac{z_c+b}{B_б}\right)-\widehat{\Phi}\left(\frac{z_c-b}{B_б}\right)\right], \qquad (3)$$

где $\widehat{\Phi}=\frac{2\rho}{\sqrt{\pi}}\int_0^x e^{-\rho^2t^2}dt$ – приведенная функция Лапласа, $\rho\approx 0,477$.

Большинство реальных целей имеют сложную форму, отличную от прямоугольника. Если цель мала по сравнению с площадью рассеивания, то вероятность попадания рассчитывается по формуле:

$$P=k_ф P_1, \qquad (4)$$

где $k_ф$ – коэффициент фигурности, равный отношению площади цели к площади описанного прямоугольника, P_1 – вероятность попадания в прямоугольник, описанный вокруг цели. В противном случае, вероятность попадания в цель рассчитывается по формуле (3), в которую вместо a и b подставляются приведенные полуразмеры цели. Приведенными называются размеры такого прямоугольника, вероятность попадания в который равна вероятности попадания в цель. Данные о приведенных размерах целей, о размерах описанных прямоугольников и коэффициентах фигурности даются в таблицах размеров целей [1, 3, 8].

Если известно среднее число попаданий, необходимое для поражения цели, а также число произведенных выстрелов, то полная вероятность поражения цели вычисляется по формуле:

$$W=1-\left(1-\frac{p_1}{\omega}\right)\left(1-\frac{p_2}{\omega}\right)\ldots\left(1-\frac{p_n}{\omega}\right), \qquad (5)$$

где $p_1, p_2, \ldots, p_n$ – вероятности попадания в цель 1-м, 2-м, ... , n-м выстрелом соответственно, ω – число попаданий, необходимое для поражения цели.

Приведенная формула (5) справедлива в случае применения оружия для одиночной стрельбы, когда выстрелы можно считать независимыми. В случае применения автоматического оружия вычисления

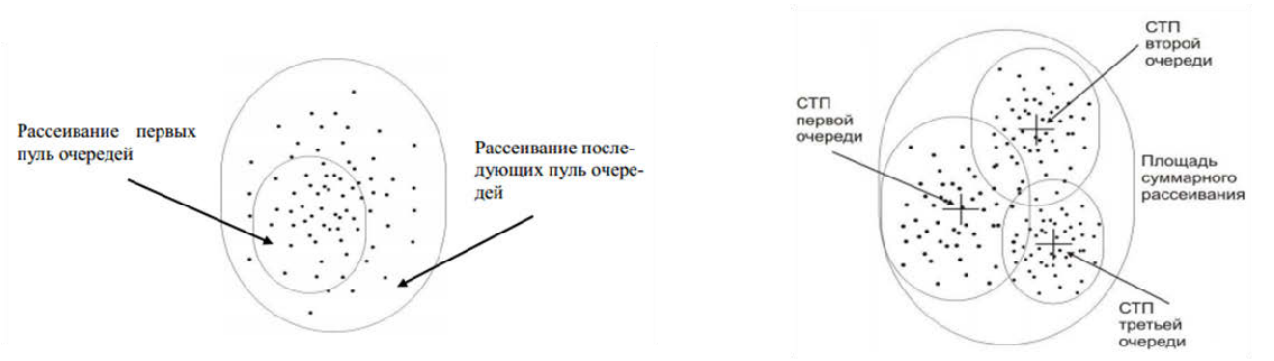


Рис. 2. Рассеивание при стрельбе очередями

значительно усложняются. Изучение рассеивания при стрельбе очередями, рис. 2, показало, что вследствие неоднообразного удержания оружия рассеиваются не только выстрелы в очереди, но и СТП очередей. А если автоматическое оружие без закрепляющего механизма, то еще и выделяется первый выстрел, что является результатом отдачи и реакции на отдачу при стрельбе. Формально это означает введение в рассмотрение срединных отклонений СТП $B_{СТПв}$, $B_{СТПб}$, срединных отклонений первых пуль очереди $B_{1в}, B_{1б}$ и срединных отклонений последующих пуль очереди $B_{в}, B_{б}$, которые также являются табличными данными.

Итак, при стрельбе из автоматического оружия вероятность поражения цели nвыстрелами вычисляется по формуле:

$$W = 1 - \left(1 - \frac{p_1}{\omega}\right)\left(1 - W_{n-1}\right), \tag{6}$$

где p_1 – вероятность попадания первым выстрелом очереди, W_{n-1} – вероятность поражения цели последующими выстрелами очереди, которая в свою очередь рассчитывается по формуле:

$$W_{n-1} = 1 - \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\left[1 - \frac{p\left(y_c, z_c\right)}{\omega}\right]^{n-1} \times \frac{\rho^2}{\pi B_{СТПв} B_{СТПб}} e^{-\rho\left(\frac{y_c^2}{B_{СТПв}^2} + \frac{z_c^2}{B_{СТПб}^2}\right)} dydz, \tag{7}$$

где $p\left(y_c, z_c\right)$ – вероятность попадания последующим выстрелом (считаем, что вероятности попадания последующих выстрелов равны).

Интеграл в формуле (7) не берется аналитически, поэтому необходимо производить численное интегрирование.

Как было сказано ранее, стрельба сопровождается различными ошибками [0]. В разработанной авторами модели учитывались следующие ошибки стрельбы: приведения оружия к нормальному бою, округления установки прицела, определения дальности до цели, определения поправок на температуру воздуха и заряда, определения поправок на ветер, определения скорости цели, ошибки наводки. В силу громоздкости вычисления данных ошибок не приводятся в настоящем докладе. В формулах учитывается суммарная ошибка стрельбы, добавленная определенным образом к срединным отклонениям.

Зная, как вычислять вероятность поражения цели, можно решать различные задачи с заданным набором целей и стрелков.

Стоит выделить особые случаи расчета вероятности поражения цели, а именно случаи вооруженных столкновений таких типов как:

1) дуэль;
2) подразделение против подразделения;
3) стрелок против групповой цели.

Далее будет кратко описано вычисление вероятности поражения цели в каждом из этих случаев.

Дуэль

В дуэльном бою участвуют две тактические единицы, каждая из которых одновременно является и стрелком, и целью. Пусть одна из участвующих сторон обозначается буквой *A*, другая – буквой *B*. Состояние дуэли будет характеризоваться парой чисел (i, j), где i — номер очередного выстрела, который предстоит сделать стороне A, j – номер очередного выстрела стороны B. При определенных предположениях можно рассматривать состояния дуэли как состояния марковской цепи. Система дифференциальных уравнений, описывающая полученную марковскую цепь для случая стрельбы из автоматического оружия с выделенным первым выстрелом, имеет вид (промежуточные выкладки опущены) [2]:

$$\begin{cases} \dfrac{dw_{11}}{dt} = \lambda_1 p_1 + \lambda_1\left(1 - p_1\right) w_{21} + \lambda_2\left(1 - q_1\right) w_{12} - \left(\lambda_1 + \lambda_2\right) w_{11}, \\ \dfrac{dw_{12}}{dt} = \lambda_1 p_1 + \lambda_1\left(1 - p_1\right) w_{22} - \left(\lambda_1 + \lambda_2 q_2\right) w_{12}, \\ \dfrac{dw_{21}}{dt} = \lambda_1 p_2 - \left(\lambda_1 p_2 + \lambda_2\right) w_{21} + \lambda_2\left(1 - q_1\right) w_{22}, \\ \dfrac{dw_{22}}{dt} = \lambda_1 p_2 - \left(\lambda_1 p_2 + \lambda_2 q_2\right) w_{22}. \end{cases} \tag{8}$$

Использованные обозначения: $w_{ij}(t)$ – вероятность победы стороны A (поражения стороны B) в дуэли, начавшейся в состоянии (i,j), за время t, λ_1, λ_2 – боевые скорострельности оружия сторон A и B соответственно, p_i – вероятность поражения противника стороной A i-м выстрелом, q_i – вероятность поражения противника стороной B i-м выстрелом.

Принятые предположения: условия столкновения не меняются, когда номера очередных выстрелов больше 1, то есть выполняются условия: при любом $i \geq 2$ и любых j $w_{ij}(t) = w_{2j}(t)$, при любых i и любом $j \geq 2$ $w_{ij}(t) = w_{i2}(t)$; $p_2 = p_3 = p_4 = ... = p_n$.

Решая систему (8) при начальных условиях $w_{ij}(0) = 0$ для любых (i,j), получим значение $w_{11}(t)$ – вероятность победы стороны A в дуэли за время t. Вероятность победы стороны B за время t равна $1 - w_{11}(t)$.

Стрелок против групповой цели

Групповая цель состоит из m одинаковых одиночных целей, равномерно расположенных на фронте шириной B (рис. 3).

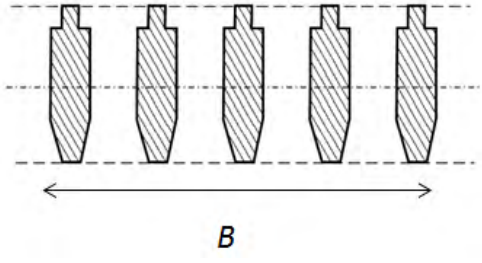


Рис. 3. Схематическое изображение групповой цели

Пусть цели живые, а попадание в такую цель равносильно ее поражению. При стрельбе из автоматического оружия по групповой цели с рассеиванием по фронту или в глубину вычисляется по формуле [1, 3]:

$$p = 1 - (1 - p_m)^{\frac{N}{m}}. \qquad (9)$$

где p_m – вероятность поразить хотя бы одну из элементарных целей, N – число выстрелов.

При рассеивании по фронту $p_m = \dfrac{2\bar{b}m\hat{\Phi}\left(\dfrac{\bar{a}}{E_y}\right)}{B + 3E_{cz}}$,

а при рассеивании в глубину $p_m = \dfrac{2\bar{a}m\hat{\Phi}\left(\dfrac{\bar{b}}{E_z}\right)}{B + 3E_{cz}}$,

где $2\bar{a}, 2\bar{b}$ – приведенные высота и ширина одиночной цели, E_y, E_z – суммарные ошибки стрельбы по высоте и боковому направлению, $E_{cz} = \sqrt{E_z^2 - B_\delta^2}$.

Математическое ожидание числа пораженных одиночных целей равно $M = m \cdot p$.

Подразделение против подразделения

Рассматривается стрельба подразделения, состоящего из C стрелков с однотипными образцами оружия, в $Ц$ целей, вероятность поражения каждой их которых одним образцом вооружения равна W. Принципиально могут быть два случая: $Ц \geq C$ (изобилие целей) и $Ц < C$ (недостаток целей) [1]. Первый случай соответствует оборонительному бою, второй случай отвечает наступательному бою. В каждом из этих случаев распределение целей по стрелкам может быть различным: организованным или неорганизованным. Организованное целераспределение предполагает, что на каждую цель назначается один или несколько стрелков, а неорганизованное – что каждый стрелок выбирает себе цель, при этом возможно, что часть целей окажется необстреляной, тогда как по другим целям сосредоточат огонь несколько стрелков.

Пусть М – математическое ожидание числа пораженных целей.

При $Ц \geq C$:

– для организованного целераспределения: $M = C \cdot W$;

– для неорганизованного целераспределения: $M = Ц \cdot \left[1 - \left(1 - \dfrac{W}{Ц}\right)^{Ц}\right]$.

При $Ц < C$:

– для организованного целераспределения: $M = Ц \cdot \left[1 - (1 - W)^k (1 - W\alpha)\right]$, $\dfrac{C}{Ц} = k + \alpha$, k – целое число, α – правильная дробь;

– для неорганизованного целераспределения: $M = Ц \cdot \left(1 - \left(1 - \dfrac{W}{Ц}\right)^{Ц}\right)$.

Представленные выше аналитические зависимости позволяют охватить различные случаи вооруженных столкновений и учесть всевозможные реальные параметры. Однако имеются случайные факторы, учитывать которые целесообразно путем разыгрывания в процессе имитационного моделирования боевых действий. Это могут быть различные параметры в зависимости от постановки решаемой задачи, например, время начала стрельбы, момент поражения боевой единицы, вероятность поражения цели (в случае поиска момента поражения) и т. д. Кроме того, поражение цели является случайным событием, и, зная лишь вероятность наступления этого события, нельзя дать ответ, уничтожена цель

или нет. Однако для практических задач именно такой ответ представляет интерес. В связи с этим, был разработан генератор, позволяющий на основании рассчитанной вероятности поражения цели получить нужный ответ – уничтожена цель или нет. Принцип работы генератора ответа заключается в следующем: генерируется случайное число на отрезке [0;100]; это число сравнивается с рассчитанной вероятностью поражения цели; если оно меньше или равно рассчитанной вероятности, то генератор выдает ответ «цель уничтожена», в противном случае ответ – «цель не уничтожена».

Описанная выше модель вооруженных столкновений реализована на языке программирования C++ в виде библиотеки, что позволяет ее использовать при разработке программных продуктов. Принцип работы библиотеки следующий. Некоторый сервис, получая в качестве входных данных характеристики стрелков, характеристики оружия, имеющегося у стрелков, характеристики целей и параметры, характеризующие внешние условия, выдает нужный результат в зависимости от постановки задачи. Сервис может быть реализован как класс или метод класса.

В библиотеке реализованы следующие основные классы:

1) класс *Shot* – реализует объект «Стрелок». В классе предусмотрено управление следующими характеристиками стрелка:

– уровень стрелка: лучший, средний;

– позиция стрелка: лежа с упора, лежа с руки, на ходу без остановки и т.д.;

– расстояние до цели;

– состояние: атака, оборона;

– номер цели, по которой производится стрельба;

2) класс *Weapon* – реализует объект «Оружие» и имеет два класса-наследника: *Weapon_SingleShot*и *Weapon_Automatic*. Класс *Weapon_SingleShot* предназначен для реализации объекта «неавтоматическое оружие», а класс *Weapon_Automatic* – для реализации объекта «автоматическое оружие». От этих классов, в свою очередь, наследуются классы оружия определенного типа. Таким образом, имеется возможность, как задать свой тип оружия, так и выбрать из предусмотренных в библиотеке типов. На рис. 4 представлена диаграмма, отображающая связь между классами, реализующими объект «Оружие».

Управляемые параметры в классе Weapon:

– ошибки стрельбы: поправки на температуру, скорость ветра, скорость и направление движения цели, ошибка определения дальности до цели и др.

– боевая скорострельность (если необходимо для расчета в заданной постановке).

Управляемые параметры в классе *Weapon_ SingleShot*:

– число выстрелов;

– характеристики рассеивания.

Управляемые параметры в классе *Weapon_ Automatic:*

– для автоматического огня: число очередей, число выстрелов в очереди;

– характеристики рассеивания;

– для одиночной стрельбы: число выстрелов.

В случае выбора определенного типа оружия характеристики рассеивания и различные поправки к ним не задаются, а считываются из файла в формате *.csv. Кроме того, для некоторых из данных объектов имеется возможность выбрать подтип задаваемого оружия. Например, для автомата Калашникова: АК74, АКС74, АКМ, АКМС, АКМ или АКМС с прибором для беззвучной и беспламенной стрельбы ПБС-1;

3) класс *Target* – реализует объект «Цель».

Управляемые параметры:

– тип цели: головная фигура, грудная фигура, поясная фигура, бегущая фигура, пулемет, пехота в автомобиле и т. д.;

– размеры цели, если тип цели не задан;

– скорость цели;

– направление движения цели;

– номер цели;

– количество выстрелов, необходимое для поражения цели;

4) класс *Conditions* – позволяет задавать внешние условия боя. Управляемые параметры:

– температура;

– скорость продольного ветра;

– скорость бокового ветра.

Кроме названных основных классов были реализованы вспомогательные – *TargetShot*и *Shot_with_Weapon*.

Класс *TargetShot* предназначен для работы с объектом, реализующим одновременно и цель, и стрелка.

Класс *Shot_with_Weapon* позволяет рассматривать стрелка и имеющееся у него оружие как один объект.

Все фигурирующие в расчетах табличные данные хранятся в файлах формата *.csv.

Реализованная в библиотеке модель предоставляет возможности для проведения расчетов в следующих постановках:

1) один стрелок и одна цель, сосредоточенный огонь:

– стрельба одиночными выстрелами;

– автоматический огонь очередями.

Расчет вероятности поражения цели;

2) несколько стрелков и одна цель, сосредоточенный огонь.

Расчет:

– вероятности поражения цели;

– момента поражения цели (вероятность поражения разыграна заранее);

– вероятностей поражения цели за время t(при заданных скорострельностях оружия);

– вероятностей поражения цели при заданном числе выстрелов для каждого стрелка;

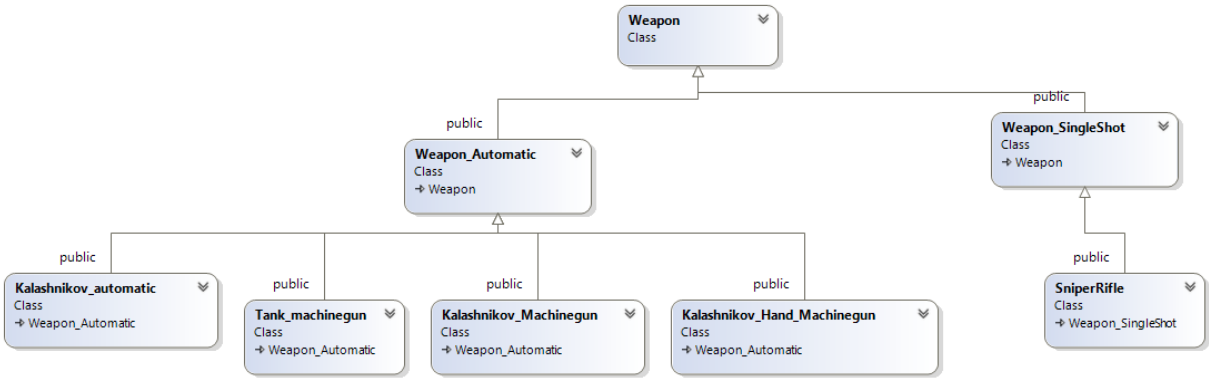


Рис. 4. Диаграмма классов для реализации объекта «Оружие»

3) несколько стрелков и несколько целей. Расчет:

– момента поражения каждой цели (при условии, что вероятности поражения каждой из целей известны);

– вероятностей поражения каждой из целей за время *t* (при заданных скорострельностях оружия);

– вероятностей поражения каждой из целейпри заданном числе выстрелов для каждого стрелка;

– уничтожена/не уничтожена каждая из целей;

4) стрельба с рассеиванием по фронту: один стрелок с автоматическим оружием и группа одинаковых целей (групповая цель).

Расчет вероятности поражения групповой цели и математического ожидания числа пораженных целей;

5) стрельба с рассеиванием в глубину: один стрелок с автоматическим оружием и группа одинаковых целей (групповая цель), автоматическое оружие.

Расчет вероятности поражения групповой цели и математического ожидания числа пораженных целей;

6) стрельба подразделением: группа одинаковых стрелков на группу одинаковых целей. Подзадачи:

– случай изобилия целей;

– случай изобилия стрелков.

Расчет математического ожидания числа пораженных целей;

7) дуэль: один стрелок с оружием против другого стрелка с оружием. Марковский процесс.

Расчет вероятностей поражения каждого из участников дуэли.

Необходимые расчеты и результаты в библиотеке обеспечивают сервисы *Damage*, *GroupTarget, Subdivisions, Duel:*

– сервис *Damage* – является базовым сервисом. Позволяет получать результат в постановках 1, 2, 7, 8 из списка выше;

– сервис *GroupTarget*– обеспечивает результат при наличии групповой цели и может быть использован в постановках 3 и 4;

– сервис *Subdivisions* – обеспечивает результат в таких задачах, когда в боевых действиях участвуют подразделения (пункт 5 из списка решаемых задач);

– сервис *Duel* – предназначен для моделирования дуэльного боя (пункт 6 из списка решаемых задач).

Для демонстрации работы библиотеки рассмотрен следующий пример.

Пять стрелков с автоматами Калашникова АК74 из положения стоя с руки ведут огонь тремя очередями по пять выстрелов. Уровень каждого из стрелков – средний. Цели представляют собой бегущие фигуры. Количество целей – пять. Ошибки стрельбы не учитываются. Расстояния стрелков до целей и номера целей, по которым ведут огонь стрелки, выбраны случайным образом.

Результаты расчета данной задачи представлены на рис. 5а.

Две цели с номерами 1, 2 были уничтожены. Кроме того, прослеживается зависимость: чем больше расстояние от стрелка до цели, тем меньше вероятность поражения.

Таким образом, в модели обеспечена возможность управления характеристиками стрелков, характеристиками оружия, которым они обладают, характеристиками целей и параметрами внешней среды. Кроме того, реализованы различные формы вооруженных столкновений: дуэль (один стрелок против одной цели), группа стрелков против одной цели, один стрелок против групповой цели в случае стрельбы с рассеиванием по фронту и с рассеиванием в глубину, подразделение против подразделения, группа стрелков против группы целей. Результатом моделирования в зависимости от постановки задачи может быть вероятность поражения каждой из тактических единиц, участвующих в бою, за данное время, математическое ожидание числа пораженных единиц в групповой цели, время уничтожения каждой боевой единицы, а также ответ, уничтожена ли каждая из целей или нет. Приведенные аналитические зависимости позволяют учесть различные реальные параметры, что делает моделирование доста-

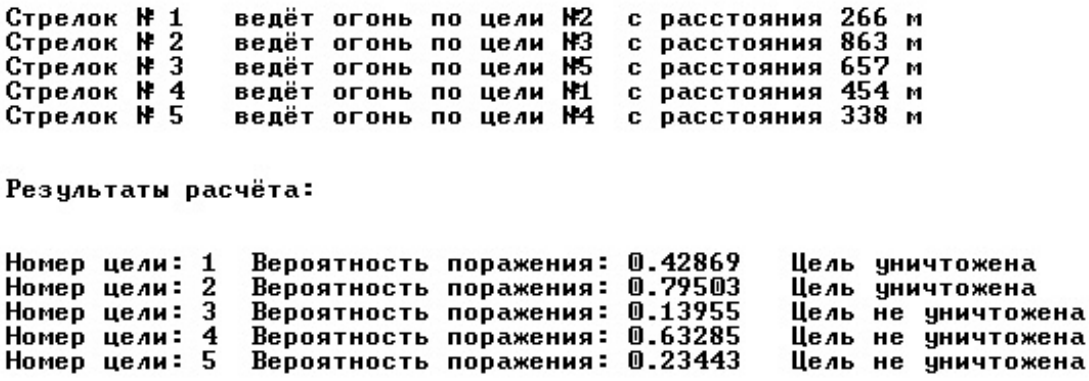


Рис. 5. Результаты расчета тестовой задачи

точно точным, а разыгрывание случайных величин – учесть случайные факторы.

Планируется внедрение разработанной модели в программную визуализационно-интеграционную платформу «ОптИМУС» (ВИП «ОптИМУС»)[0].

Литература

1. Шерешевский М. С., Гонтарев А. Н., Минаев Ю. В. Эффективность стрельбы из автоматического оружия. М.: ЦНИИ информации, 1979.

2. Ткаченко П. Н. Математические модели боевых действий. М.: Советское радио, 1969.

3. Губин С. Г. Эффективность стрельбы из вооружения боевых машин и стрелкового оружия. Новосибирск: СГГА, 2012.

4. Анисимов В. Г., Анисимов Е. Г., Осипенков М. Н., Селиванов А. А., Чварков С. В. Математические методы и модели в военно-научных исследованиях. Часть 1. М.: Военная академия Генерального штаба Вооруженных Сил РФ, 2017.

5. Анисимов В. Г., Анисимов Е. Г., Осипенков М. Н., Селиванов А. А., Чварков С. В. Математические методы и модели в военно-научных исследованиях. Часть 2. М.: Военная академия Генерального штаба Вооруженных Сил РФ, 2017.

6. Волгин Н. С. Исследование операций. Часть 2. СПб.: Военно-морская академия им. Адмирала Флота Советского Союза Н. Г. Кузнецова, 1999.

7. Вентцель Е. С. Исследование операций. М.: Советское радио.

8. Таблицы стрельбы по наземным целям из стрелкового оружия калибров 5,45 и 7,62 мм / ТС/ГРАУ № 61. Издание второе, дополненное. М.: Воениздат СССР, 1977.

9. Коваленко О. В., Крючков И. А., Ежов Д. В., Огородников А. В., Ерошкина И. В., Собанин Д. С., Хочкин Н. И., Варгина Е. Ф., Тихомиров Ю. В., Рыжих А. В., Васильева Е. А., Кондратьев А. Б. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019617157 «Визуализационно-интеграционная платформа для оптимизационного имитационного моделирования и управления системами (ВИП «ОптИМУС»)», правообладатель – ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ».

ИССЛЕДОВАНИЕ БИБЛИОТЕКИ ИНФРАСТРУКТУРЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ (ITIL)

С. С. Горелова, В. Л. Ведерников, Н. В. Горбатенко, В. В. Дунькович, О. А. Чераева

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Конец XX века ознаменовал собой переход от индустриального общества к информационному. Информация, средства ее обработки и управления стали основными стратегическими ресурсами любой организации, а достижение бизнес-целей стало напрямую зависеть от качества ИТ-услуг [1].

Обеспечить высокое качество ИТ-услуг стало возможно благодаря грамотно организованному управлению услугами. На сегодняшний день одним из лучших фактических стандартов управления ИТ-услугами, который используется предприятиями и организациями во всем мире, является ITIL (Information Technology Infrastructure Library) – библиотека инфраструктуры информационных технологий [2].

Данная работа посвящена исследованию основных возможностей и особенностей использования библиотеки ITIL для управления ИТ-сервисами.

Актуальность исследования: данная работа позволяет понять, каким образом необходимо организовать деятельность ИТ-служб с минимальными затратами и лучшим качеством предоставляемых услуг для достижения бизнес-целей организации.

Практическая значимость исследования: данная работа может служить руководством по особенностям применения ITIL для организации управления ИТ-услугами.

Теоретические аспекты управления ИТ-услугами

Появление и развитие ITIL

Библиотека ITIL – это собрание практических руководств по организации работы подразделений или компаний, предоставляющих сервисы в сфере информационных технологий. Использованный в библиотеке процессный подход полностью соответствует стандартам серии ISO 9000 (ГОСТ Р ИСО 9000) [3].

ITIL включает в себя:

– фундаментальную базу знаний в области управления ИТ-услугами во всем мире;

– систему обучения ИТ специалистов «по ITIL»;

– систему сертификации ИТ специалистов. В Европе существуют два центра сертификации по ITIL – EXIN (Голландский Экзаменационный Институт) и ISEB (подразделение Британского Компьютерного Общества);

– ИТ консалтинг. Компании-консультанты занимаются продвижением процессов ITIL и обучением. В России это Hewlett-Packard Consulting, «Ай-Теко», ИТ-Expert, «Cleverics» и др.;

– программное обеспечение для автоматизации работы ИТ служб;

– всемирное ITIL-содружество на базе множества форумов и сообществ [1].

Один из наиболее известных форумов по ITIL (IT Service Management Forum, ITSMF).

Библиотека ITIL существует уже более 20 лет и за это время претерпела три редакции.

Первоначально библиотека ITIL функционировала под руководством Центрального агентства по вычислительной технике и телекоммуникациям (Central Computer and Telecommunications Agency – CCTA) при правительстве Великобритании. В дальнейшем CCTA было объединено с Государственной торговой палатой (Office of Government Commerce, OGC). В настоящее время права на методологию принадлежат организации Axelos, которую правительство Великобритании создало вместе с компанией Capita.

В конце 1980-х начале 1990 вышла редакция ITIL v1. Основной ее особенностью стала разработка единого подхода, не зависящего от поставщика услуг. Изначально в состав библиотеки ITIL входило несколько комплектов книг (более 40), каждая из которых описывала определенную область сопровождения и эксплуатации ИТ-инфраструктуры.

Следующая серия книг – ITIL v2 – появлялась с середины 1990 годов по 2004 год. Основной целью второй версии стало уменьшение разрыва между ИТ-областью и бизнесом (акцент на согласовании бизнеса и ИТ). В ITIL v2 ИТ-служба предлагала бизнесу услуги на базе своей существующей инфраструктуры. Особое внимание было уделено управлению взаимоотношениями с заказчиком ИТ-услуг [5]. Вторая редакция ITIL включает в себя семь книг. Две из них, посвященные предоставлению и поддержке услуг, считаются наиболее популярными.

В 2004–2007 гг. были выпущены все пять книг редакции ITIL v3, следующее обновление вышло 20 июля 2011. Результатом стала ITIL v3, ориентированная на интеграцию ИТ и бизнеса по модели «поставщик услуг – заказчик услуг». Третья версия библиотеки ITIL как и ITIL v2 базируется на сервисном подходе к деятельности ИТ-службы, но строится вокруг жизненного цикла ИТ-услуг и в значительно большей степени затрагивает интересы бизнеса.

ИТ-служба анализирует цели и задачи бизнеса и, исходя из этого, предлагает услуги, которые действительно нужны бизнесу в настоящее время, т. е. предоставляет дополнительную ценность для бизнеса.

Можно выделить три этапа в эволюции понимания целей управления ИТ-услугами и результатов ИТ-деятельности, приведенные на рис. 1:

– управление ИТ-инфраструктурой (ITIL v1);

– управление ИТ-сервисами (ITIL v2);

– управление информационными бизнес-сервисами (ITIL v3 и ITIL 2011) [5].

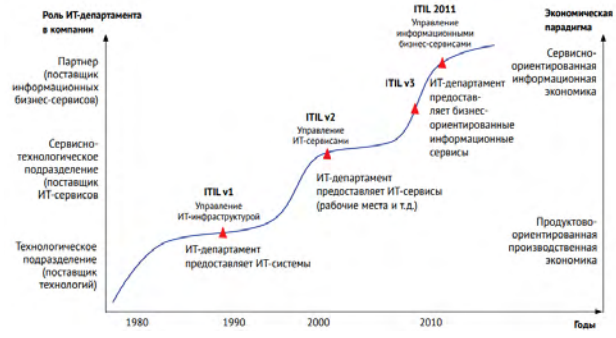


Рис. 1. Три этапа эволюции ITIL

Методологические основы библиотеки ITIL v3

Базовые понятия и основные определения ИТ-услуг

Центральным и ключевым термином ITIL является сервис (услуга).

ИТ-сервис (ИТ-услуга) – способ предоставления ценности заказчикам через содействие им в получении результатов на выходе, которых заказчики хотят достичь без владения специфическими затратами и рисками [4]. Под ценностью имеется в виду потенциальная выгода для заказчика от использования ИТ-услуги (например, экономия времени, денег и других ресурсов).

Между заказчиком и поставщиком услуг заключается соглашения об уровне сервиса (Service Level Agreement, SLA). Качество сервиса – измеряемая величина. SLA включает перечень предоставляемых сервисов, сроки и уровень сервисов (измеримые показатели качества) и стоимость сервисов.

Модели услуг, которые предлагает ITIL, имеют множество вариантов использования в зависимости от конкретного случая, что делает идею их применения универсальной, гибкой и эффективной.

Парадигма ITIL предполагает полную интеграцию ИТ и бизнеса, а также предоставление оптимальных услуг по обоснованной цене.

Упрощенная схема формирования ценности услуги показана на рис. 2.

Ценность услуги (value) измеряется в контексте двух понятий:

– полезность услуги (Service Utility) – то, что получает заказчик в результате использования услуги;

– гарантия качества услуги (Service Warranty) – то, как поставщик предоставляет услугу в терминах доступности, производительности, непрерывности и безопасности.

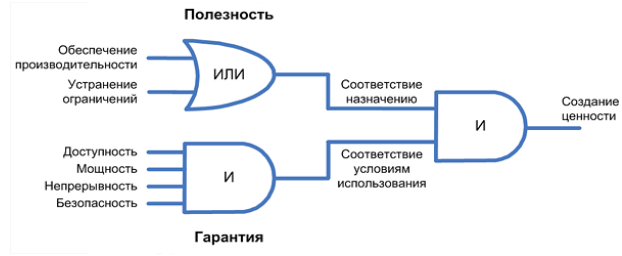


Рис. 2. Схема формирования ценности услуги

Полезность достигается обеспечением требуемой заказчиком производительности или устранением (снижением) ограничений.

Результат использования ИТ-услуги зависит не только от свойств самой услуги, но и от управления этой услугой (IT Service Management, ITSM). Управление ИТ-сервисами – это совокупность специализированных организационных возможностей для предоставления ценности заказчикам в форме услуг [1]. ITSM – это концепция управления ИТ-инфраструктурой компании, сфокусированная на предоставлении сервисов и ориентированная на удовлетворение потребностей бизнеса.

Процессные формы управления ИТ-услугами

Наиболее эффективным средством для управления ИТ-сервисами является разработка и внедрение процессов. Представление управления ИТ-инфраструктуры в виде комплекса процессов позволяет унифицировать многие аспекты взаимодействия поставщиков и заказчиков услуг. Для каждого процесса определяются роли, цели, задачи, методы и средства, а также входящая и исходящая информация.

Свойства процессов:

– процессы имеют цель и служат для достижения конкретных результатов;

– процессы измеряемы;

– процессы имеют владельцев и потребителей;

– процесс должен начинаться в определенное время, после определенного события и иметь определенную длительность. Пока идет процесс, он должен быть связан со специальным инициализирующим триггером [1].

Используя процессную модель, легко оценить преимущества, риски, ресурсы, регламентировать процедуры.

Эффективно управлять процессами можно тогда, когда они достигли определенного уровня зрелости. Всего обычно рассматривают шесть уровней зрелости.

Модели зрелости процессов в методологии CobiT [7]:

– отсутствующий. Процесс не существует;

– начальный. Деятельность осуществляется хаотически, от случая к случаю без единого подхода. Руководство не организовано;

– повторяемый, но интуитивный. Одинаковые задачи решаются разными людьми сходными мето-

дами. Однако отсутствуют формальные процедуры и распределение ответственности;

– определенный. Процедуры стандартизованы и документированы. Однако отклонения от процедур не всегда отслеживаются;

– управляемый и измеримый. Руководство контролирует и измеряет процесс и принимает меры, если процесс неэффективен. Могут использоваться инструменты автоматизации процесса;

– оптимизируемый. Соответствует целям заказчика. Организация постоянно оптимизирует свои процессы с целью повышения качества услуг или разработки новой технологии или сервисов.

Жизненный цикл сервиса

Логику ИТ-процессов в соответствии с ITIL v3 задает жизненный цикл сервиса. Основу ITIL v3 составляют следующие шесть публикаций, пять из которых часто называют ядром.

1. Введение в ITIL;
2. Сервисная стратегия (Service Strategy Processes).
3. Проектирование сервисов (Service Design Processes).
4. Преобразование сервисов (Service Transition Processes).
5. Эксплуатация сервисов (Service Operation Processes).
6. Непрерывное улучшение сервисов (Continual Service Improvement).

Пять книг соответствуют этапам жизненного цикла сервиса: от первичного анализа требований бизнеса на этапах построения стратегии и проектирования до улучшения услуги в процессе эксплуатации. Жизненный цикл сервиса представлен на рис. 3 [1].

Рис. 3. Жизненный цикл сервиса

Новая версия библиотеки ITIL

За прошедшие восемь лет ИТ-индустрия накопила критическую массу новых практик. Новые технологии, изменяющие и бизнесс, и ИТ-службы, требую адаптации процессной модели ITIL, в условия роста популярности более гибких методологий Agile и DevOps, которые хотя и не противоречат базовым принципам ITMS (IT Service Management), работают по спиральной, а не каскадной модели, традиционно описываемой в документах ITIL. По этой причине в ноябре 2017 года Axelos объявила о планах обновить библиотеку [15].

Принципы ITIL остаются вполне актуальными, но все большую популярность набирают методологии Agile и DevOps, основными причинам этого являются:

– каскадная модель реализации многих процессов ITIL;

– чрезмерное внимание процессу стратегического и тактического планирования;

– высокие требования к стандартизации процессов.

Следует подчеркнуть, что все эти причины относятся не к фундаментальным принципам ITIL, а к их практической реализации в версиях ITIL v2 и ITIL v3 библиотеки.

Обновленная методология ITIL v4

Четвертая версия ITIL, представление которой состоялось в 2019 году, станет серьёзным обновлением популярной методологии ITSM, поясняющей предприятиям, как следует автоматизировать, оптимизировать и внедрять процессы управления сервисами ИТ.

Организациям, использующим ITIL нужно учесть, что в популярном своде знаний произошли существенные изменения, направленные на модернизацию управления сервисами ИТ (IT service management, ITSM) и трансформацию их в более гибкий ресурс, приносящий дополнительные ценности бизнесу [16].

В последний раз ITIL обновлялась в 2011 году, но это были скорее косметические изменения. Обновление же 2019 года вносит гораздо более серьезные коррективы и сравнимо с теми, что произошли в 2007 году. Версия ITIL 4 ориентирована в первую очередь на адаптивность, настраиваемость и гибкость управления ИТ-сервисами.

Новая версия побуждает организации устранять разобщенность и укреплять связи и взаимодействие в рамках всего предприятия, внедряя у себя гибкие методики и практики DevOps [16]. В ITIL 4 расширяются идеи и концепции создания ценностей, автоматизации процессов и улучшения конечного результата. Неизменными остаются ориентация на хорошее управление, устойчивость, стабильность, информационную безопасность и безопасность данных – все эти идеи четко прослеживались также в ITIL 3 и предыдущих версиях.

Основные обновления и улучшения ITIL v4:

1) ITIL 4 включает в себя практики, наработки, методы, инструменты, которые были сформированы и подтвердили свою эффективность за время, прошедшее с публикации ITIL 3 в 2007 году. Методы гибкой разработки, применение принципов бережливого производства для управления ИТ-сервисами, теория ограничений, теория сложности, высокоуровневые универсальные подходы к управлению нашли

свое отражение в ITIL 4. Так же, как и конкретные технологические практики. Например, машинное обучение и продвинутая аналитика, их влияние на процессы управления сервисами может быть колоссальным, и многие компании это уже чувствуют на себе;

2) новая архитектура, которая повышает гибкость применения описанных концепций, а главное, позволяет более гибко развивать саму библиотеку. Нам не нужно ждать еще 12 лет до следующего релиза, ITIL будет прирастать новой информацией постоянно. До конца 2019 года запланировано выпускать по пять новых небольших дополнительных публикаций в месяц. В результате содержимое ITIL будет непрерывно расширяться и новые идеи будут постепенно интегрироваться в ядро ITIL;

3) ITIL стала более целостным сводом знаний, заполнены многие белые пятна предыдущей версии. Например, темы, связанные с разработкой ПО;

4) ITIL 4 опирается на такую научную дисциплину, как service science, предмет которой – описание цельной таксономии продуктов, сервисов, ценности, сервисных операций. ITIL 4 берет ее за основу, что делает новую версию более корректной с точки зрения описания мира управления сервисам.

Книги библиотеки ITIL v4

Книга первая «ITIL Foundation »

28 февраля 2019 года произошло значимое для всех профессионалов управления ИТ событие – компания Axelos выпустила «ITIL Foundation», первую книгу новой версии библиотеки ITIL.

За всю историю ITIL это первый опыт выпуска оригинальной книжки с описанием основ, раньше для этого делались компиляции из остальных книг. ITIL Foundation задает архитектуру новой версии, описывает базовые модели и помогает в навигации по следующим книгам. Также приводится обзор практик, которые в деталях будут представлены в виде отдельных публикаций. С помощью первой книги открывается доступ к набору инструментов и обучению их использования. И это тоже ново, поскольку в прежних версиях ITIL не было книги, описывающей подход в целом, и доступ к инструментам давался только по частям наряду с остальными книжками [16].

Особенности внедрения ITIL-решений

Положительные стороны ITIL

Проведенный компанией Forrester опрос, в котором принимал участие 491 член организации IT Service Management Forum (itSMF), показал, что применение ITIL позволяет значительно повысить продуктивность сервисов (85 %), их качество (83 %), улучшить репутацию бизнеса (65 %) и сократить затраты (41 %).

Выгоды от внедрения ITIL для руководителей и владельцев

Руководители и владельцы получают следующие преимущества:

– ИТ, ориентированные на решение задач бизнеса;

– объективную оценку качества ИТ-услуг по ключевым показателям эффективности;

– качественное снижение бизнес-рисков, связанных с ИТ, увеличение скорости принятия решений;

– оценка затрат на ИТ в зависимости от уровня ИТ-услуг, ликвидация скрытых и незапланированных затрат на ИТ;

– повышение удовлетворенности заказчиков ИТ-сервисами;

– улучшение доступности сервисов, приводящее к увеличению прибыли и доходов бизнеса;

– финансовые выгоды от уменьшения исправлений, потери времени, улучшенного управления и использования ресурсов;

– сокращение времени предоставления новых продуктов и сервисов.

Выгоды от внедрения ITIL для пользователей

Пользователи получают следующие преимущества:

– повышение качества обслуживания и удовлетворённости;

– уменьшение времени простоев, связанных с ИТ;

– обращение по любым запросам в централизованную службу поддержки;

– возможность проследить выполнение своих запросов;

– гарантированное выполнение запросов в соответствии с SLA.

Выгоды от внедрения ITIL для ИТ-служб

ИТ службы получают следующие преимущества:

– улучшение взаимопонимания между бизнесом и ИТ;

– установка стандартов и правил для ИТ-персонала, улучшение мотивации;

– определение чёткого перечня ИТ-услуг с согласованными параметрами их качества;

– легче обосновывать затраты на ИТ и предоставлять необходимую отчётность;

– повышение управляемости ИТ-инфраструктуры;

– получение объективной информации о работе персонала ИТ-служб;

– четкое разделение функций, обязанностей и ответственности между сотрудниками;

– возможность точнее оценить потребность во всех видах ресурсов;

– повышение производительности ИТ-службы;

– более эффективное использование полученных опыта и знаний [8].

Сложности внедрения ITIL

Заблуждения, усложняющие внедрение ITIL

Как консультанты, так и компании, внедрившие ITIL у себя, обращают внимание на следующие наиболее распространенные заблуждения, которые усложняют внедрение.

1. Надежда на то, что в ITIL содержится универсальный, готовый рецепт.

2. Убежденность в том, что ITIL ориентирована, прежде всего, на крупные компании и не нужна в малом и среднем бизнесе.

3. Надежда на то, что ITIL является гарантией успешности и рентабельности проекта по реорганизации ИТ-подразделения.

4. Отсутствие четкого представления о том, что переход на модель ITSM требует серьезных финансовых и временных затрат [9].

Общие проблемы внедрения ITIL-решений в России

Анализируя историю развития ITIL от первой версии до ITIL v3, можно отметить следующие проблемы внедрения ITIL-решений в практику управления ИТ-подразделениями российских компаний:

– отсутствие в ITIL (в том числе в ITIL v3) полного набора готовых решений;

– необходимость адаптации ITIL-решений или разработки на их основе новых решений для конкретной компании предъявляет высокие профессиональные требования к исполнителям (в частности, процесс управления финансами в российских условиях осуществляется не так, как это описано в соответствующем процессе ITIL, и учитывается во всех прочих процессах);

– невозможно эффективно внедрить ITIL-решения в ИТ-подразделении, не работающем в режиме полного хозрасчета. Однако возможность введения такого режима для ИТ-подразделения в реальных условиях российского бизнеса, как правило, отсутствует;

– отсутствие совместимости программно-аппаратных средств конкретной ИТ-системы и ITIL [10].

Практические причины, мешающие внедрению ITIL-проектов

1. Недостаточная поддержка руководства.

2. Трата значительного времени на сложные, излишне детализированные диаграммы процессов.

3. Отказ от разработки инструкций. Инструкции обязательно должны быть написаны, опубликованы и их следует постоянно пересматривать.

4. Отказ от назначения «владельцев процесса».

5. Слишком большая концентрация на результатах, но игнорирование качества процессов.

6. Чрезмерные амбиции. Многие предприятия пытаются внедрить сразу слишком много процессов.

7. Игнорирование других, отличающихся от ITIL подходов (CobiT, Six Sigma и CMMI).

8. Пренебрежение целостным изучением концепции ITIL и др. [8, 9].

Устранение проблем внедрения ITIL-решений

Общие рекомендации по внедрению ITIL

При адаптации в соответствии с ITIL, необходимо учесть следующее.

1. Использовать только то, что нужно. Перенимать идеи и адаптировать под собственные нужды. Скорее всего, многие процессы уже соответствуют ITIL.

2. Адаптация ITIL должна происходить в соответствии с нуждами бизнеса и основными проблемными зонами в ИТ.

3. Обеспечить поддержку руководства.

4. Грамотно готовить и подбирать персонал: важен не сам сертификат по ITIL, а наличие соответствующего опыта и мышления, позволяющего сконцентрироваться на предоставлении ИТ-сервисов и удовлетворении потребностей клиентов. Люди важнее процессов и технологий.

5. Необходимо реалистично оценивать зрелость существующих процессов ITSM и улучшать их постепенно, поэтапно.

6. Нужно понимать, что одни процессы необходимо внедрять раньше других.

7. Оценивать технологию нужно после того, как определились с целями, людьми и процессами. Технологии ITSM должны хорошо интегрироваться с другими корпоративными системами.

8. Необходимо задавать реалистичные сроки адаптации принципов ITIL, т.к. это больше, чем просто чисто технологический проект [11].

Разница в организации управления ИТ-сервисами в крупных и небольших компаниях

Любой процесс можно представить как детализацию процедур и функций. Детализировать процесс разумно до тех пор, пока описываемые процедуры не будут решаться эффективнее на личном уровне. Чем больше объект управления (ИТ-служба), тем больше уровней детализации для процесса. Мелким компаниям не стоит бездумно детализировать и регламентировать процессы: регламентировать там, где это действительно необходимо; детализировать настолько, насколько это действительно нужно.

В больших компаниях качество ИТ-сервисов оценивается по отчетам. Поэтому для больших компаний в SLA прописано много метрик, за которыми со стороны потребителя сервисов пристально следят. В небольших компаниях качество ИТ-службы оценивается по личным ощущениям. А значит, важнее донести до потребителя, что именно он будет получать, а не как это будет измеряться.

Поэтому каталог ИТ-сервисов должен давать четкое представление зависимости цены сервиса от параметров его предоставления. Для заказчика важно понимать структуру цены сервиса (с точки зрения ценности для его организации). Это позволит ему принимать решения по планированию бюджета и выбирать тот уровень сервиса, который ему нужен – а это, в том числе, означает гибкость. [12], [13], [14].

Рекомендации по организации управления ИТ-сервисами в небольших компаниях

Если в компании нормально функционируют ИТ-услуги, внедрять новое с нуля только потому, что это передовой опыт нет необходимости, так как ITSM сама по себе методология сложная, громоздкая, с множеством метрик и требует существенных ресурсов и затрат. Поэтому эксперты рекомендуют начинать с облегченных стандартов:

– облегченной версии ITIL (ITIL Small-Scale Implementation5), в которой авторы попытались смасштабировать ITIL для нужд малого бизнеса;

– FITS7, разработанный для британских учебных заведений, он оказался реально работающим и отлично подходящим ИТ-командам из нескольких человек;

– ISM1 – «коробочное решение для управления ИТ-услугами»;

– Core Practice3 («Основные практики», CoPr) – разработка, достойная внимания.

Чтобы улучшить работу ИТ-служб, нужно учесть рекомендации по процессам.

Управление уровнем сервиса:

– составить список услуг и требований, обсудить его с заказчиком и согласовать SLA;

– периодически отправлять заказчику отчет о выполнении SLA.

Служба Service Desk:

– организовать прием запросов только через Service Desk;

– снабдить сотрудников инструкциями.

Управления инцидентами:

– внедрить систему управления инцидентами, распределить зоны ответственности;

– начать регистрировать 100 % запросов, отслеживать процент решения в рамках SLA;

– вести базы данных инцидентов, чтобы всегда иметь отчет о проделанной работе, потраченных ресурсах и запросах пользователей за любой период времени.

Управление проблемами:

– начать разделять инциденты и проблемы;

– проанализировать инфраструктуру на предмет слабых или проблемных мест;

– из базы инцидентов выбрать те, которые касались часто повторяемой причины (проблемы), для решения которой необходимо использовать изменения в инфраструктуре.

Управление конфигурациями:

– для каждого сервиса составить перечень оборудования;

– описать конфигурацию каждого аппаратного и программного компонента;

– описать связи между основными компонентами;

– замена важного оборудования, все внесения изменений в настройки серверов, должны быть задокументированы;

– проверить актуальность административных реквизитов доступа.

Управление изменениями:

– разработать процедуры согласования изменений и обсудить их с заказчиком;

– разработать чек-листы для сотрудников для проведения изменений.

Управления релизами:

– писать подробное описание релиза и подробные инструкции по развертыванию;

– предупреждать заказчика о возможных перебоях и их длительности;

– составлять план возврата и согласовывать с заказчиком триггер для запуска плана отката, с обязательным предупреждением о возможных потерях.

Управление финансами:

– оценить рентабельность по услугам, по заказчикам, по проектам;

– итоги обсудить с руководством и заказчиком (делать это надо периодически).

Управление мощностью:

– проанализировать инфраструктуру на предмет нехватки и избыточных мощностей;

– предложить руководству план по их использованию или сокращению

– подготовить прогноз по необходимым мощностям на один год вперед.

Управление непрерывностью:

– обсудить с заказчиком необходимую глубину резервирования и требования по восстановлению в случае аварии или чрезвычайной ситуации;

– проверить, делаются ли резервные копии и пробные восстановления из них;

– скорректировать инструкции и процедуры резервного копирования;

– организовать хранение резервных копий как минимум в трех географически разнесенных местах;

– убедиться, что у руководства есть резервный фонд на организацию восстановительных работ.

Управление доступностью:

– согласовать с заказчиком часы, когда сервис должен быть доступен, время и длительность технологических пауз, составлять график работ с учетом этой информации;

– проводить мониторинг доступности [14].

Компании, управляющие ИТ-сервисами на базе ITIL

На базе библиотеки ITIL свои структурированные подходы к управлению услугами ИТ успешно разработали такие компании, как HP (Hewlett-Packard), IBM и Microsoft, а также такие российские компании, как «Транстелеком», АО «Вымпелком», «Чупа-Чупс». Технология внедрения ITIL успешно опробована и отработана на таких крупных российских банках, как «Альфа-Банк», департамент ИТ Сбербанка РФ, Уралсиб, Номос, ВТБ-24, Союз, Ренессанс Кредит и др.

Российские компании и использование ITIL

Опыт внедрения рекомендаций ITIL в России свидетельствует, что большинство компаний внедрили у себя только процессы, описанные в книгах «Поддержка услуг» и «Предоставление услуг» из второй версии библиотеки ITIL. Это косвенно подтверждается тем, что единицы российских компаний прошли сертификационный аудит по стандарту ISO 20000, так как пройти его может лишь предприятие, внедрившее у себя все тринадцать процессов, описанных в стандарте. Поэтому можно считать, что, хотя сервисный подход «по третьей версии ITIL» в мире не является чем-то кардинально новым, российские компании только начинают задумываться о его использовании.

Российские версии стандартов по управлению ИТ-сервисами

В 2010 г. разработан российский ГОСТ Р ИСО/МЭК 20000 «Информационная технология. Менеджмент услуг», который является переводом международного стандарта ISO 20000. Первая часть ГОСТа описывает процессы управления ИТ-услугами, вторая содержит свод положений, вытекающих из достижений практики, и представлена в виде руководства и рекомендаций.

В конце апреля 2013 г. компания «ЮНИТ-Оргтехника», работающая с 1994 г., утвердила корпоративный стандарт «Управление услугами ремонта и технического обслуживания ИВС предприятий сервисными организациями на условиях аутсорсинга» (Стандарт РТО ИВС). Данный стандарт разработан на основе методологии ITIL/ITSM, стандарта ГОСТ Р ИСО 20000, учитывает требования стандартов серии ГОСТ Р ИСО 9000, а также реалии российского рынка услуг ремонта и технического обслуживания устройств ИВС и компонент инфраструктуры ИВС.

Заключение

Библиотека ITIL описывает передовой опыт и предлагает рекомендации по организации процессного подхода в управлении качеством предоставления ИТ-услуг. Логику ИТ-процессов задает жизненный цикл услуги. В каждом разделе библиотеки приводятся ключевые факторы успеха внедрения того или иного процесса, практические рекомендации при этом превалируют над чисто теоретическими рассуждениями.

ITIL – это один из инструментов для трансформации процессов и культуры в организации. Для успешной адаптации ITIL нужно определить стратегические цели бизнеса, оценить зрелость существующих процессов ITSM, вдумчиво подбирать и обучать персонал, а в последнюю очередь оценивать технологии.

Библиотека не содержит готовых решений для конкретного предприятия, поэтому на практике часто возникают проблемы при адаптации ITIL.

В работе рассмотрены основные сложности применения ITIL-решений, особенности и целесообразность использования ITIL для организации управления ИТ-услугами в крупных и небольших компаниях. Также в работе приведены рекомендации и практические советы по адаптации ITIL для крупных и небольших компаний. Использование рекомендаций поможет следовать принципам ITIL для управления ИТ-процессами.

Следование принципам ITIL будет способствовать повышению конкурентоспособности предприятия и удовлетворенности ИТ-услугами.

Литература

1. Свободный ITIL. http://www.intuit.ru/studies/courses/2323/623/lecture/ 13557.
2. https://ru.wikipedia.org/wiki/ITIL.
3. ГОСТ Р ИСО 9000-2015 Государственный стандарт Российской Федерации. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь.
4. Глоссарий терминов и определений ITIL® V3 Glossary Russian Translation v0.92, 30 April 2009 ITIL® V3 Translation Project [Электронный источник].
5. Потоцкий М., Зимин К. Что бизнес ожидает от ИТ? Информационные сервисы в XXI веке. [Электронный источник].
6. http://compress.ru/article.aspx? id=16572&iid=771.
7. Стандарт CobiT. Управление и аудит информационных технологий. Особенности проведения внешнего аудита ИТ. Сергей Гузик (руководитель рабочей группы ISACA.ru). [Электронный источник].
8. ITSM Форум. Теория ITSM. http://www. itsmonline.ru/
9. http://www.kuprava.ru/journal/itil.html.
10. http://itil-russia.narod.ru/s_001.html.
11. http://smartsourcing.ru/blogs/teoriya_metodiki_i_standarty/746.
12. Ингланд Р. Овладевая ITIL / Роб Ингланд; Пер. с англ. М.: Лайвбук, 2011. С. 200.
13. Ингланд Р. Введение в реальный ITSM / Роб Ингланд; Пер. с англ. М.: Лайвбук, 2011. С. 132.
14. ITIL за 1,5 часа для менеджера проекта. Фролов Алексей [Электронный источник]
15. https://www.osp.ru/os/2017/03/13052658
16. https://www.osp.ru/os/articles/2019/0403/13054811

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПО SECRET NET ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ КОНТРОЛЯ ЦЕЛОСТНОСТИ ФАЙЛОВ ПРОВЕРКОЙ ИХ КОНТРОЛЬНЫХ СУММ

Е. В. Дмитриева, Т. Ю. Серова, Ю. В. Зверьков, М. М. Захаров, И. Л. Бондарь

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Неотъемлемой частью технических мер по защите информации, принимаемых в государственных информационных системах (далее – ГИС), является обеспечение целостности как компонентов ГИС, так и информации, обрабатываемой в ней.

В целях обеспечения защиты от несанкционированного доступа, копирования, предоставления, распространения, уничтожения, модифицирования, блокирования, а также от других неправомерных действий в отношении обрабатываемых данных в ГИС применяются программные или аппаратно-программные средства защиты информации (далее – СрЗИ), имеющие необходимые функции безопасности.

В соответствии с требованиями нормативных документов регуляторов Российской Федерации в области информационной безопасности [1, 2], в ГИС должна быть обеспечена целостность программного обеспечения (далее – ПО), включая программное обеспечение средств защиты информации (мера ОЦЛ.1). Поэтому отсутствие любых несанкционированных изменений в прикладных программных продуктах, а особенно в средствах защиты информации, является важным условием обеспечения информационной безопасности ГИС в целом.

Контроль целостности

Согласно документам [2, 3], целостность информации – это состояние информации, при котором отсутствует любое ее изменение либо изменение осуществляется только преднамеренно субъектами, имеющими на него право.

Согласно документу [4] под целостностью информации понимается способность средства вычислительной техники или автоматизированной системы обеспечивать неизменность информации в условиях случайного и(или) непреднамеренного искажения (разрушения).

Для своевременного обнаружения модификации ресурсов системы предназначен механизм контроля целостности, позволяющий обеспечить корректность ее функционирования и целостность обрабатываемой в ней информации.

Как правило, механизм контроля целостности реализуется разработчиками средств защиты информации от несанкционированного доступа. В основе механизма лежит проверка соответствия контролируемого ресурса системы (файла каталога, элемента реестра ОС Windows) эталонному значению. Периодичность контроля ресурсов задается во время настройки механизма с возможностью выбора реакции системы защиты на обнаружение несоответствия.

Наиболее часто встречающимися в средствах защиты информации методами проверки целостности данных являются:

– полная копия данных;
– контрольная сумма;
– имитовставка;
– хэш;
– электронная подпись.

Полная копия данных – это дополнительная копия данных для последующей сверки. Данный метод прост в реализации и предусматривает полноценный контроль данных.

Контрольная сумма – это некоторое значение, рассчитанное по набору данных путем применения определенного алгоритма. Самым известным алгоритмом нахождения контрольной суммы для проверки целостности данных является «циклический избыточный код (cyclic redundancy code, CRC)», который основан на свойствах деления с остатком двоичных многочленов. Остатком от деления многочлена, соответствующего входным данным, на некоторый заранее известный делитель (полином) является значением контрольной суммы. Важной характеристикой вычисления контрольной суммы является степень полинома – действительная позиция старшего бита, обычно это степень 8, 16 или 32, так как они являются кратными разрядности регистров современных процессоров, что значительно упрощает реализацию алгоритмов CRC (CRC-8, CRC-16, CRC-32).

Имитовставка – это некоторое значение фиксированной длины, полученное по определенному правилу из открытых данных и закрытого ключа. Значение имитовставки добавляется к зашифрованным данным для обеспечения защиты от навязывания ложных данных. Вычисление имитовставки предусмотрено в алгоритме ГОСТ 28147-89 в соответствующем режиме. Длина имитовставки от 1 до 32 бит. Для ее вычисления открытые данные представляют в виде последовательности блоков длиной 64 бита. Последний блок при необходимости дополняется нулями до полного 64-разрядного блока. Первый блок открытых данных подвергают преобразованию, соответствующему первым 16 циклам алгоритма шифрования в режиме простой замены ГОСТ 28147-89.

В качестве ключа для выработки имитовставки используют ключ длиной 256 бит, по которому шифруют данные. Полученное после 16 циклов 64-разрядное число суммируют по модулю 2 со вторым блоком открытых данных. Результат суммирования снова подвергают преобразованию. Полученное 64-разрядное число суммируют по модулю 2 с третьим блоком открытых данных и снова подвергают преобразованию, получая 64-разрядное число и т. д. Последний блок суммируют по модулю 2 с результатом вычислений на предпоследнем шаге, после чего зашифровывают в режиме простой замены, используя криптографическое преобразование. Первые 32 бита получившегося блока составляют имитовставку. Спецификация ГОСТ 28147-89 предусматривает использование в качестве имитовставки и меньшее количество бит, но не большее.

Хэш – это некоторое значение, полученное в результате обработки неких данных хэш- функцией, которая осуществляет необратимое преобразование массива входных данных произвольной длины в битовую (выходную) строку фиксированной длины, выполняемое определенным алгоритмом. Отечественным стандартом генерирования хэш-функций является алгоритм ГОСТ Р 34.11-2012. Этот стандарт разработан и введен в качестве замены устаревшему алгоритму ГОСТ Р 34.11-94. На вход хеш-функции подаются данные произвольного размера. Далее они разбиваются на блоки по 512 бит, если размер данных не кратен 512, то блок дополняется необходимым количеством бит. Потом итерационно используется функция сжатия, в результате действия которой обновляется внутреннее состояние хеш-функции. Также вычисляется контрольная сумма блоков и число обработанных бит. Когда обработаны все блоки исходных данных, производятся еще два вычисления: обработка функцией сжатия блока с общей длиной данных и блока с контрольной суммой. Они и завершают вычисление хеш-функции.

Электронная подпись – это некоторое зашифрованное значение вычисленного хэша по входным данным. Принцип работы электронной подписи заключается в следующем: первым шагом является вычисление значения хэш-функции на основе входных данных (файла), в результате чего получается хэш. Затем полученный хэш шифруется с помощью закрытого ключа для получения подписи файла. При вычислении значения хэш-функции также используется алгоритм ГОСТ Р 34.11-2012.

Каждый из перечисленных методов проверки целостности данных имеет как преимущества, так и недостатки. Все вычисляемые значения (CRC, хэш, имитовставка, электронная подпись) имеют малый размер, используемые для их вычисления криптографические алгоритмы, за исключением CRC, являются криптостойкими, т. е. подобрать исходные данные к заранее известному значению за приемлемое время невозможно. При этом, для одного значения может существовать множество исходных данных. Копии данных, а также значения CRC, хэша можно подменить. Использование закрытого ключа в алгоритмах выработки имитовставки и электронной подписи исключают подмену значений. Благодаря простоте и скорости реализации, методы «полная копия данных» и «контрольная сумма» имеют широкое применение, несмотря на их полную криптографическую незащищенность. Помимо того, что перечисленные методы контроля реализуются в средствах защиты в виде отдельного механизма, алгоритмы, применяемые в этих методах, широко используются для подсчета контрольных сумм программных модулей с фиксированием и отображением результатов контрольного суммирования.

Программы контроля целостности

Контроль целостности программного обеспечения – это обнаружение любых модификаций программных модулей.

Дистрибутив программного обеспечения содержит установочный комплект программы для начальной инициализации и может быть приобретен у производителя или у официального дилера на материальном носителе или скачан с официального сайта производителя.

При получении дистрибутива ПО необходимо убедиться в целостности полученных данных. Для этого на сайте производителя или, в случае сертифицированного ПО (средство защиты информации), в документации (формуляре) на него указываются контрольные суммы оригинальных установочных файлов, а также название программы и алгоритм для выполнения контрольного суммирования, чтобы получить достоверные результаты. Если значения контрольных сумм дистрибутива совпадут со значениями, представленными производителем, это будет являться гарантией его защиты от подмены.

Согласно требованиям нормативного документа [2] в ГИС должен быть предусмотрен контроль целостности по наличию имен и (или) по контрольным суммам программного обеспечения. Для программного обеспечения средств защиты информации контроль целостности должен осуществляться по контрольным суммам всех компонентов средств защиты, как в процессе загрузки, так и динамически в процессе работы системы. При условии приобретения сертифицированного ПО помимо указанных в формуляре контрольных сумм дистрибутива, в нем также приводятся контрольные значения установленных программных модулей. Поэтому, после его установки на ПЭВМ, необходимо выполнить расчет контрольных сумм программой, заявленной производителем ПО, и сравнить полученные значения контрольных сумм со значениями из формуляра. Данная проверка регламентирована в ГОСТ РО 0043-004-2013 [5] и проводится при вводе ГИС в эксплуатацию.

Как было сказано выше, для проверки целостности программного обеспечения существуют различные программы, утилиты и комплексы, реализующие алгоритмы шифрования.

Одной из таких программ является утилита *cpverify.exe*, разработанная компанией ООО «КРИПТО-ПРО». Утилита осуществляет проверку целостности файлов, контрольные суммы которых рассчитываются в соответствии с ГОСТ Р 34.11-2012.

Еще одной программой для подсчета контрольных сумм файлов является *csum-2012.exe* компании ООО «Код безопасности». Программа работает по алгоритму ГОСТ 28149-89 в режиме выработки имитовставки.

Наиболее частой программой, используемой разработчиками средств защиты информации для расчета и проверки контрольных сумм, является *программа фиксации и контроля исходного состояния программного комплекса «ФИКС»*, разработанная организацией ООО «Центр безопасности информации». Программа производит вычисление контрольных сумм заданных файлов по одному из пяти реализованных алгоритмов, в том числе в соответствии с ГОСТ Р 34.11-94, и имеет сертификат соответствия по второму уровню контроля отсутствия недекларированных возможностей, выданный ФСТЭК России, что позволяет использовать ее в защищенных ГИС.

Все эти программы выполняются автономно на ПЭВМ, поэтому одновременное проведение проверки на большом количестве компьютеров трудозатратно и малоэффективно. Таким образом, используя возможности средств защиты со встроенным механизмом контроля целостности, можно автоматизировать процесс проверки контрольных сумм.

Механизм контроля целостности Secret Net

Средство защиты информации от несанкционированного доступа Secret Net предназначено для обеспечения безопасности информационных систем на компьютерах, функционирующих под управлением ОС семейства Microsoft Windows.

Одной из основных защитных функций Secret Net является контроль целостности файловых объектов и реестра. В сетевом варианте исполнения Secret Net в централизованном хранилище создана база данных контроля целостности, содержащая две модели данных – для компьютеров под управлением 32- и 64-разрядных версий ОС Windows, соответственно. Каждая модель данных связана с субъектами управления – группами безопасности Active Directory, созданными во время развертывания Secret Net в домене. Данные субъекты по умолчанию содержат задания контроля целостности ПО СрЗИ Secret Net, реестра и файлов ОС Windows, выполнение проверки по которым осуществляется по содержимому ресурсов с помощью алгоритма CRC. Поскольку встроенная проверка, основанная на данном алгоритме, приводит к инцидентам информационной безопасности, связанным с нарушением целостности ресурсов (ввиду «несовершенства» алгоритма CRC), для большей достоверности результатов проверки в дополнение к существующему методу контроля предлагается использовать метод проверки, основанный на алгоритме «полное совпадение».

Решение, представленное в докладе, описывает способ полной проверки файлов контролируемого программного обеспечения, с файлами, контрольные суммы которых проверены специализированной программой контроля целостности и совпадают со значениями в формуляре.

Этапы реализации решения по контролю целостности

Таким образом, внедрение решения по контролю целостности файлов проверкой их контрольных сумм, можно разбить на следующие этапы:

– выбор программного продукта, нарушение целостности которого является критическим;

– проверка целостности полученного дистрибутива ПО;

– выделение «эталонной» ПЭВМ для установки ПО, подлежащего проверке;

– инсталляция программного обеспечения на «эталонную» ПЭВМ с определением состава ПО и расположения в зависимости от разрядности операционной системы;

– расчет и проверка контрольных сумм установленного ПО на «эталонной» ПЭВМ;

– настройка механизма контроля целостности;

– инсталляция программного обеспечения, подлежащего проверке, на компьютеры и серверы ГИС;

– добавление учетных записей компьютеров и серверов в соответствующие группы безопасности.

При выборе программного продукта для контроля необходимо оценить насколько нарушение его целостности будет являться критическим. Чаще всего нарушение целостности программных модулей средств защиты информации является потенциальной уязвимостью информационных систем. Поэтому, в основе представленного в докладе решения лежит процесс автоматизации проверки контрольных сумм именно файлов средств защиты информации.

Определившись с ПО, которое необходимо контролировать, проверяется целостность полученного дистрибутива. В случае совпадения контрольных сумм дистрибутива со значениями, представленными производителем в формуляре, можно сделать вывод, что установочный комплект получен из доверенного источника и можно перейти к этапу его установки.

Перед установкой ПО СрЗИ на рабочие станции и серверы ГИС, необходимо определить все используемые в ГИС операционные системы. На основании полученных данных в состав домена вводятся новые «эталонные» компьютеры и серверы под управлением всех найденных в ГИС версий ОС с учетом их разрядности. На каждой «эталонной» ПЭВМ выполняется установка ПО СрЗИ. Ввиду того, что ГИС может иметь особенности функционирования и утвержденную политику безопасности, функционал устанавливаемого ПО СрЗИ может быть задействован не в полном объеме. На этапе инсталляции происходит конкретизация параметров установки ПО СрЗИ, а также выбор места размещения ПО, которое

будет указываться в дальнейшем во время его развертывания на компьютерах и серверах ГИС. Поскольку данные компьютеры и серверы содержат «эталонные» установки ПО СрЗИ, к ним обеспечивается доступ только административному персоналу ГИС.

Далее выполняется расчет контрольных сумм файлов установленного программного обеспечения средств защиты на всех «эталонных» ПЭВМ, результаты контрольного суммирования каждого фиксируются документально.

Следующим этапом выполняется настройка контроля целостности. Для этого в каталоге Active Directory для выбранного ПО СрЗИ с учетом его версии и разрядности используемой ОС создаются соответствующие группы безопасности. Они предназначены для дальнейшего включения в них учетных записей компьютеров и северов, подлежащих проверке целостности. Состав групп контролируется, информация о любых изменениях фиксируется в журнале безопасности ОС Windows и поступает в базу данных сервера безопасности Secret Net. В программе настройки механизма контроля целостности Secret Net созданные группы безопасности добавляются в качестве субъектов управления. Для каждого субъекта создается задание контроля целостности, в которое включаются файлы соответствующего ПО СрЗИ. Задается вид задания – «тиражируемое», т. е. эталонные значения будут рассчитаны централизованно и храниться в базе данных контроля пцелостности. В качестве алгоритма выбирается – «полное совпадение». Это значит, что эталонным значением для контроля будет являться копия ресурса, контрольная сумма которого вычислена и совпадает со значением, указанном в формуляре. Для соблюдения требований документа [2] в части периодичности контроля целостности, для задания настраивается расписание таким образом, чтобы проверка осуществлялась во время загрузки и динамически в процессе работы системы. Включение файлов ПО СрЗИ в задание контроля целостности происходит на «эталонной» ПЭВМ, версии ОС и СрЗИ которых соответствуют названию задания. После сделанных изменений в базе данных контроля целостности эталонные значения ресурсов сохраняются в централизованном хранилище.

Поскольку проверка выполняется посредством ПО Secret Net, клиентская часть данного программного продукта должна быть установлена на всех планируемых к проверке компьютерах и серверах ГИС.

После выполненных действий по настройке механизма, проверяемое ПО СрЗИ устанавливается на компьютеры и серверы ГИС в заранее определенный каталог, и по завершении установки его учетная запись включается в соответствующую группу безопасности Active Directory. После перезагрузки компьютера и сервера эталонные значения рассчитанных ресурсов тиражируемых заданий контроля целостности распространятся на них.

Успешное выполнение задания контроля целостности свидетельствует об использовании на компьютере и сервере подлинного ПО СрЗИ, контрольные суммы файлов которого соответствуют эталонным значениям.

При обнаружении несоответствия контролируемого файла эталонному в журнале Secret Net фиксируется событие о нарушении целостности ресурса, которое передается на хранение в базу данных сервера безопасности. В качестве реакции системы защиты на возникновение подобного инцидента можно выбрать параметр «заблокировать компьютер». По окончании проведения анализа ситуации и восстановления файлов ПО СрЗИ с корректными значениями контрольных сумм блокировка ПЭВМ снимается административным персоналом.

Обновление контролируемого ПО потребует создания дополнительных заданий контроля целостности, повторяя весь процесс внедрения решения с самого начала. Это влечет за собой увеличение объема базы данных контроля целостности за счет добавления в нее копий оригинальных файлов обновленного ПО.

Заключение

Внедрение решения позволяет исключить необходимость проверки контрольных сумм сертифицированного ПО на каждом компьютере и сервере ГИС. Автоматизация контроля целостности файлов проверкой их контрольных сумм позволяет повысить качество проверки за счет отсутствия «человеческого» фактора, ее достоверность, а также существенно снизить трудозатраты административного персонала.

Данное решение позволяет проводить проверку подлинности используемого ПО централизованно на регулярной основе и гарантирует использование только тех программных продуктов, контрольные суммы файлов которых соответствуют эталонным значениям.

Решение успешно внедрено и применяется в двух автоматизированных системах ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ».

Литература

1. Приказ ФСТЭК России «Об утверждении Требований о защите информации, не составляющей государственную тайну, содержащейся в государственных информационных системах» от 11 февраля 2013 № 17.

2. Методический документ ФСТЭК России «Меры защиты информации в государственных информационных системах» от 11 февраля 2014 г.

3. ГОСТ Р 50922-2006 Защита информации. Основные термины и определения.

4. Руководящий документ Гостехкомиссии России «Защита от несанкционированного доступа к информации. Термины и определения» от 30 марта 1992 г.

5. ГОСТ РО 0043-004-2013 Защита информации. Аттестация объектов информатизации. Программа и методики аттестационных испытаний.

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ РАБОЧЕЕ МЕСТО ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ РАБОТЫ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ РАЗЛИЧНОГО КЛАССА ЗАЩИЩЕННОСТИ

Р. Ю. Дубровин, Д. Г. Аннин, А. П. Афонин, В. В. Жорин, А. А. Логинов, И. А. Нуштаев

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

В последнее время возрастает необходимость работы пользователя в автоматизированных системах (АС) различного класса защищенности.

Поэтому становится актуальной задача организации автоматизированного рабочего места (АРМ) пользователя для работы в таких АС. Существуют различные способы организации АРМ для работы в нескольких автоматизированных системах различного класса защищенности, в том числе с использованием переключателей KVM [1], однако их реализация зачастую является дорогим решением. Поскольку существует необходимость работы пользователя в нескольких АС, обрабатывающих конфиденциальную информацию, то разработка способа организации АРМ пользователя для работы в автоматизированных системах различного класса защищенности, является актуальной задачей.

Описание способа организации автоматизированного рабочего места

При организации АРМ для работы в автоматизированных системах различного класса защищенности основной задачей является реализация системы защиты на таком АРМ. Так как АРМ не является изолированным, а подключен к локальной вычислительной сети (ЛВС), дополнительно рассмотрим решения по защите информации, при сетевом взаимодействии АРМ с автоматизированными системами.

Определим основные информационные потоки при работе с АРМ в автоматизированных системах:

- обмен информацией между АРМ и ресурсами других АС;
- ввод/вывод информации в/из АРМ с/на носители и (или) накопители (Н/Н) информации.

Возможными угрозами безопасности информации в части несанкционированного доступа к информации на АРМ являются:

- нарушение конфиденциальности и доступности информации за счет хищения защищаемой информации, находящейся на встроенном Н/Н информации;
- нарушение конфиденциальности информации при взаимодействии с АС различного класса защищенности (при обмене информацией между АРМ и ресурсами других АС);
- нарушение конфиденциальности информации при ее вводе/выводе в/из АРМ с/на внешний Н/Н информации;
- нарушение доступности и целостности защищаемой информации за счет использования вредоносного программного обеспечения (ПО).

Для предотвращения хищения защищаемой информации, находящейся на встроенном Н/Н информации, реализуются следующие мероприятия:

- операционная система (ОС) устанавливается на встроенный Н/Н информации, заблокированный для записи («только на чтение»);
- служебная информация, создаваемая ОС в процессе функционирования АРМ, размещается в оперативной памяти.

Для предотвращения нарушения конфиденциальности информации при взаимодействии с АС различного класса защищенности (при обмене информацией между АРМ и ресурсами других АС):

- разграничение доступа пользователей на АРМ – для работы в каждой АС свой сеанс работы (для каждого сеанса создается учетная запись);
- для каждого сеанса (учетной записи) задается индивидуальный IP-адрес сетевого интерфейса на АРМ;
- сетевое взаимодействие АРМ с автоматизированными системами осуществляется через межсетевой экран (МЭ) на котором настроена фильтрация по IP-адресам и протоколам.

Для предотвращения нарушения конфиденциальности информации при ее вводе/выводе в/из АРМ с/на внешний Н/Н информации для каждого сеанса (учетной записи) разрешен только определенный набор внешних Н/Н информации с определенным уровнем конфиденциальности, соответствующим уровню конфиденциальности выбранного сеанса. Остальные Н/Н информации запрещены.

Для предотвращения нарушения доступности и целостности за счет использования вредоносного ПО на АРМ используется антивирусное средство.

Пример реализации автоматизированного рабочего места

Способ организации АРМ рассмотрим на следующем примере. Пусть имеются две автоматизированные системы различного класса защищенности: АС2 и АС3, построенные на базе ЛВС. Необходимо

организовать для пользователя автоматизированное рабочее место для работы в АС2 и АС3. При этом АРМ и МЭ входят в состав АС1.

Исходя из постановки задачи, схема организации АРМ для работы в АС различного класса защищенности выглядит следующим образом (рис. 1). Стрелками отмечены информационные потоки: обмен информацией между АРМ и ресурсами АС2 и АС3 (1); ввод/вывод информации в/из АРМ с/на внешние Н/Н информации (2).

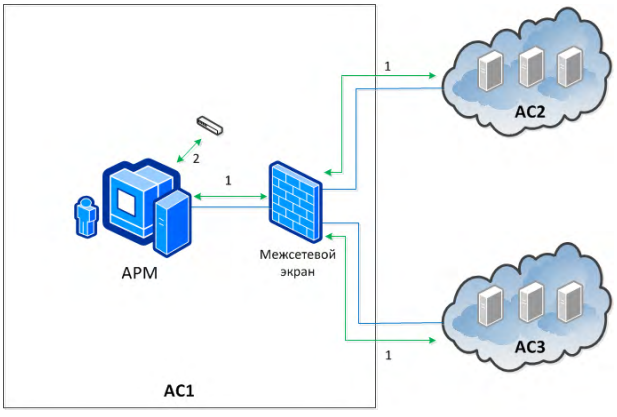


Рис. 1. Схема организации АРМ для работы в АС различного класса защищенности

В качестве аппаратного обеспечения АРМ используются:

1) системный блок;

2) монитор;

3) клавиатуру;

4) манипулятор типа «мышь».

В качестве внешних Н/Н информации используются USB-flash накопители. Для удаленного подключения к АС2 и АС3 используются ПО VMWare View.

В качестве средств защиты информации на АРМ используются:

1) АПМДЗ «Максим-М1» с microSD-картой;

2) ОС Astra Linux SE;

3) антивирусное ПО Dr.Web Enterprise Security Suite;

4) межсетевой экран Altell NEO.

Выполняются основные настройки средств защиты информации:

1) в АПМДЗ «Максим-М1» включим режим загрузки ОС только с microSD-карты;

2) в АПМДЗ «Максим-М1» для microSD-карты включим режим «только на чтение»;

3) в ОС Astra Linux SE для пользователя создадим две учетные записи: первая – для работы в АС2, вторая – для работы в АС3;

4) в ОС Astra Linux SE каждой учетной записи пользователя присвоим свой уникальный IP-адрес, который устанавливается (активируется) при входе в учетную запись и сбрасывается при выходе из сеанса работы;

5) в ОС Astra Linux SE для каждой учетной записи пользователя из графического интерфейса заблокируем все кнопки и ярлыки, кроме ярлыка VMWare View (с заданными настройками подключения) и кнопки выхода из сеанса и завершения работы;

6) на межсетевом экране настроим правила фильтрации по IP-адресам и протоколу PCoIP.

Работа пользователя на АРМ в АС различного класса защищенности состоит из следующих этапов:

1) пользователь включает АРМ, проходит процедуры идентификации/аутентификации на уровне АПМДЗ;

2) после загрузки ОС для работы в АС2 пользователь вводит логин и пароль от учетной записи, которая необходима для работы в АС2;

3) после авторизации в ОС пользователь с помощью ярлыка запускает программу VMWare View, подключается по протоколу PCoIP [2] к своей виртуальной машине в АС2 и начинает на ней работу. При необходимости ввода/вывода информации пользователь подключает в АРМ внешний Н/Н информации с уровнем конфиденциальности, соответствующим уровню конфиденциальности выбранного сеанса, и выполняет операции перемещения/копирования информации;

4) после окончания работы в АС2 пользователь закрывает окно программы VMWare View и выходит из сеанса, либо завершает работу на АРМ;

Для работы в АС3 пользователь выполняет аналогичные действия с учетной записью, которая необходима для работы в АС3.

Для администрирования АРМ администратор безопасности в настройках АПМДЗ «Максим-М1» включает режим записи для microSD-карты, который автоматически отключается после перезагрузки АРМ.

Заключение

Таким образом, с помощью предлагаемого способа организации АРМ возможна работа пользователя в АС различного класса защищенности. При этом:

- разграничение информационных потоков осуществляется с помощью сертифицированных по требованиям безопасности информации межсетевого экрана и ОС;
- пользователь может поочередно работать в нескольких АС различного класса защищенности с одного автоматизированного рабочего места.
- в процессе работы пользователя на АРМ в АС различного класса защищенности отсутствует фактор накопления защищаемой информации;
- после завершения сеанса работы на АРМ защищаемая информация на нем отсутствует.

Литература

1. KVM-переключатели – эффективное сетевое решение [Электронный ресурс] / CitForum, 2005. Режим доступа: http://citforum.ru/hardware/articles/kvm_switches, свободный.

2. Компьютер через IP-протокол (PCoIP) [Электронный ресурс] / PC-over-IP, 2012. Режим доступа: http://pc-over-ip.ru, свободный.

РАСШИРЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА CONTINOUS RISK ASSESSMENT

Д. В. Евланов, О. В. Коваленко, А. В. Огородников

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

21 июля 1997 года вступил в силу Федеральный закон "О промышленной безопасности опасных производственных объектов" [1]. Принятие этого закона привело к необходимости проводить анализ безопасности потенциально опасных объектов на всех стадиях их жизненного цикла. В анализе безопасности структурно-сложных технических систем (ССТС) центральное место принадлежит вероятностному анализу безопасности (ВАБ). ВАБ с должным качеством может проводиться только при использовании программных комплексов, автоматизирующих процедуру расчетов.

На сегодняшний день известно множество программных комплексов автоматизирующих ВАБ как иностранных, так и отечественных. Среди иностранных программных продуктов широкое распространение в России получили «Risk Spectrum» и «PTC WindChill Quality Solutions» (ранее известный как «Relex», а затем как «Relex Reliability Studio»), «SAPHIRE». Среди отечественных продуктов богатым функционалом обладают программные комплекс «БАРС», «CRISS» и «АСМ СЗМА». Подробный сравнительный анализ большинства этих программных продуктов был сделан в [2] и [3]. Все вышеперечисленные программные средства имеют свои достоинства и недостатки, они хорошо известны на рынке, и имеют своих приверженцев. Большое разнообразие программ для автоматизации ВАБ вызвано, прежде всего, тем, что данное направление продолжает бурно развиваться, появляются новые особенности, которые улучшают процедуру ВАБ, и которые реализуются в том или ином программном продукте. Разработка собственного программного комплекса «CONTINOUS RISK ASSESSMENT 2.0» (ПК CRA) [4] была вызвана таким же обстоятельством.

ПК CRA выделяется тем, что отличительной особенностью этой программы с первой ее версии было объединение различных графо-вероятностных подмоделей, построенных с помощью различных методов моделирования ВАБ, для расчета показателей надежности, живучести и безопасности (НЖБ) в одной модели, представляющей иерархический гиперграф. Следующие виды подсистем одной ССТС могут быть смоделированы с использованием ПК CRA:

- деревья отказов (ДО) [3];
- схемы функциональной целостности (СФЦ) [3];
- марковские процессы [5].

В данной работе приводится описание общего алгоритма функционирования ПК CRA. Кроме этого, особое внимание уделено реализации новой функциональности, расширяющей возможности расчета показателей НЖБ, включая следующие:

1) расчет марковских процессов, в которых присутствуют дискретные переходы;

2) расчет параметров живучести;

3) расчет среднего значения коэффициента готовности;

4) декомпозиция графов СФЦ.

Описание функциональности ПК CRA

ПК CRA разработан на языках программирования C#, Java и C++ и предназначен для работы под операционными системами семейства Microsoft Windows. В состав ПК CRA входит программа CRA_GUI с графическим пользовательским интерфейсом (ГПИ) для подготовки графов и управления расчетом (язык C#) и программный модуль расчета CRA_Solver со встроенным ГПИ представления результатов (язык Java/C++).

Общая схема работы ПК CRA приведена на рис. 1.

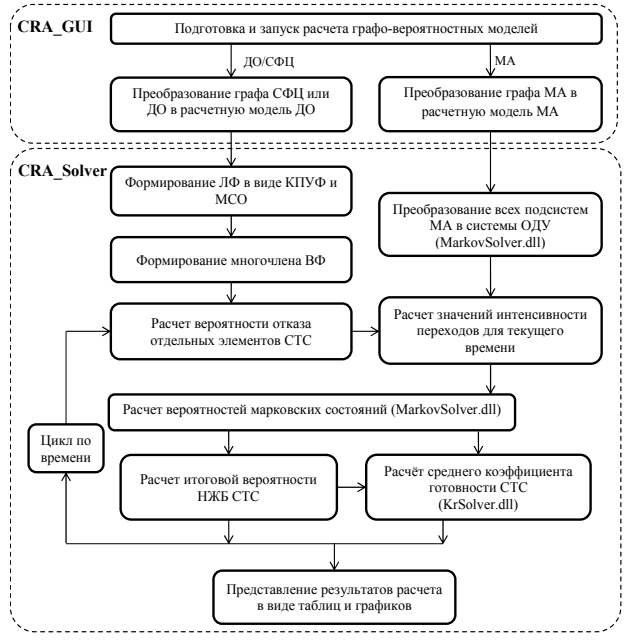


Рис. 1. Общая схема работы ПК CRA

Синтез моделей и расчет требуемых показателей НЖБ ССТС производится в соответствии с заданным логическим критерием функционирования на основе исходной информации, подготовленной в ГПИ CRA_GUI и хранящейся в файлах с расширением *.xcra, состоящей из следующих элементов:

- логических связей между подсистемами и элементами ССТС;
- вероятностных характеристик их надежности.

Пример графа СФЦ, подготовленного средствами ГПИ ПК CRA, представлен на рис. 2.

В соответствии с общей схемой работы после ввода (редактирования) исходных данных с помощью ГПИ производится построение дерева отказа модели НЖБ ССТС и запись его в промежуточный файловый контейнер с расширением *.xml.

С помощью расчетного модуля CRA_Solver происходит считывание файла .xml, формирование логической конъюнктивной формы (ЛКФ) и логической дизъюнктивной формы (ЛДФ), а также на их основе вероятностной функции (ВФ), расчет итоговой вероятности, построение графика зависимости итоговой вероятности, а также узлов модели НЖБ объектов использования атомной энергетики (ОИАЭ) от времени.

Помимо вышеперечисленных модулей в ПК CRA присутствует модуль марковского анализа (МА) MarkovSolver.dll, отвечающий за расчет подсистем марковских процессов в виде систем обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ), а также модуль KrSolver.dll, отвечающий за поиск среднего значения коэффициента готовности.

Пример представления результатов расчета приведен на рис. 3.

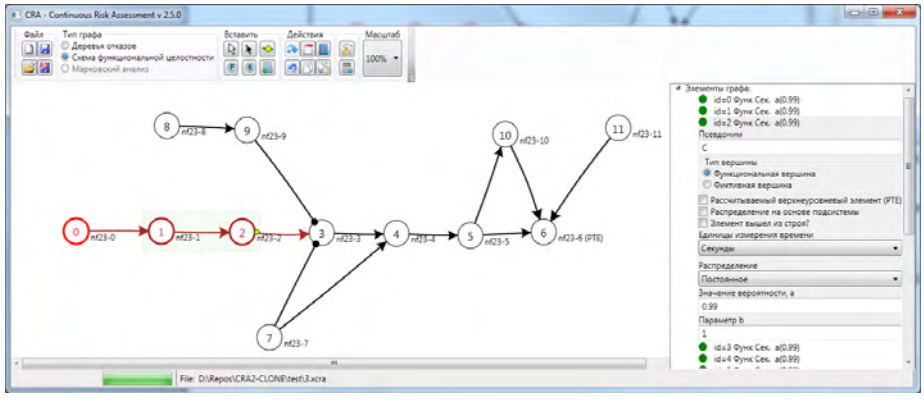
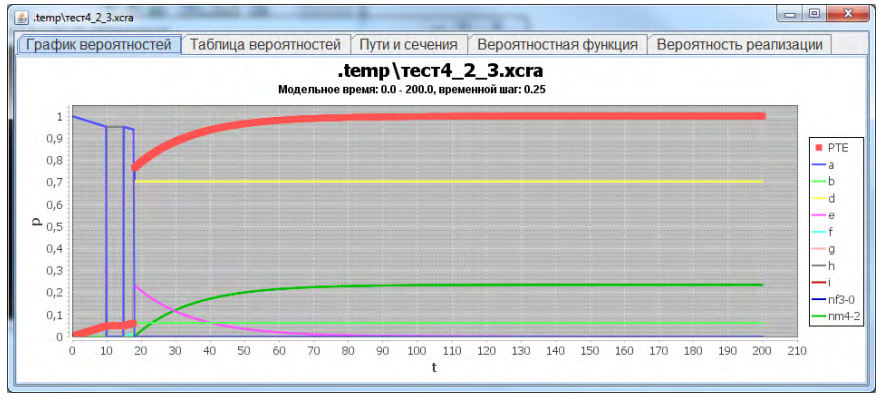
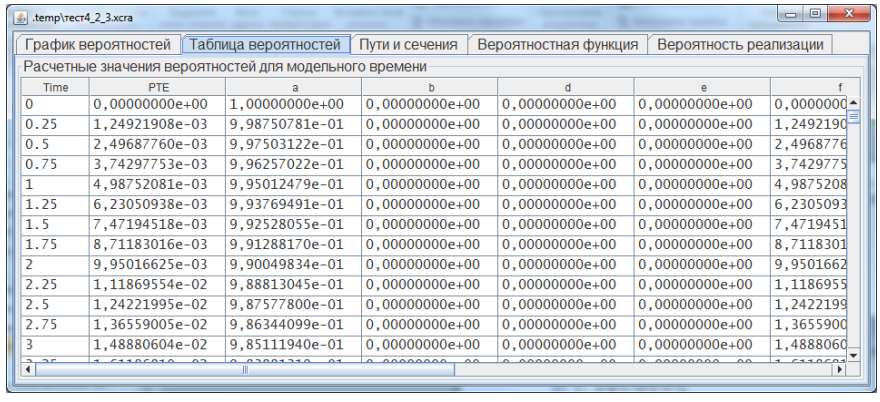


Рис. 2. Пример графа СФЦ в ГПИ ПК CRA





Time	PTE	a	b	d	e	f
0	0,00000000e+00	1,00000000e+00	0,00000000e+00	0,00000000e+00	0,00000000e+00	0,0000000
0.25	1,24921908e-03	9,98750781e-01	0,00000000e+00	0,00000000e+00	0,00000000e+00	1,2492190
0.5	2,49687760e-03	9,97503122e-01	0,00000000e+00	0,00000000e+00	0,00000000e+00	2,4968776
0.75	3,74297753e-03	9,96257022e-01	0,00000000e+00	0,00000000e+00	0,00000000e+00	3,7429775
1	4,98752081e-03	9,95012479e-01	0,00000000e+00	0,00000000e+00	0,00000000e+00	4,9875208
1.25	6,23050938e-03	9,93769491e-01	0,00000000e+00	0,00000000e+00	0,00000000e+00	6,2305093
1.5	7,47194518e-03	9,92528055e-01	0,00000000e+00	0,00000000e+00	0,00000000e+00	7,4719451
1.75	8,71183016e-03	9,91288170e-01	0,00000000e+00	0,00000000e+00	0,00000000e+00	8,7118301
2	9,95016625e-03	9,90049834e-01	0,00000000e+00	0,00000000e+00	0,00000000e+00	9,9501662
2.25	1,11869554e-02	9,88813045e-01	0,00000000e+00	0,00000000e+00	0,00000000e+00	1,1186955
2.5	1,24221995e-02	9,87577800e-01	0,00000000e+00	0,00000000e+00	0,00000000e+00	1,2422199
2.75	1,36559005e-02	9,86344099e-01	0,00000000e+00	0,00000000e+00	0,00000000e+00	1,3655900
3	1,48880604e-02	9,85111940e-01	0,00000000e+00	0,00000000e+00	0,00000000e+00	1,4888060

Рис. 3. Пример представления результатов расчета

Дискретные переходы в марковских процессах

Как уже было сказано, в ПК CRA имеется возможность работы с подграфами марковских процессов. Марковский процесс [4] – это случайный процесс, эволюция которого после любого заданного значения временного параметра t не зависит от эволюции, предшествовавшей t, при условии, что значение процесса в этот момент фиксировано. Т.е. марковский процесс позволяет вероятностно связать переходы между независимыми состояниями.

В дополнение к ранее реализованным непрерывным вероятностным распределениям для интенсивностей переходов в МА (таким как экспоненциальное, Вейбулла–Гнеденко, логнормальное, гамма-распределение, релеевское, хи-квадрат) было реализовано распределение мгновенного перехода с использованием дельта-функции Дирака. Плотность распределения в этом случае записывается в виде:

$$\begin{cases} \delta[t-a], t \geq 0 \\ 0, t < 0 \end{cases}.$$

Для учета дискретных переходов в модуле MarkovSolver.dll перед расчетом систем ОДУ со сформированными правыми частями и матрицей Якоби выделяются все временные точки, в которых пользователь задал интенсивности с гарантированным переходом между соответствующими парами состояний. Такие временные точки порождаются всеми интенсивностями, которые соответствуют распределениям, заданными на конечных отрезках, и мгновенными переходами в определенные моменты времени, задаваемые функциями Дирака. Расчет ОДУ выполняется только между этими временными точками, при этом сами дискретные переходы осуществляются между входами в решатель ОДУ с помощью алгебраических соотношений, сохраняющих общую нормировку вероятностей марковского процесса.

На рис. 4. представлен пример марковского процесса с дискретными переходами, а в табл. 1 описание соответствующих марковских переходов.

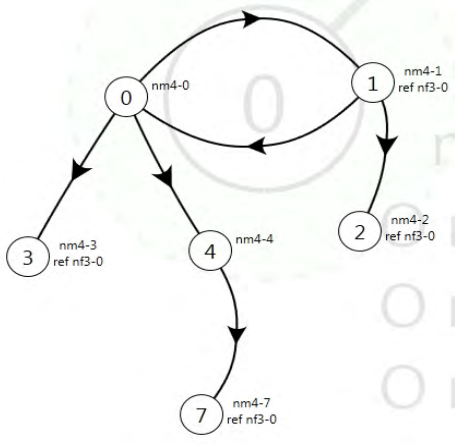


Рис. 4. Пример марковского процесса

Таблица 1

Описание марковских переходов

Переход	Тип перехода	Параметры перехода
0 – >1	экспоненциальный	Интенсивность отказа = λ ожидания = 0,005
1 – >0	экспоненциальный	Интенсивность отказа = μ исходящая = 0,006
1 – >2	дискретный	Сдвиг по времени = 4, коэффициент амплитуды передачи = 1, период повторения = 1, период длительности проверки = 0
0 – >3	дискретный	Сдвиг по времени = 4, коэффициент амплитуды передачи = q = 0,75, период повторения = 1, период длительности проверки = 0
0 – >4	дискретный	Сдвиг по времени = 4, коэффициент амплитуды передачи = 1 – q = 0,25, период повторения = 1, период длительности проверки = 0
4 – >7	экспоненциальный	Интенсивность отказа = λ отказа = 0,06

Для примера рассмотрим расчет представленного марковского процесса на отрезке времени [0,10]. В процессе расчета такой задачи программный модуль МА выполняет следующие шаги:

1) находятся все дискретные (мгновенные) переходы 1 – >2, 0 – >3, 0 – >4;

2) находятся все критические времена. В нашем случае 4, 5, 6, 7, 8, 9;

3) критические времена упорядочиваются в порядке возрастания 4, 5, 6, 7, 8, 9;

4) расчет разбивается на отрезки от [0;4], [4;5], [5;6], [6;7], [7;8], [8;9], [9;10];

5) в момент времени T = 4 значение вероятности события 1 добавляется к значению вероятности события 2. Затем значение события узла 1 обнуляется. В момент времени T = 4 значение вероятности, умноженное на 0,75, события 0 добавляется к значению вероятности события 3. В момент времени T = 4 значение вероятности, умноженное на 0,25, события 0 добавляется к значению вероятности события 4. Затем значение вероятности события 0 обнуляется.

На рис. 5. представлены результаты расчета данного марковского процесса в ПК CRA.

Итоговая вероятность probability of top event (PTE) элемента nf3-0, описанного марковским процессом на рис. 4., равна сумме вероятностей состояний марковского процесса: 1(b), 2(c), 3(d), и 7(f).

.temp\test2.xcra

График вероятностей | Таблица вероятностей | Пути и сечения | Вероятностная функция | Вероятность реализации

Расчетные значения вероятностей для модельного времени

Time	PTE	a	b	c	d	e	f	nf3-0
0	0,00000000e+00	1,00000000e+00	0,00000000e+00	0,00000000e+00	0,00000000e+00	0,00000000e+00	0,00000000e+00	0,00000000e+00
3.99...	1,95663351e-02	9,80433665e-01	1,95663351e-02	0,00000000e+00	0,00000000e+00	0,00000000e+00	0,00000000e+00	1,95663351e-02
4	7,54891596e-01	0,00000000e+00	0,00000000e+00	1,95663830e-02	7,35325213e-01	2,45108404e-01	0,00000000e+00	7,54891596e-01
4.99...	7,69165459e-01	0,00000000e+00	0,00000000e+00	1,95663830e-02	7,35325213e-01	2,30834541e-01	1,42738637e-02	7,69165459e-01
5.99...	7,82608217e-01	0,00000000e+00	0,00000000e+00	1,95663830e-02	7,35325213e-01	2,17391783e-01	2,77166209e-02	7,82608217e-01
6.99...	7,95268129e-01	0,00000000e+00	0,00000000e+00	1,95663830e-02	7,35325213e-01	2,04731871e-01	4,03765328e-02	7,95268129e-01
7.99...	8,07190785e-01	0,00000000e+00	0,00000000e+00	1,95663830e-02	7,35325213e-01	1,92809215e-01	5,22991888e-02	8,07190785e-01
8.99...	8,18419119e-01	0,00000000e+00	0,00000000e+00	1,95663830e-02	7,35325213e-01	1,81580881e-01	6,35275234e-02	8,18419119e-01
9.99...	8,28993566e-01	0,00000000e+00	0,00000000e+00	1,95663830e-02	7,35325213e-01	1,71006434e-01	7,41019707e-02	8,28993566e-01
10	8,28993669e-01	0,00000000e+00	0,00000000e+00	1,95663830e-02	7,35325213e-01	1,71006331e-01	7,41020733e-02	8,28993669e-01

Рис. 5. Таблица вероятностей, рассчитанная в ПК CRA, для каждого события марковского процесса, изображенного на рис. 4

Расчет показателей живучести

Для расширения возможностей анализа НЖБ ССТС в ПК CRA реализован расчет показателей живучести. Под живучестью [6] понимается способность систем к сохранению своих основных функций (хотя бы с допустимой потерей качества их выполнения) при воздействии факторов внешней среды катастрофического характера – неблагоприятных условий эксплуатации.

[2]В качестве показателей живучести используются условный закон живучести (УЗЖ) $P_m\{P_i(j)\}$ (1) и условный закон поражения (УЗП) $Q_m = 1 - P_m\{P_i(j)\}$.

УЗЖ выражает вероятность не поражения ОИАЭ в зависимости от количества поражающих воздействий (ПВ) на нее и вероятности поражения ОИАЭ каждого отдельного ПВ:

$$P_m = f(\{P_1(j)\},\ i = \overline{1,K},\ j = \overline{1,n},\ m = \overline{1,n}, \quad (1)$$

где i – номер элемента ОИАЭ, подвергающегося неблагоприятному воздействию (НВ); j – номер НВ; K – число элементов ОИАЭ; $P_{i(j)}$ – вероятность поражения i-го элемента при j-том НВ.

Для определения УЗЖ в ПК CRA выделяются 2 типа элементов:

1) элементы, вышедшие из строя после НВ;

2) элементы, вышедшие из строя вследствие потери обеспечивающих элементов.

Элементы первого типа задает пользователь вручную в окне настроек СФЦ вершины с помощью поля CheckBox «Элемент вышел из строя» как на рис. 6. Элементы второго типа определяются ПК CRA согласно следующему алгоритму, приведенному ниже.

Пусть A[N] – массив всех элементов типа Node, вышедших из строя после НВ. N – количество элементов, вышедших из строя. Пусть функция F(a) рекурсивным обходом элемента a из A[N] ищет элементы второго типа. Тогда для нахождения всех элементов второго типа необходимо в цикле для каждого элемента массива A[N] запустить функцию $F(a)$. Для нахождения всех элементов второго типа внутри функции $F(a)$ необходимо проверить связи между всеми потомками вершины a и вершиной a. Если тип связи между ними имеет тип «И» или тип связи между ними имеет тип «ИЛИ» и число вершин родителей для потомка узла a равно 1, то рассматриваемый потомок узла a является элементом, вышедшим из строя вследствие потери обеспечивающего элемента a.

На рис. 7. представлен результат поиска элементов, вышедших из строя вследствие потери обеспечивающих элементов, в ГПИ CRA_GUI.

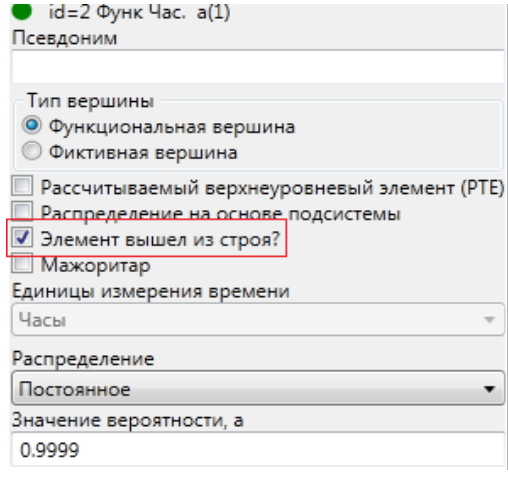


Рис. 6. Окно настроек СФЦ вершины

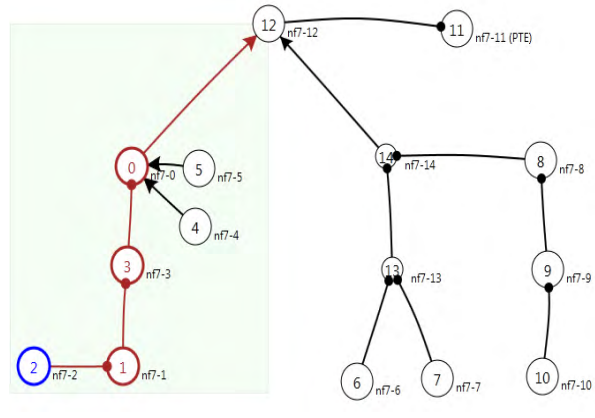


Рис. 7. Результат работы псевдокода по поиску элементов, вышедших из строя вследствие потери обеспечивающих элементов, в ПК CRA

На рис. 7. узел 2 является элементом, вышедшим из строя после НВ. Узлы 1,3,0 являются элементами, вышедшими из строя вследствие потери обеспечивающих элементов. Соответственно, в результате проведенного анализа в CRA_GUI узлы 0,1,2,3 не вовлекаются в расчет итоговой вероятности.

Расчет среднего значения коэффициента готовности

Для более полного анализа надежности в ПК CRA производится расчет среднего значения коэффициента готовности. Согласно [7] средний коэффициент готовности $A(t1;t2)$ – среднее значение мгновенного коэффициента готовности на интервале времени $(t1;t2)$ (2), а мгновенный коэффициент готовности $A(t)$ – вероятность того, что изделие в данный момент времени находится в работоспособном состоянии.

$$\overline{A}(t1;t2) = \frac{\int_{t1}^{t2} p(t)dt}{t2 - t1}, \qquad (2)$$

где $p(t)$ – функция вероятности безотказной работы

Расчет среднего значения коэффициента готовности в ПК CRA производится внутри модуля CRA_Solver с использованием библиотеки KrSolver.dll. Ниже приведен алгоритм расчет среднего коэффициента готовности в ПК CRA:

1) интегрируется функция вероятности безотказной работы на интервале времени (a;b);

2) полученное значение интеграла на шаге № 1 делится на b-a.

В результате выполнения шага №2 получается значение среднего коэффициента готовности на интервале (a;b).

На рис. 8. изображен граф СФЦ, для которого требуется рассчитать коэффициент готовности:

– вершине 0 соответствует экспоненциальное распределение с параметром λ = 1E-5;

– вершине 1 – нормальное распределение с параметрами a = 10000 ч., σ = 1000 ч.;

– вершине 2 – распределение Вейбулла–Гнеденко с параметрами α =42000, β = 2;

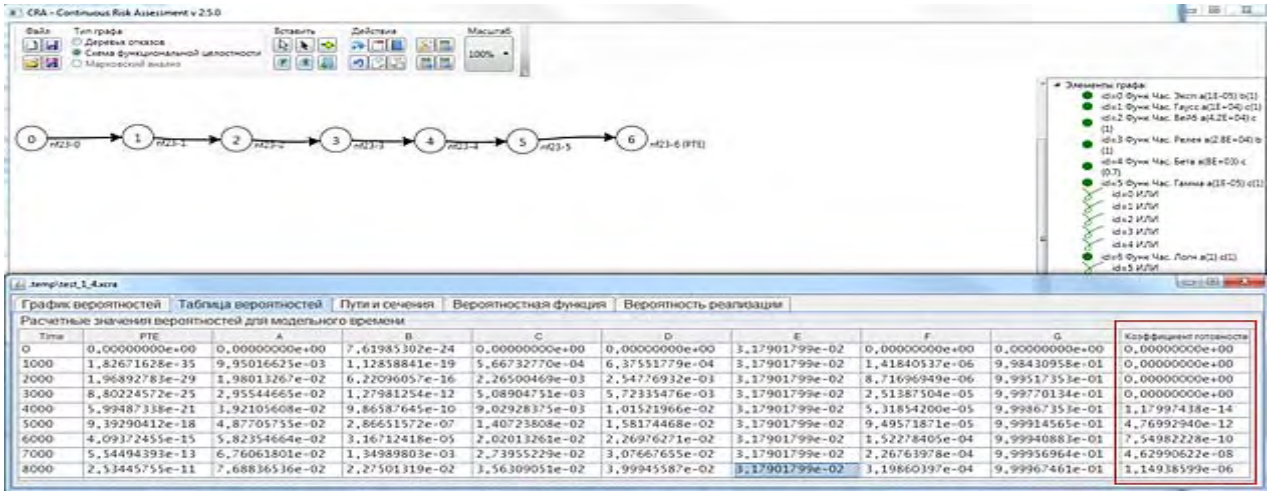
вершине 3 – распределение Рэлея с параметром a = 28000;

– вершине 4 – бета-распределение с параметрами X = 0,7, α = 8000, β = 3300;

– вершине 5 – гамма-распределение с параметрами λ = 1E-5, α =2,63;

– вершине 6 – логарифмически-нормальное распределение с параметрами a = 1, σ = 2.

На рис. 8. в результирующей таблице в столбце «коэффициент готовности» в момент времени T представлено среднее значение коэффициента готовности на интервале от (0;T), рассчитанное в ПК CRA.



Time	PTE	A	B	C	D	E	F	G	Коэффициент готовности
0	0,00000000e+00	0,00000000e+00	7,61985302e-24	0,00000000e+00	0,00000000e+00	3,17901799e-02	0,00000000e+00	0,00000000e+00	0,00000000e+00
1000	1,82671628e-35	9,95016625e-03	1,12858841e-19	5,66732770e-04	6,37551779e-04	3,17901799e-02	1,41840537e-06	9,98430958e-01	0,00000000e+00
2000	1,96892783e-29	1,98013267e-02	6,22096057e-16	2,26500469e-03	2,54776932e-03	3,17901799e-02	8,71696949e-06	9,99517353e-01	0,00000000e+00
3000	8,80224572e-25	2,95544665e-02	1,27981254e-12	5,08904751e-03	5,72335476e-03	3,17901799e-02	2,51387504e-05	9,99770134e-01	0,00000000e+00
4000	5,99487338e-21	3,92105608e-02	9,86587645e-10	9,02928375e-03	1,01521966e-02	3,17901799e-02	5,31854200e-05	9,99867353e-01	1,17997438e-14
5000	9,39290412e-18	4,87705755e-02	2,86651572e-07	1,40723808e-02	1,58174468e-02	3,17901799e-02	9,49571871e-05	9,99914565e-01	4,76992940e-12
6000	4,09372455e-15	5,82354664e-02	3,16712418e-05	2,02013261e-02	2,26976271e-02	3,17901799e-02	1,52278405e-04	9,99940883e-01	7,54982228e-10
7000	5,54494393e-13	6,76061801e-02	1,34989803e-03	2,73955229e-02	3,07667655e-02	3,17901799e-02	2,26763978e-04	9,99956964e-01	4,62990622e-08
8000	2,53445755e-11	7,68836536e-02	2,27501319e-02	3,56309051e-02	3,99945587e-02	3,17901799e-02	3,19860397e-04	9,99967461e-01	1,14938599e-06

Рис. 8. Пример расчета коэффициента готовности в ПК CRA

Декомпозиция графа СФЦ

Расчет показателей НЖБ ССТС с помощью графов СФЦ и ДО по мере роста количества рассматриваемых вершин упирается в NP-сложность расчета вероятностной функции. Для решения данной проблемы в ПК CRA был реализован механизм декомпозиции графа СФЦ на совокупность самостоятельных подграфов.

Ниже приведен алгоритм декомпозиции СФЦ. Для удобства восприятия этого алгоритма вводятся следующие понятия:

– точка сочленения (articulation point, vertex cut) – точка, связывающая между собой два графа. Так для каждого подграфа должна быть одна головная точка сочленения и как минимум одна выходная. Число выходных точек сочленения может быть и неограниченным, но все они должны являться головными вершинами;

– квазифункциональная точка – точка, заменяющая собой подграф.

Точки сочленения в ПК CRA бывают двух типов:

а) точки сочленения, соединяющие между собой любые два графа, каждый из которых не является линейным;

б) точки сочленения, являющиеся началом и концом линейных участков графа. Этот типточек сочленения ищется в графах, в качестве узлов которого выступают только событийные вершины.

Стоит отметить, что точки сочленения первого типа обладают следующими свойствами:

– могут иметь одну входную связь и выходные связи (> 1);

– могут иметь одну входную связь и выходные связи (> 1);

– могут иметь входные (>1) и выходные связи (>1).

В программном комплексе (ПК) Continuous Risk Assessment (CRA) построение гиперграфа производится автоматически в шесть этапов:

1) в схеме функциональной целостности (СФЦ) выделяются точки сочленения первого типа;

2) выделяются подмножества вершин, образованные первым типом точек сочленения;

3) ищутся точки сочленения второго типа (являющиеся началом и концом линейных участков графа);

4) выделяются подмножества вершин, образованные вторым типом точек сочленения;

5) подмножество вершин, полученное на четвертом этапе, отождествляется с эквивалентной квазифункциональной точкой;

6) подмножество вершин, полученное на втором этапе, отождествляется с эквивалентной квазифункциональной точкой.

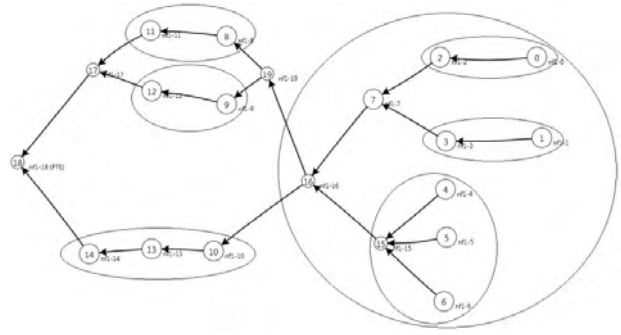
В результате проведенной декомпозиции первоначального графа СФЦ получается гиперграф, который через обменный файл формата *.xml передается на расчет в решатель CRA_Solver.

Пример преобразования графа СФЦ в гиперграф проиллюстрирован на рис. 9.

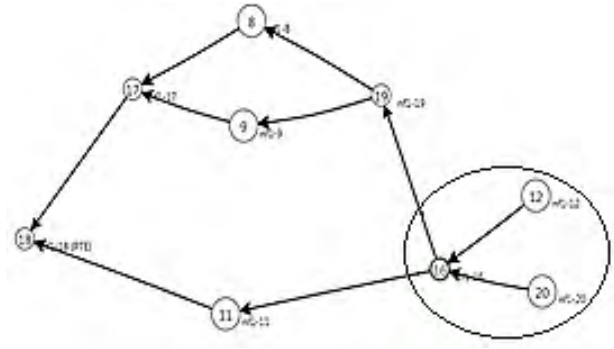
На рис. 9а. точками сочленения являются вершины с номерами: 2, 3, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 15, 16.

На рис. 9б. квазифункциональными точками являются вершины с номерами 8, 9, 11, 12, 20.

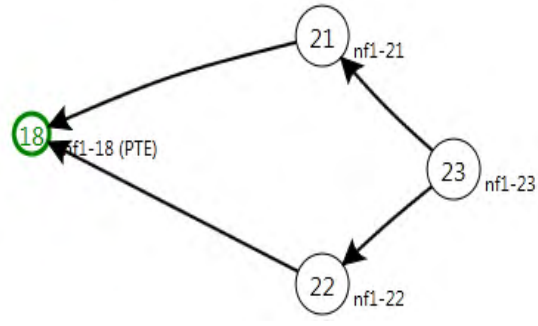
На рис. 9в. квазифункциональными точками являются вершины с номерами 21, 22, 23.



а



б



в

Рис. 9. Преобразование СФЦ в гиперграф: а – исходная СФЦ ССТС; б – промежуточный гиперграф; в – конечный гиперграф

Для каждой квазифункциональной вершины, начиная с самого нижнего уровня, производится полный комплекс моделирования и вычислений, включая построение булевой функции, ее преобразование в расчетный вероятностный многочлен, вычисление системной характеристики. Результаты вычислений сохраняются и используются в дальнейшем при расчете системной характеристики всего ОИАЭ. Для верификации реализованного механизма

декомпозиции графов СФЦ использовалось сравнение пары результатов расчета: без учета декомпозиции и с применением методики декомпозиции. Такое сравнение применимо лишь в случае, когда количество вершин в графе относительно мало и не приводит к экспоненциальному росту времени расчета в силу NP-сложности формирования вероятностной функции при большом количестве вершин. Для верификации корректности работы механизма декомпозиции использовалось более 10 сложных графов. Примеры некоторых из них представлены на рис. 10., при этом на рис. 11. и рис. 12. изображены СФЦ анализа надежности системы планового и аварийного расхолаживания Южноукраинской АЭС [2].

Результаты расчета верификационных тестов представлены в табл. 2.

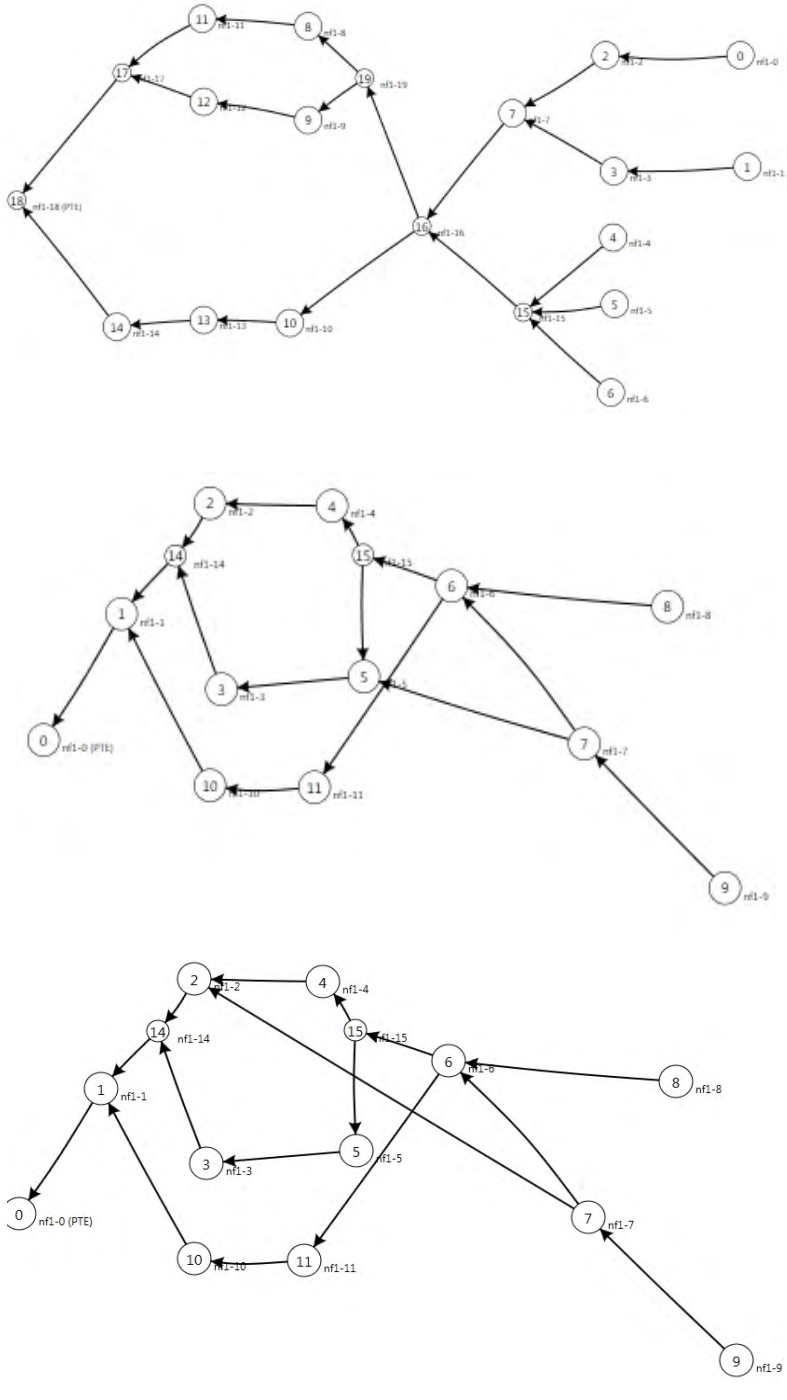


Рис. 10. Примеры графов СФЦ для верификации декомпозиции

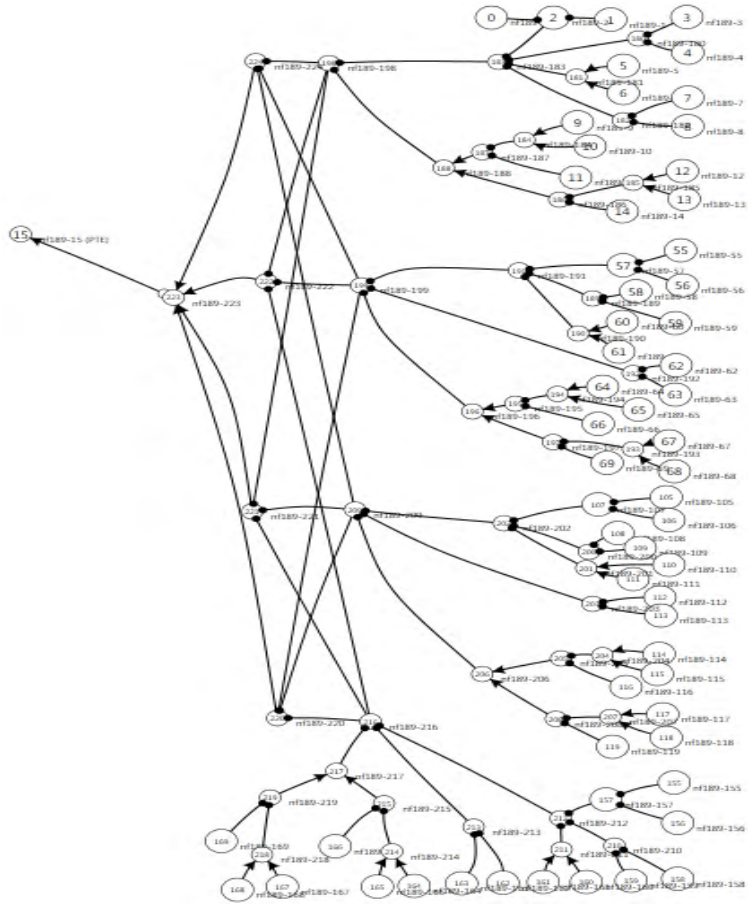
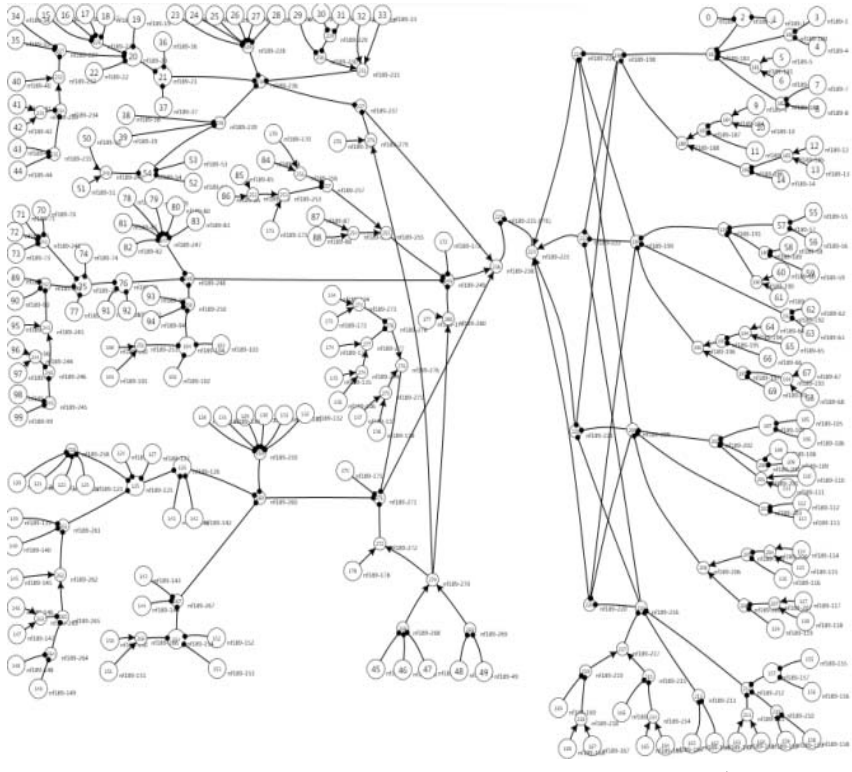


Рис. 11. СФЦ системы планового и аварийного расхолаживания ЮУ АЭС (пассивная часть)



а б

Рис. 12. СФЦ системы планового и аварийного расхолаживания ЮУ АЭС: а – активная часть, б – пассивная часть

Таблица 2

Результаты тестов верификации декомпозиции

№ теста	Итоговая вероятность		Время расчета, с	
	с декомпозицией	без декомпозиции	с декомпозицией	без декомпозиции
1 (рис. 10a)	0,45822143554	0,45822143554	~1	~1
2 (рис. 10b.)	0,05297851562	0,05297851562	~1	~1
3 (рис. 11.)	0,00225834462	0,00225834462	~1	~600
4 (рис. 10c.)	0,06518554687	0,06518554687	~1	~1
5 (рис. 12.)	0,96250184622	не определено	~1	не определено

Как видно из полученных результатов, итоговая вероятность в данных тестах при использовании и без использования декомпозиции совпадает с точностью до E-11. Исключением является тест №5, так как его расчет без декомпозиции нет возможности провести до конца из-за экспоненциального роста времени формирования вероятностного многочлена по причине наличия большого количества базовых вершин (~200).

Также стоит отметить, что время расчета всех тестов с применением механизма декомпозиции не превышает ~1 секунды в отличие от расчета без декомпозиции (~600с для теста №4). Таким образом, это позволяет получить новый уровень производительности ПК CRA и обеспечить возможность расчета еще более сложных графов для анализа крупномасштабных ССТС.

Заключение

В данном докладе приведено описание следующих добавленных возможностей, расширяющих функциональность ПК CRA: расчет марковских процессов с дискретными переходами, расчет показателей живучести, расчет среднего значения коэффициента готовности, механизм декомпозиции графов СФЦ.

Добавление в марковский анализ расчета дискретных переходов обеспечило возможность моделирования в ПК CRA ССТС с детерминированными по времени планами обслуживания ее элементов.

Для расширения возможностей анализа НЖБ ССТС в ПК CRA реализован расчет живучести на основе модификации графа СФЦ средствами ГПИ, а также расчет среднего значения коэффициента готовности ССТС с использованием решателя ОДУ.

Реализованный алгоритм декомпозиции графов СФЦ в ПК CRA позволил значительно ускорить расчет сложных СФЦ с большим количеством функциональных вершин.

Литература

1. Нозик А. А. Оценка надежности и безопасности структурно-сложных технических систем // Диссертация на соискание степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург, 2005.

2. Безлепкин В. В., Семашко С. Е., Ершов Г. А., Солодовников А. С., Ермакович Ю. Л., Козлов М. А., Калинкин А. А., Парфентьев М. А. // НИР. Итоговый отчет. Отчет о верификации средства БАРС (Безопасность и Анализ Риска Систем), версия 1.0 НИР.0-0-22-ОТ-041. Изм. 0 11.2011. ОАО «СПбАЭП», 2011.

3. Отчет о научно-исследовательской работе. Сравнительный анализ технологий деревьев отказов и автоматизированного структурно-логического моделирования, используемых для выполнения работ по вероятностному анализу безопасности АЭС и АСУТП на стадии проектирования. (Шифр темы: «Технология-2004»). СПб.: ФГУП «СПбАЭП», ОАО «СПИК СЗМА», ИПУ РАН им. В. А. Трапезникова, 2005. С. 282.

4. Kovalenko O. V. Additional Possibilities of «Continues Risk Assessment» VNIIEF Program (Modeling Of Dependent Events and Joint Calculation SPA with Deterministic Models) // 23rd International System Safety Conference, San Diego, 2005.

5. Портенко Н. И., Скороход А. В., Шуренков В. М. Марковские процессы // Итоги науки и техн. Соврем, пробл. Матем. Фундам. Направления. ВИНИТИ, 1989. С. 5–248

6. Глушков В. М. Словарь по кибернетике, Киев: Гл. ред. Укр. сов. энциклопедии, 1979.

7. ГОСТ 27.002-2015 Надежность в технике. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2016.

ПОИСК ОПТИМАЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ СЕТЕВОЙ ФАЙЛОВОЙ СИСТЕМЫ НА МНОГОПРОЦЕССОРНОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ КБ-2

С. С. Емельянова, Е. А. Ильченко

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В докладе представлены материалы научно-исследовательской работы по оптимизации файловой системы многопроцессорной вычислительной системы КБ-2 (МВС). Представлены и обоснованы разработанные конфигурации, описан опыт внедрения разработанных конфигураций и приведены результаты их тестирования. Сделаны выводы о применимости выбранной файловой системы в конкретной кластерной системе.

Введение

Одним из этапов проектирования сложных многокомпонентных изделий является расчетное обоснование характеристик и параметров изделий. Для решения этих задач применяются методы инженерного анализа, предполагающие проведение ряда вычислительных экспериментов. Вычислительные эксперименты являются ресурсоемкими и требуют для получения результатов большого количества вычислительных ресурсов. В таких случаях широко используются высокопроизводительные кластеры и суперкомпьютерные системы.

Высокопроизводительные кластеры представляют собой сложные технические системы. Важным компонентом высокопроизводительного кластера является распределенная сетевая файловая система, которая обеспечивает совместное использование файловых ресурсов узлами кластера.

В КБ-2 разработан и эксплуатируется высокопроизводительный кластер МВС. Расчетный комплекс МВС был разработан [1] и введен в постоянную эксплуатацию в 1 квартале 2017 года. Эксплуатация МВС и исследование мировых практик построения высокопроизводительных вычислительных комплексов позволили выявить возможности повышения эффективности использования расчетного комплекса КБ-2 за счет совершенствования распределенной сетевой файловой системы, обеспечивающей совместное использование файловых ресурсов узлами кластера.

Перед началом работы была поставлена задача:

– разработать конфигурацию сетевой файловой системы, которая обеспечит рост производительности МВС на операциях ввода/вывода не менее чем на 8 %;

– конфигурация должна быть отказоустойчивой и позволять расширять аппаратное обеспечение МВС без потери производительности.

Для решения поставленной задачи, проведено исследование возможности повышения отказоустойчивости, производительности и масштабируемости распределенной файловой подсистемы МВС, разработаны и исследованы тестовые конфигурации, выбран и внедрен в эксплуатацию оптимальный вариант.

Исходная конфигурация

Исследуемая МВС состоит из управляющего узла и 14 вычислительных узлов (ВУ), распределенных по трем разделам в соответствии с конфигурацией используемого в них оборудования:

– раздел 1 (9 вычислительных узлов);

– раздел 2 (4 вычислительных узла);

– раздел 3 (1 вычислительный узел).

Сетевая файловая подсистема МВС предназначена для решения следующих задач:

– доступ с ВУ к установленным программам для расчета,

– доступ с ВУ к исходным данным для расчета,

– сохранение результатов при параллельном счете.

Учитывая масштаб МВС и простоту развертывания, для организации совместного доступа к файловым ресурсам был выбран протокол сетевого доступа NFS версий 3 и 4, дополнительно усиленный функционалом системы хранения данных (технология UltraPath от компании Huawei позволяла обращаться к СХД в 3–4 раза быстрее за счет одновременного использования обоих контроллеров СХД и многопоточным обращениям через каждый контроллер к дисковому массиву).

Структурная схема МВС представлена на рис. 1.

ВУ выступают в роли клиентов NFS, а УУ в роли сервера NFS. Физическая схема МВС представлена на рис. 2. Конвергентный коммутатор объединяет две технологии: 10 Gigabit Ethernet и Fibre Channel. СХД предоставляет ресурсы для всех операций дискового ввода/вывода на узлах МВС:

– для хранения данных ОС ВУ;

– для хранения исходных данных и результатов вычислений;

– для хранения используемых для вычислений пакетов программ (расчетное ПО, библиотеки MPI и т. д.).

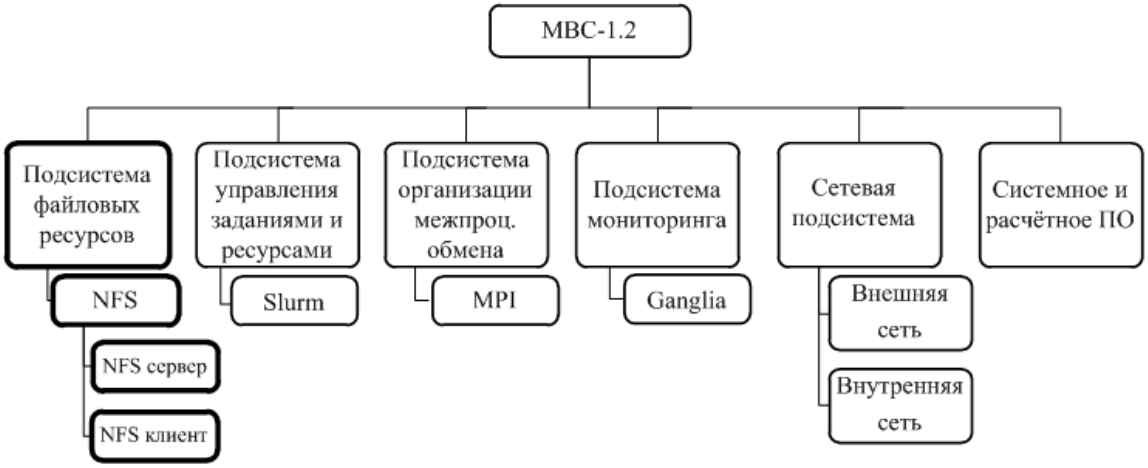


Рис. 1. Структурная схема МВС

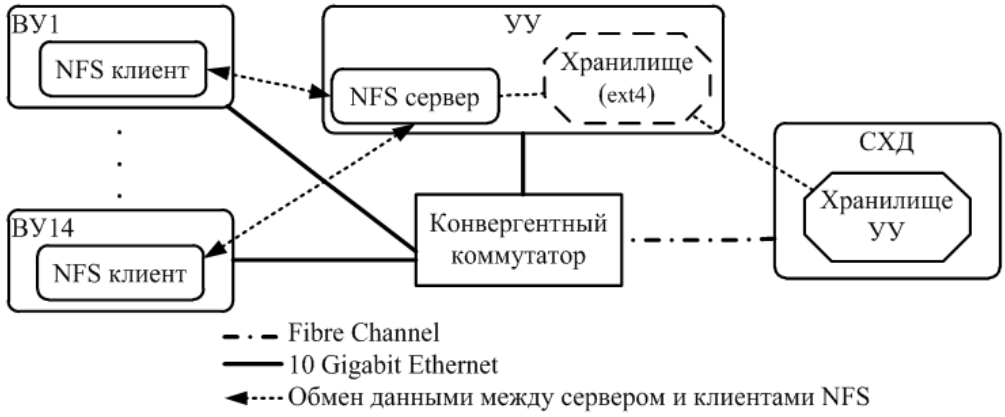


Рис. 2. Физическая схема МВС с компонентами NFS

Несмотря на то, что данная конфигурация легка в развертывании, она также имеет следующие недостатки:

– единая точка отказа. При отказе NFS сервера, все вычислительные серверы теряют данные, хранящиеся на данном ресурсе.

– недостаточная производительность. Протокол сетевого доступа NFS является последовательным, соответственно способен предоставить меньшую производительность, чем параллельные файловые системы.

– недостаточная масштабируемость. Для организации одного общего файлового ресурса использовать больше одного NFS сервера невозможно, а при увеличении количества клиентов, использующих данный ресурс, сильно снижается производительность такой системы.

Выбор файловой системы

При выборе сетевой файловой системы для внедрения в существующую МВС предъявлялись следующие основные требования:

– высокая отказоустойчивость;

– возможность расширения готовой системы;

– открытый исходный код;

– высокая эффективность использования ресурсов.

В рамках предыдущей работы [2] были рассмотрены следующие файловые системы (далее – ФС):

– Ceph;

– GPFS;

– Gluster;

– NFS;

– Lustre.

Из всех рассмотренных вариантов файловых систем, ФС Lustre в наибольшей степени удовлетворяет всем перечисленным выше требованиям.

ФС Lustre имеет ряд преимуществ [2, 3, 4, 5]:

– высокая доступность сетевой ФС Lustre включает надежный механизм отказоустойчивости и восстановления, обеспечивающий прозрачную перезагрузку серверов при неисправности.

– масштабируемость. Увеличение серверных компонент ФС Lustre положительно влияет на производительность файловой системы.

– производительность сетевой файловой системы МВС по предварительным оценкам, основанным на изученной литературе [4, 5], возрастет на 10-15% за счет распределенной архитектуры и параллельной работы нескольких клиентов ФС Lustre.

После детального изучения возможностей ФС Lustre и МВС были разработаны три схемы расположения компонент ФС Lustre на МВС. Далее описаны все разработанные конфигурации, а также выделены плюсы и минусы разработанных конфигураций.

Конфигурация № 1 с ФС Lustre

Данный вариант конфигурации предполагал размещение всех серверных компонент на управляющем узле МВС. Схема конфигурации №1 представлена на рис. 3.

Преимущества данной конфигурации:

– простота развертывания.

Недостатки данной конфигурации:

– единая точка отказа.

Конфигурация № 2 с ФС Lustre

В данном варианте задействованы все ВУ из раздела 1 и раздела 2 (Р1 и Р2 на рис. 4 и 5). Данная конфигурация строилась на основе активно/активных пар. Всего 7 пар, из них 5 активно/активных пар серверов хранения данных, одна активно/активная пара серверов метаданных и одна активно/пассивная пара серверов управления (см. табл. 1).

Преимущества данной конфигурации:

– отказоустойчивость. Данную конфигурацию можно считать отказоустойчивой, за счет построения сервисов в парах активный/активный. Если один узел выходит из строя, его хранилищем станет управлять второй. Так же, сервисы метаданных расположены на самых последних узлах в нумерации СУЗ, вследствие чего меньше загружены вычислениями.

– производительность. В данном случае, повышение производительности файловой системы ожидалось за счет большого количества серверных компонент, распределенных по разным серверам МВС.

Недостатки данной конфигурации:

– сложность первоначальной настройки.

Таблица 1

Составные части серверных компонент ФС Lustre первой конфигурации

№	Серверы Lustre	Выделенные хранилища
1	MDS_0	MDT_0, емкостью 400ГБ
2	MDS_1	MDT_1, емкостью 400ГБ
3	OSS_0	OST_0, емкостью 2 ТБ
4	OSS_1	OST_1, емкостью 2 ТБ
5	OSS_2	OST_2, емкостью 2 ТБ
6	OSS_3	OST_3, емкостью 2 ТБ
7	OSS_4	OST_4, емкостью 2 ТБ
8	OSS_5	OST_5, емкостью 2 ТБ
9	OSS_6	OST_6, емкостью 2 ТБ
10	OSS_7	OST_7, емкостью 2 ТБ
11	OSS_8	OST_8, емкостью 2 ТБ
12	OSS_9	OST_9, емкостью 2 ТБ
13	MGS_0	MGT_0, емкостью 100ГБ
14	MGS_1	пассивный сервер для хранилища MGT_0

Структурная схема данной конфигурации представлена на рис. 4.

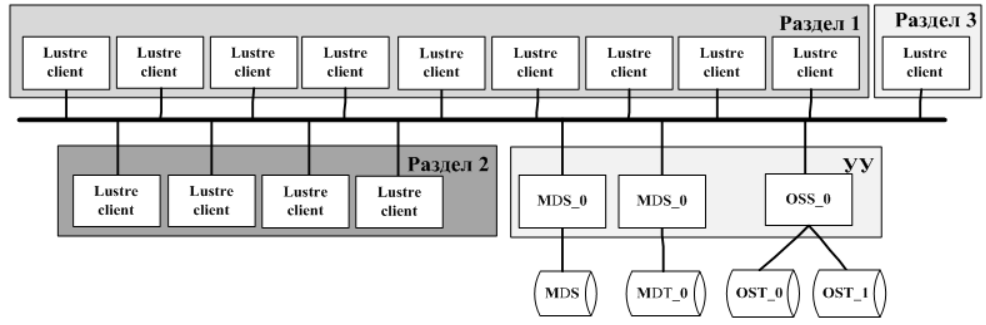


Рис. 3. Структурная схема конфигурации № 1 с ФС lustre

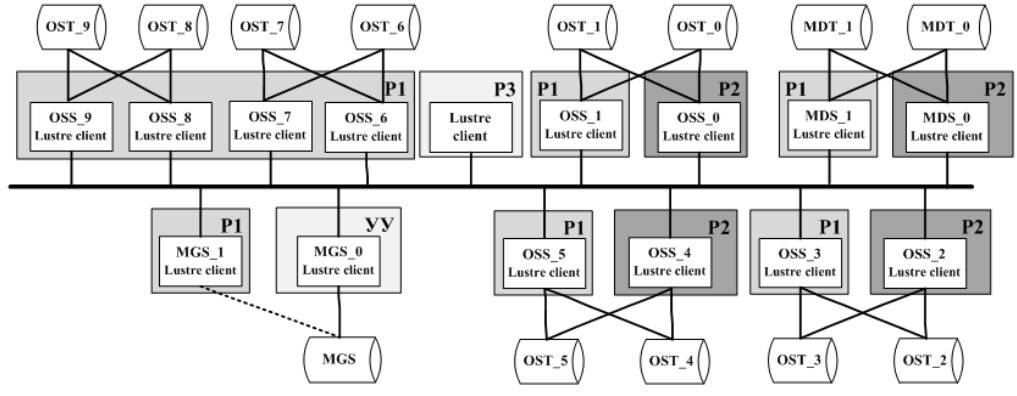


Рис. 4. Структурная схема конфигурации № 2 МВС с ФС Lustre

Конфигурация № 3 с ФС Lustre

Данная конфигурация состоит из активно/активных пар и является отказоустойчивой, однако под серверы ФС Lustre задействованы не все вычислительные серверы МВС. Состав данной конфигурации представлен в табл. 2.

Таблица 2

Составные части серверных компонент ФС Lustre второй конфигурации

№	Серверы Lustre	Выделенные хранилища
1	MDS_0	MDT_0, емкостью 400ГБ
2	MDS_1	MDT_1, емкостью 400ГБ
3	OSS_0	OST_0, емкостью 2 ТБ
4	OSS_1	OST_1, емкостью 2 ТБ
5	OSS_2	OST_2, емкостью 2 ТБ
6	OSS_3	OST_3, емкостью 2 ТБ
7	MGS_0	MGT_0, емкостью 100ГБ
8	MGS_1	пассивный сервер для хранилища MGT_0

Структурная схема данной конфигурации представлена на рис. 5.

Преимущества данной конфигурации:

– отказоустойчивость. Задействована только часть вычислительных серверов под активно/активные пары таким образом, чтобы при необходимости отключения любого из разделов, не произошло потери данных, и расчеты не были остановлены.

– производительность. Ожидалось повышение производительности за счет распределения серверных компонент ФС Lustre на разные узлы МВС.

Недостатки данной конфигурации:

– сложность первоначальной настройки.

Сравнительное тестирование разработанных конфигураций

Цель тестирования: выявление наиболее производительной конфигурации.

Тестирование проводилось на следующих конфигурациях.

1. Конфигурация с NFS и UltraPath;
2. Конфигурация № 1 с ФС Lustre (все серверные части ФС Lustre на управляющем узле);
3. Конфигурация № 2 с ФС Lustre (7 групп по 2 сервера);
4. Конфигурация № 3 с ФС Lustre (4 группы по 2 сервера).

Для каждой конфигурации тестирование проводилось в два этапа:

– тестирование синтетическими тестами;

– тестирование типовыми задачами.

Тестирование синтетическими тестами

Данное тестирование осуществлялось с помощью тестовых утилит: IOZone и Bonnie++ (см. табл. 3–5). Каждый вид теста проделывался в общей сложности пять раз. Все синтетические тесты запускались на МВС, не занятой другими вычислительными задачами. В разных конфигурациях тесты запускались на одинаковых узлах.

Тесты IOZone запускались со следующими ключами: –i0 –i1 –s300g –r64k.

-i0 -i1 – данные параметры выполняют операции чтения/записи файла, а так же повторного чтения и перезапись того же файла;

-s300g – выбран файл, размером в 300 ГБ, так как данный размер превышал доступный объем оперативной памяти на ВУ и был достаточным для корректного проведения теста;

-r64k – выбран размер блока в 64 КБ.

По окончанию теста IOZone выводит значения скорости записи, перезаписи, чтения и повторного чтения в КБ/с. Так же использовался ключ –O, для вывода результатов в iops[1].

Тест Bonnie++ выводит значения скорости создания, чтения и удаления при последовательной записи файлов и при записи файлов в случайном порядке.

Тест Bonnie++ запускался со следующими параметрами:

1500:128:0:40 – создание 1500*1024 файлов, максимальный размер 128 КБ, минимальный размер 0 байт, 40 поддиректорий.

[1] iops – количество операций ввода-вывода в секунду.

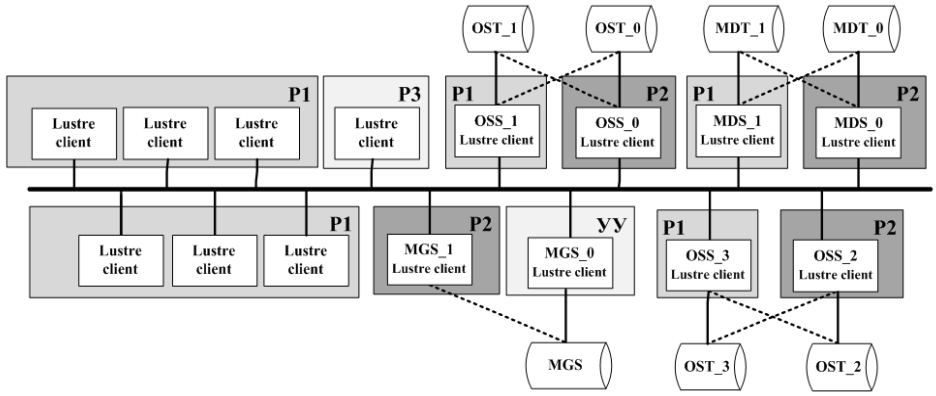


Рис. 5. Структурная схема конфигурации № 2 МВС с ФС Lustre

Таблица 3

Результаты тестирования тестом bonnie++

		Последовательная запись			Запись в случайном порядке		
№	ВУ	Запись (КБ/с)	Чтение (КБ/с)	Удаление (КБ/с)	Запись (КБ/с)	Чтение (КБ/с)	Удаление (КБ/с)
NFS+UltraPath							
1	Раздел 1	515	60	1561	515	130	1501
2	Раздел 2	532	75	1603	603	105	1625
3	Раздел 3	363	56	1416	563	56	1553
Lustre (1 вариант конфигурации)							
4	Раздел 1	506	45	1444	497	56	1476
5	Раздел 2	525	46	1528	574	53	1495
6	Раздел 3	351	44	1385	494	43	1519
Lustre (2 вариант конфигурации)							
7	Раздел 1	481	629	1281	498	622	2356
8	Раздел 2	525	306	1137	484	311	2099
9	Раздел 3	416	282	1090	425	290	2035
Lustre (3 вариант конфигурации)							
10	Раздел 1	505,6	261,8	1516,4	508,4	247,8	2456,8
11	Раздел 2	512,2	281,2	1534,4	510,6	269,6	2431,2
12	Раздел 3	397,8	103,4	1480	490,8	107,8	2019,2

Таблица 4

Результаты тестирования тестом IOZone (в iops)

№	ВУ	Запись (iops)	Повторная запись (iops)	Чтение (iops)	Повторное чтение (iops)
NFS+UltraPath					
1	Раздел 1	2749	2798	3793	2913
2	Раздел 2	3810	3490	2093	2101
3	Раздел 3	3105	3201	2109	2239
Lustre (1 вариант конфигурации)					
4	Раздел 1	2593	2786	3708	2818
5	Раздел 2	3663	3392	1964	1999
6	Раздел 3	2845	3083	2078	2184
Lustre (2 вариант конфигурации)					
7	Раздел 1	8341	8704	6158	5638
8	Раздел 2	9433	10023	7396	7356
9	Раздел 3	8349	8495	7155	6793
Lustre (3 вариант конфигурации)					
10	Раздел 1	8718	8776	5838	5657
11	Раздел 2	9846	9737	6419	6643
12	Раздел 3	8514	8664	4431	4314

Таблица 5

Результаты тестирования тестом IOZone (в KB/s)

№	ВУ	Запись (КБ/с)	Повторная запись (КБ/с)	Чтение (КБ/с)	Повторное чтение (КБ/с)
NFS+UltraPath					
1	Раздел 1	162356	460921	110354	223496
2	Раздел 2	136521	432961	190689	210641
3	Раздел 3	69782	150365	125684	121635
Lustre (1 вариант конфигурации)					
4	Раздел 1	154269	458615	208966	213265
5	Раздел 2	139230	432825	188419	201863
6	Раздел 3	43021	78897	111946	118412
Lustre (2 вариант конфигурации)					
7	Раздел 1	540937	541185	403108	452205
8	Раздел 2	573539	598109	321370	311963
9	Раздел 3	497317	521161	415445	409880
Lustre (3 вариант конфигурации)					
10	Раздел 1	556539	554429	297637	292529
11	Раздел 2	580412	627216	497795	419338
12	Раздел 3	530777	546663	261620	261988

Тестирование типовыми задачами (нагрузочное тестирование)

В качестве нагрузочного тестирования использовалось тестирование типовыми задачами. Сравнивалось время счета задач при полной загрузке МВС.

Для нагрузочного тестирования подобраны задачи для одного из часто используемого решателя в КБ-2. Выбраны такие задачи, которые генерируют большое количество файлов с результатами, так, чтобы вычислительные узлы постоянно обращались к хранилищу для записи файлов.

Запуск задач проводился с нагрузкой на весь кластер[2] по 5 прогонов для каждой конфигурации (см. табл. 6).

Таблица 6

Распределение ядер на тестовые задачи

№	Раздел	Кол-во ядер
1	Раздел 1	64
2	Раздел 1	32
3	Раздел 1	32
4	Раздел 1	16
5	Раздел 3	16
6	Раздел 2	64
7	Раздел 2	32

[2] Задачи распределены так, что занимают все процессорные мощности МВС.

Выбрано именно такое разделение процессорных мощностей для того, чтобы можно было сравнивать не только конфигурации между собой, но также сравнивать время расчета задач на одинаковом количестве ядер на разных разделах внутри каждой конфигурации.

Результаты тестирования типовыми задачами

Результаты тестирования типовыми задачами представлены в табл. 7.

Выводы по результатам тестирования

По результатам тестирования, как синтетическими тестами, так и типовыми задачами, разработанные конфигурации с ФС Lustre показывают лучшие результаты в счете задач и в синтетических тестах. В частности, конфигурация № 3 с ФС Lustre показала небольшое преимущество при счете тестовых задач, а результаты синтетических тестов конфигурации № 3 с ФС Lustre превосходят результаты тестов других конфигураций приблизительно на 30 % (см. табл. 8, 9).

Таблица 7

Результаты тестирования типовыми задачами

№	Кол-во ядер	Раздел	Конф-я № 1 Lustre	Конф-я № 2 Lustre	Конф-я № 3 Lustre	NFS+UltraPath
1	64	Раздел 1	796 м 12 с	731 м 47 с	683 м 36 с	542 м
2	32	Раздел 1	887 м 36 с	1070 м 53 с	879 м 2 с	918 м 52 с
3	32	Раздел 1	1412 м 24 с	1067 м 28 с	977 м 36 с	988 м 44 с
4	16	Раздел 1	1821 м 36 с	1213 м 58 с	1329 м 1 с	1426 м 6 с
5	16	Раздел 3	2886 м 48 с	2510 м 19 с	2979 м 7 с	2199 м 35 с
6	64	Раздел 2	853 м	781 м 44 с	723 м 18 с	744 м 17 с
7	32	Раздел 2	1263 м 48 с	1169 м 21 с	1026 м 4 с	1303 м 24 с

Таблица 8

Сравнительная таблица теста IOZone в iops (больше – лучше)

№	ВУ	Запись (iops)	Повторная запись (iops)	Чтение (iops)	Повторное чтение (iops)
NFS+UltraPath					
1	Раздел 1	2749	2798	3793	2913
2	Раздел 2	3810	3490	2093	2101
3	Раздел 3	3105	3201	2109	2239
Lustre (1 вариант конфигурации)					
4	Раздел 1	–5 %	–0,4 %	–2 %	–3 %
5	Раздел 2	–3 %	–2 %	–6 %	–4 %
6	Раздел 3	–8 %	–3 %	–1 %	–2 %
Lustre (2 вариант конфигурации)					
7	Раздел 1	+203 %	+211 %	+62 %	+93 %
8	Раздел 2	+147 %	+187 %	+253 %	+250 %
9	Раздел 3	+168 %	+165 %	+239 %	+203 %
Lustre (3 вариант конфигурации)					
10	Раздел 1	+217 %	+213 %	+53 %	+94 %
11	Раздел 2	+158 %	+178 %	+206 %	+216 %
12	Раздел 3	+174 %	+170 %	+110 %	+92 %

Таблица 9

Сравнительная таблица тестирования типовыми задачами (меньше-лучше)

№	Кол-во ядер	Раздел	Конф-я № 1 Lustre	Конф-я № 2 Lustre	Конф-я № 3 Lustre	NFS+UltraPath
1	64	Раздел 1	+47 %	+35 %	+26 %	542 м
2	32	Раздел 1	–3 %	+16 %	–4 %	918 м 52 с
3	32	Раздел 1	+43 %	+8 %	–1 %	988 м 44 с
4	16	Раздел 1	+26 %	–15 %	–6 %	1426 м 6 с
5	16	Раздел 3	+31 %	+14 %	+35 %	2199 м 35 с
6	64	Раздел 2	+14 %	+5 %	–2 %	744 м 17 с
7	32	Раздел 2	–3 %	–10 %	–21 %	1303 м 24 с

Возникшие проблемы с конфигурациями ФС Lustre

Ресурсы системы хранения данных используются одновременно двумя подсистемами: вычислительной подсистемой (МВС) и подсистемой виртуализации.

Во время проведения тестирования второй конфигурации ресурсы системы хранения данных были нагружены так, что наблюдались существенные задержки при работе с подсистемой виртуализации. На момент написания данного доклада, исследование данной проблемы еще не завершено.

Заключение

В результате проведенных работ было выполнено:

– проанализирована текущая конфигурация МВС в части сетевой файловой системы;

– проанализированы варианты замены существующей сетевой файловой системы МВС на более производительную сетевую файловую систему;

– спроектировано решение по внедрению ФС Lustre на МВС;

– выполнено сравнительное тестирование конфигураций:

– конфигурация № 1 с ФС Lustre (все серверные части ФС Lustre на одном узле);

– конфигурация № 2 с ФС Lustre (7 групп по 2 сервера);

– конфигурация № 3 с ФС Lustre (4 группы по 2 сервера);

– конфигурация с NFS+UltraPath.

Исходя из всего вышеизложенного, можно сделать вывод, что применение файловой системы Lustre на МВС целесообразно. Разработанная в рамках исследования конфигурация № 3 с ФС Lustre может быть внедрена в МВС для повышения производительности, отказоустойчивости и масштабируемости файловой системы при дальнейшем использовании.

Поскольку во время тестирования, как ожидалось, наиболее производительной конфигурации 2 ФС Lustre были зафиксированы значительные задержки в отклике подсистемы виртуализации, функционирующей на базе той же СХД, что и МВС, было принято решение провести дополнительное исследование данного явления с целью определения узкого места в системе и возможной ее оптимизации.

Литература

1. Иванушкин В. В., Ильченко Е. А. Совершенствование технологии проведения высокопроизводительных расчетов в контуре СТ КБ-2. Создание Многопроцессорной вычислительной системы // Отчет об ОКР. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2017.

2. Емельянова С. С., Иванушкин В. В., Ильченко Е. А. Внедрение распределенной файловой системы массового параллелизма Lustre на МВС-1.2 // Отчет о НИР. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2018.

3. Беляева А. А., Биряльцев Е. В., Галимов М. Р., Демидов Д. Е., Елизаров А. М., Жибрик О. Н. Кластерная архитектура программно-технических средств организации высокопроизводительных систем для нефтегазовой промышленности. 2017.

4. Назаренко Е. В. Сравнение архитектуры распределенных файловых систем. 2016.

5. Lustre Software Release 2.x Operations Manual. 2011.

ГРАФИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЛОГОС МИП ДЛЯ ПОДГОТОВКИ ЗАДАЧ СВЯЗАННОГО РАСЧЕТА

Е. А. Ескова, А. Г. Надуев, Д. А. Кожаев

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Связанный расчет представляет собой расчет мультифизичной задачи, в которой два (и более) расчетных модуля обмениваются между собой данными во время расчета. Обмен между расчетными модулями, в рамках модульной интеграционной платформы, проводится транспортным уровнем ЛОГОС−МИП, а настройка конфигурации обмена производится с помощью графических средств (Интегратора и т. п.) ЛОГОС−МИП. Графические средства ЛОГОС позволяют подготавливать задачи связанного расчета на разных уровнях детализации:

– высокоуровневая детализация (включает в себя выбор интерфейсов обмена и применение готового шаблона взаимодействия расчетных модулей);

– низкоуровневая детализация (настройка взаимодействия расчетных модулей на транспортном уровне).

В докладе представлены графические средства Интегратора ЛОГОС МИП для подготовки связанного расчета, приводится описание основных этапов подготовки задачи связанного расчета.

Подготовка задачи связанного расчета

Как отмечалось ранее, подготовка задач связанного расчета выполняется в Интеграторе, путем объединения одиночных расчетных задач. Для возможности проведения связанного расчета расчетный модуль должен быть предварительно интегрирован в модульную интеграционную платформу.

Внешний вид дерева проектов Интегратора с подготовленной задачей связанного расчета представлен на рис. 1.

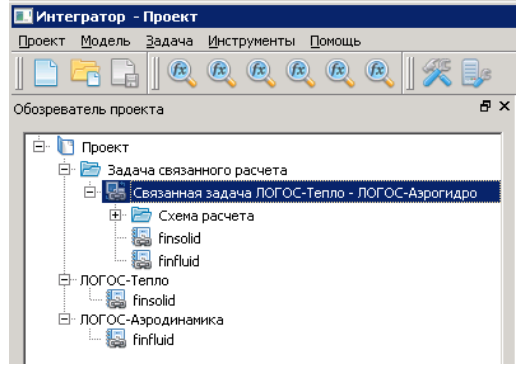


Рис. 1. Дерево объектов Интегратора с подготовленной задачей связанного расчета

Подготовка связанного расчета состоит из следующих этапов:

– настройка общей схемы связанного расчета;

– связывание доступных обменных интерфейсов;

– конфигурирование транспортного уровня ЛОГОС МИП.

Настройка общей схемы связанного расчета

Пользовательский интерфейс Интегратора при настройке общей схемы связанного расчета изображен на рис. 2.

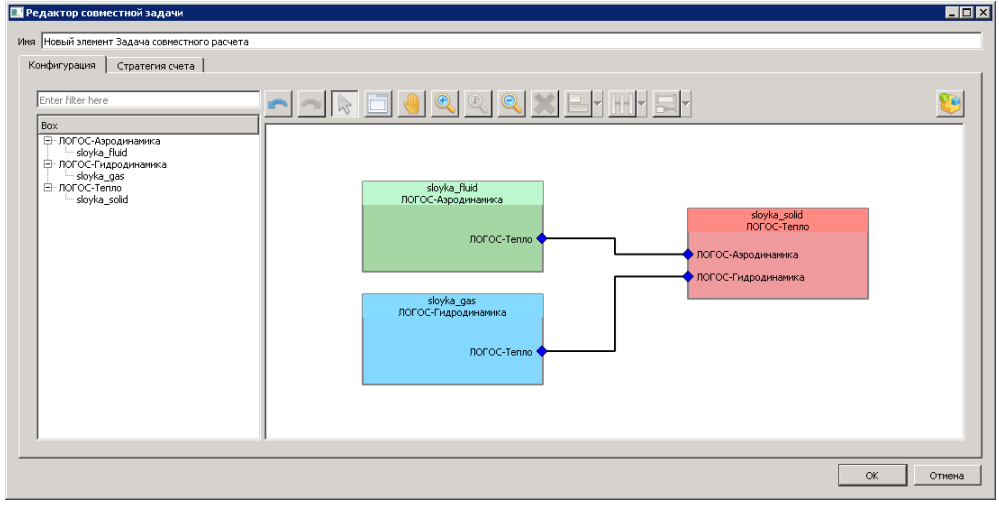


Рис. 2. Настройка общей схемы связанного расчета

В левой части окна расположен список всех подготовленных ранее в Интеграторе одиночных задач математических методик. В правой части расположен схемный редактор, предназначенный для графического конфигурирования связей между задачами. Добавление одиночных задач в редактор осуществляется по технологии «drag-and-drop». Указание связей осуществляется графически в интерактивном режиме. Интегратор гарантирует добавление на схему только допустимых связей, т. е. позволяет связывать задачи только тех методик, для которых доступны соответствующие программные адаптеры. Информация о доступных адаптерах и их совместимости поступает в Интегратор из файлов спецификации расчетных модулей и программных адаптеров. Переход к интерфейсу настройки каждой связи осуществляется по двойному нажатию левой кнопки мыши на линии требуемой связи.

Интегратор обеспечивает настройку связанного расчета мультидисциплинарной задачи для трех и более математических методик.

Связывание доступных обменных интерфейсов

Настройка связей между расчетными модулями, участвующими в связанном расчете мультидисциплинарной задачи, осуществляется отдельно для каждой пары модулей. Пользовательский интерфейс Интегратора при связывании доступных обменных интерфейсов двух задач математических методик представлен на рис. 3.

Центральная часть окна содержит схемный редактор, в котором представлен перечень обменных интерфейсов, доступных для каждой из двух связываемых задач. Связывание требуемых интерфейсов осуществляется графически в интерактивном режиме. Дополнительно предусмотрена возможность автоматического связывания интерфейсов с одинаковыми именами, данное действие инициируется нажатием кнопки «Соединить автоматически». Наличие такой возможности видится удобным при необходимости связывания большого количества интерфейсов.

Типовым режимом использования Интегратора для настройки прохождения и обработки данных по каждому интерфейсу является использование заранее подготовленных шаблонов с описанной конфигурацией настройки, при этом требуемый шаблон может быть выбран из перечня доступных в выпадающем списке «Для всех интерфейсов использовать шаблон». В случае необходимости, настройка интерфейса может быть выполнена в ручном режиме. Переход к интерфейсу настройки осуществляется по двойному нажатию левой кнопки мыши на линии требуемой связи.

Настройка прохождения данных через интерфейс связи

Пользовательский интерфейс Интегратора при настройке прохождения данных через интерфейс связи представлен на рис. 4.

В центральной части окна расположен схемный редактор, предназначенный для графического конфигурирования схемы прохождения данных. Интегратор автоматически располагает на схеме доступные входные и выходные порты данных для каждой их задач, участвующей в настройке. Информация о доступных портах и типах их данных поступает в Интегратор из файлов спецификации методик.

В левой части окна расположен список всех доступных обрабатывающих функций, которые могут быть использованы при составлении схемы. Добавление ОФ в редактор осуществляется по технологии «drag-and-drop». Указание связей между элементами схемы осуществляется графически в интерактивном режиме.

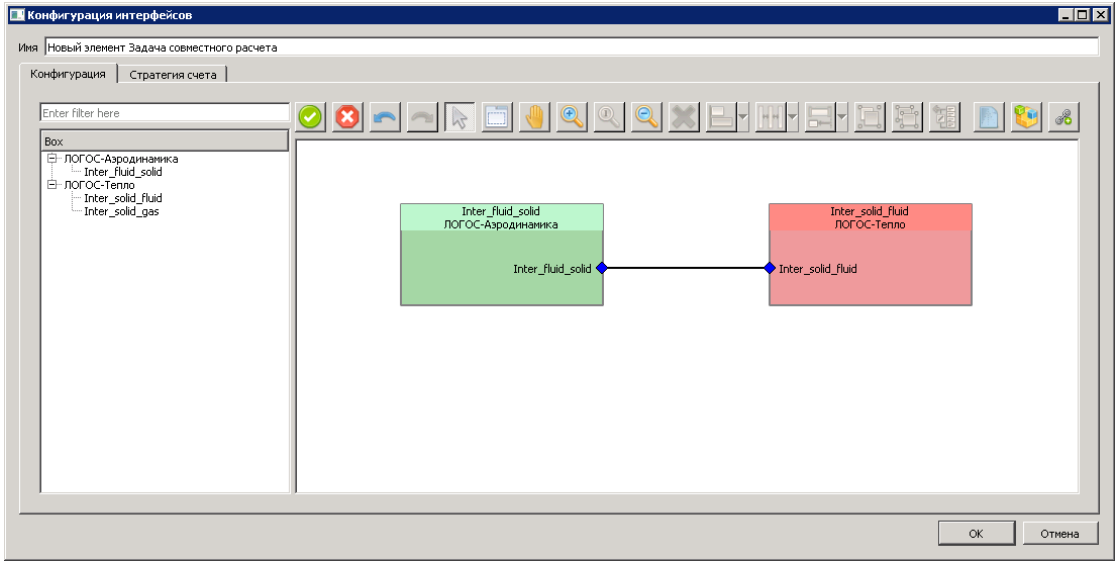


Рис. 3. Связывание доступных обменных интерфейсов для пары задач

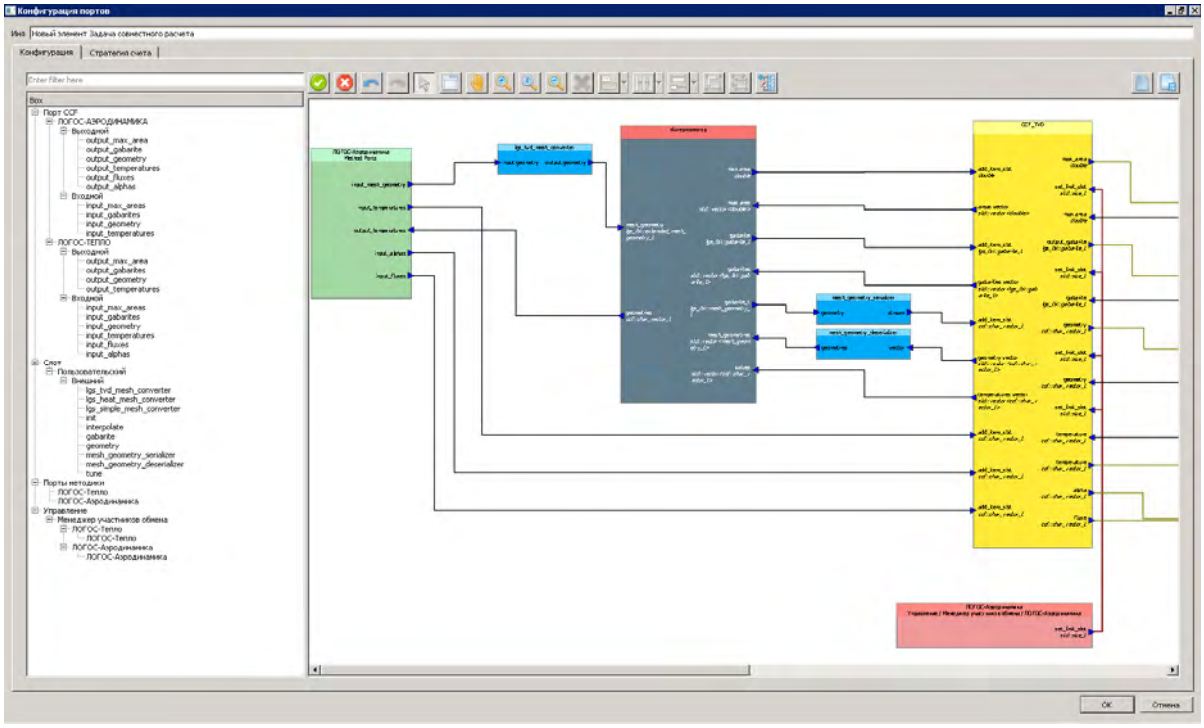


Рис. 4. Настройка прохождения данных через интерфейс связи

Интегратор гарантирует добавление на схему только допустимых связей, т. е. могут быть соединены только те точки, у которых:

– полностью совпадает тип данных;

– является совместимым направление передачи данных (т. е. вход соединяется с выходом и наоборот).

При необходимости, в схемный редактор может быть загружен подготовленный ранее шаблон, подходящий для связи указанных методик.

Архитектура графических средств

Структура реализованных графических модулей для подготовки связанной задачи представлена на рис. 5.

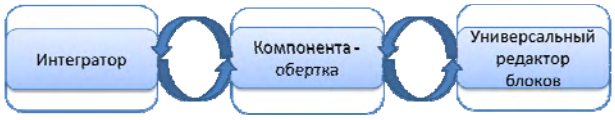


Рис. 5. Структура графических модулей

В нее входят следующие модули:

– Интегратор – обеспечивает интеграцию расчетных модулей, запуск задач на расчет и получение результатов;

– компонента обертка - встраивает в Интегратор универсальный редактор блоков и реализует логику конфигурирования связанной задачи;

– универсальный редактор блоков – реализует графический интерфейс конфигурирования блоков.

Заключение

Данные работы были проведены в рамках ТЗ Минпромторг России по созданию отечественного многофункционального пакета программ инженерного анализа и суперкомпьютерного моделирования для высокотехнологичных отраслей промышленности. В ходе работ были реализованы специализированные программные графические средства ЛОГОС для подготовки связанного расчета. Данные графические средства предоставляют гибкий интерфейс создания и настройки связанной задачи расчетных модулей с различным уровнем детализации.

Работоспособность модулей была проверена на подготовке задач связанного расчета следующих расчетных модулей:

– ЛОГОС-Аэрогидродинамика – ЛОГОС-Тепло;

– ЛОГОС Прочность – ЛОГОС-Аэродинамика;

– ЛОГОС-Гидродинамика – ЛОГОС – Тепло – ЛОГОС-Гидродинамика;

– ЛОГОС-Аэрогидродинамика – SimInTech.

РЕАЛИЗАЦИЯ МЕХАНИЗМА ОБМЕНА ПОЧТОВЫМИ СООБЩЕНИЯМИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ ЗАЩИЩЕННОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ С ПОЛЬЗОВАТЕЛЯМИ СЕТИ «ИНТЕРНЕТ»

Ю. В. Зверьков, Ю. И. Корнилов, Е. В. Дмитриева, М. М. Захаров, И. Л. Бондарь

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Сегодня корпоративная электронная почта – неотъемлемая часть бизнес-культуры и бизнес-коммуникаций в любой компании. Невозможно даже представить себе современную жизнь и бизнес без электронной почты. Электронная почта служит средством связи и при внутрикорпоративном взаимодействии.

Но все усложняется, когда речь заходит об автоматизированных системах в защищенном исполнении (АСЗИ). В случаях, когда АСЗИ имеет выход в глобальную сеть ИНТЕРНЕТ, реализация почтового взаимодействия серьезно осложняется за счет необходимости применения в АСЗИ средств защиты информации (СрЗИ) от несанкционированного доступа, обнаружения вторжений, межсетевого экранирования, применения дополнительных мероприятий, компенсирующих угрозы из ИНТЕРНЕТ. В целях обеспечения безопасности информации большая часть АСЗИ не имеет непосредственного взаимодействия с глобальной сетью, что сильно ограничивает связь с внешними системами. Одним из возможных вариантов организации доступа к данным за пределами АСЗИ является использование съемных носителей и накопителей информации для обмена данными между системами, образуя «воздушный зазор» между ними.

Организации, использующие для обработки данных АСЗИ без непосредственного доступа к глобальной сети, также нуждаются в использовании системы электронной почты для связи с внешними (для данной системы) абонентами. Наиболее простое в плане реализации решение – использование внутри предприятия абонентских пунктов доступа в ИНТЕРНЕТ, которые представляют собой небольшую локальную сеть с группой компьютеров, подключенных к глобальной сети. Но данное решение вносит множество неудобств и ограничений в работе: отсутствие работника на рабочем месте во время работы с электронной почтой, отсутствие необходимых данных из электронной почты на рабочем месте и т. п.

В данном докладе будет представлен механизм, позволяющий устранить большую часть ограничений, связанных с работой почтовой системы, с сохранением требуемого уровня защищенности АСЗИ.

Архитектура почтовой системы

В состав предлагаемой почтовой системы входит 4 почтовых сервера/кластера:

- внутренний кластер для обработки почтовых сообщений АСЗИ на базе Microsoft Exchange Server;
  - группа серверов с ролью mailbox объединена в Database Availability Group;
  - группа серверов с комбинированной ролью HubTransport+ClientAcces, объединена в NLB-кластер с общим сетевым именем;
  - сервер с ролью Unified Messaging для взаимодействия с MS Lync;
- внутренний почтовый сервер в открытой локальной сети предприятия, не имеющей выхода в ИНТЕРНЕТ;
- внешний почтовый сервер в ДМЗ внешней сети предприятия, имеющей выход в ИНТЕРНЕТ.

Всю структуру предприятия можно разделить на 3 части:

- изолированная сеть – АСЗИ, где работает большинство пользователей и идет обработка конфиденциальной информации;
- внутренняя сеть – сеть, оборудование которой не имеет доступа к сети ИНТЕРНЕТ, но имеет подключение к сети, имеющей выход в ИНТЕРНЕТ;
- внешняя сеть – сеть, оборудование которой имеет выход в ИНТЕРНЕТ.

Такая организация сетевой инфраструктуры позволяет обеспечить требуемый уровень информационной безопасности на предприятии при работе с ИНТЕРНЕТ. Передача информации между АСЗИ и внутренней сетью осуществляется через подключаемые устройства хранения информации, такие как usb-диски. В такой системе почтовый кластер АСЗИ выступает как полноценная почтовая система, где и осуществляется основной контроль исходящей почты.

Почтовая система внутренней сети обеспечивает всю обработку приходящих извне писем. Здесь же производится и обработка входящей почтовой корреспонденции, предназначенной для последующего перемещения в АСЗИ.

Почтовая система внешней сети служит только для выполнения операций приема и отправки почтовой

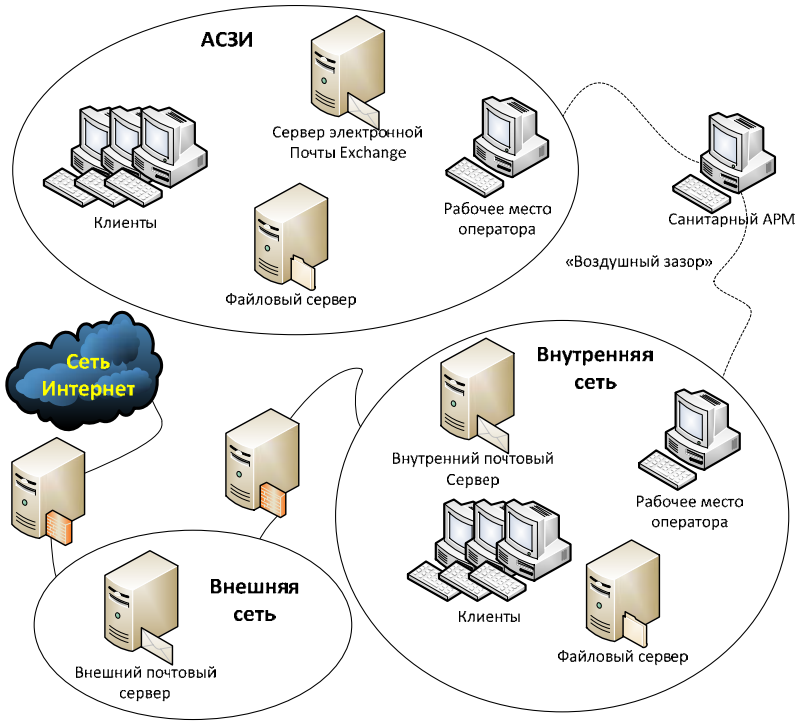


Рис. 1. Архитектура системы электронной почты предприятия

корреспонденции и первоначальной фильтрации входящих писем (фильтром спама отсеивается, как правило, 90 % нежелательной почты, приходящей на адреса пользователей АСЗИ).

Организация отправки-получения внешней электронной корреспонденции

Внутри АСЗИ электронная почта работает без видимых отличий от любой другой почтовой системы. При отправке на адреса АСЗИ на письма накладываются минимальные ограничения, определяемые ее руководящим составом. В случае, когда сервер Exchange сталкивается с незнакомым (внешним) адресом, письмо электронной почты проходит несколько уровней модерирования, прежде чем будет отправлено за пределы АСЗИ. Процесс модерирования имеет линейную структуру, позволяющую отсеивать некорректную корреспонденцию на различных этапах. В соответствии со штатной организацией было выбрано три ступени модерирования: непосредственный начальник отправителя, служба контроля подразделения отправителя, служба контроля предприятия.

После прохождения всех уровней модерирования письмо из АСЗИ передается для отправки на почтовый сервер внутренней сети предприятия путем сохранения копии письма в специальном формате. В связи с тем, что между АСЗИ и внутренней сетью, а соответственно, и между почтовыми серверами отсутствует прямой канал связи, перемещение информации осуществляется не стандартным почтовым протоколом, переносом файлов с письмами. При этом файлы переносятся операторами из выходного каталога почтового сервера АСЗИ во входной каталог почтового сервера внутренней сети, что и обеспечивает контролируемый ручной перенос данных – «воздушный зазор». Для реализации подобного механизма используются файловые серверы в каждой из сетей, между которыми осуществляется перемещение. Данные с сервера АСЗИ копируются на съемный носитель соответствующего уровня конфиденциальности с соблюдением требований информационной безопасности, далее, через санитарный АРМ, данные переносятся на открытый съемный носитель, после чего с него переносятся на файловый сервер внутренней сети. Аналогичным образом переносятся данные в обратном порядке. Для перемещения файлов между файловым и почтовым серверами внутри сети используются задачи по расписанию, что значительно сокращает затрачиваемое время и усилия, позволяя максимально автоматизировать этот процесс.

Внутренний почтовый сервер стандартным образом получает входящие письма от почтового сервера внешней сети, сохраняет их копии и осуществляет обработку: разбирает письма на составляющие и собирает их заново, чтобы исключить нестандартные внедренные данные. Допускается ввод в АСЗИ только некоторых типов изображений в качестве вложений (PNG, JPEG, TIFF, GIF), текст и вложения в формате PDF. Открытыми пакетами для ОС Linux производится попытка преобразования недопустимых вложений в формат PDF, если это не удается, вложение удаляется с соответствующим комментарием в письме. На абонентском пункте ИНТЕРНЕТ подразделения оригинал письма сохраняется – с ним можно работать вне АСЗИ.

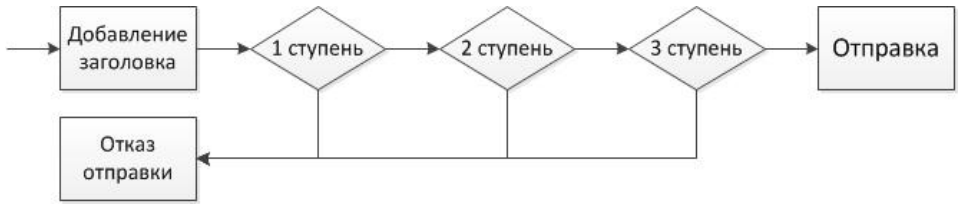


Рис. 2. Схема модерирования исходящей почты

Система согласования исходящей почты

Внешняя электронная почта, отправляемая из СВС РФЯЦ-ВНИИЭФ, подвергается трехступенчатому контролю при помощи разрешительной системы. Разрешительная система реализована с использованием механизма модерирования почтовых сообщений почтового сервера Microsoft Exchange Server. Для этого все пользователи делятся на группы, как правило динамические. Такое распределение пользователей позволяет определить ответственных сотрудников на каждом этапе модерирования, а также исключить один или все этапы модерирования. Таким образом существует два основных деления на динамические группы, для первых двух уровней. Первое включает в группы, в состав которых входят сотрудники одного отдела. Для каждого отдела существует собственная группа. По аналогии существуют группы, объединяющие в себе все отделы, одного подразделения. Для сложных случаев, когда нельзя точно определить принадлежность сотрудника к определенной группе, создаются статические группы. Так же создаются статические группы для исключения модерирования, для тех кому разрешено отправлять почтовые сообщения на внешние адреса.

Система модерирования имеет линейную структуру, где каждый след шаг начинается только при успешном окончании предыдущего. В первую очередь происходит формирование заголовка письма, после чего письмо поступает для проверки непосредственному руководителю. После получения разрешения на первом уровне, письмо поступает в службу контроля на уровне подразделения. И конечным уровнем является проверка службой безопасности.

При согласовании на всех трех уровнях, копия письма передается на файловый сервер, для дальнейшей отправки на внешний адрес. В случае отклонения на любом уровне, отправителю приходит уведомление об отказе в отправке данного сообщения. Таким образом, вся исходящая корреспонденция, за исключением доверенных отправителей, проходит 3 стадии контроля, что исключает отправку во вне информации, не предназначенной для внешних адресатов.

Статистическая информация по работе почтовой системы

Для более наглядного представления об исходящей почте, ежедневно формируются протоколы для службы контроля. Протоколы содержат сведения об отправленных за сутки сообщений на внешние адреса. Для простоты дальнейшего использования, протоколы формируются в формате HTML. Помимо этого, создается веб-ресурс, позволяющий отслеживать на какой стадии находится письмо. Таким образом, сотрудники могут посмотреть на какой ступени находится их письмо, и время прохождения очередной ступени. Пример реализации механизма отображения статистической информации представлен на рис. 3.

Информация об отправленных за пределы СВС ВНИИЭФ письмах

От кого	Кому	Согласование			Доставка	
		руководителем	службой контроля	службой безопасности	на внутренний сервер	на сервер получателя
[redacted]	[redacted]	-	01-07-2019 15:33:56	-	-	-
[redacted]	[redacted]	-	-	-	-	-
[redacted]	[redacted]	01-07-2019 14:53:42	01-07-2019 14:57:05	01-07-2019 15:18:28	-	-
[redacted]	[redacted]	-	01-07-2019 14:43:29	01-07-2019 15:18:06	-	-
[redacted]	[redacted]	-	-	-	-	-
[redacted]	[redacted]	-	01-07-2019 13:47:09	01-07-2019 14:10:00	-	-
[redacted]	[redacted]	01-07-2019 11:41:13	01-07-2019 11:42:44	01-07-2019 14:09:39	-	-
[redacted]	[redacted]	01-07-2019 07:54:42	01-07-2019 09:50:07	01-07-2019 14:03:41	-	-
[redacted]	[redacted]	-	-	-	-	-
[redacted]	[redacted]	01-07-2019 08:42:18	01-07-2019 09:05:50	01-07-2019 09:09:44	01-07-2019 11:56:17	01-07-2019 11:56:43

Рис. 3. Информация об исходящей корреспонденции

Заключение

Электронная почта, жизненно необходимая система для большинства компаний. Представленная реализация механизма электронной почты позволяет использовать полноценный обмен электронными почтовыми сообщениями в условиях автоматизированной системы в защищенном исполнении, что позволяет значительно экономить время сотрудников и своевременно получать информацию. При этом соблюдаются все необходимые требования информационной безопасности.

Литература

1. [Electronic resource] Mode of access: https://technet.microsoft.com

ТЕХНОЛОГИЯ ИНТЕГРАЦИИ В ЛОГОС.ПРЕПОСТ МОДУЛЕЙ ПРЕПРОЦЕССИНГА ДЛЯ СЧЕТНЫХ ПРОГРАММ СТОРОННИХ РАЗРАБОТЧИКОВ

Е. Н. Киселев, К. В. Иванов, А. В. Гордеев, Н. А. Мустаева, Н. И. Колпаков

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Препостпроцессор ЛОГОС.ПреПост [1] спроектирован как модифицируемая система, допускающая расширение функциональности. В данном докладе расширение функциональности рассматривается с точки зрения реализации в рамках ЛОГОС.ПреПост поддержки предварительной обработки (препроцессинга) данных для расчетных кодов сторонних разработчиков.

ЛОГОС.ПреПост – это программный модуль пакета программ «ЛОГОС» для автоматизированной подготовки и обработки расчетных моделей с целью моделирования задач аэродинамики, гидродинамики, теплопереноса, прочности, кинематики и ряда других задач.

ЛОГОС.ПреПост предоставляет графическую среду для решения на ЭВМ под управлением операционных систем Windows и Linux следующих задач:

- подготовка сеточных моделей;
- задание начальных и граничных условий;
- задание параметров моделирующих программ пакета ЛОГОС;
- запуск и сопровождение счета;
- графическая и числовая обработка результатов моделирования.

На рис. 1 изображена схема типового рабочего процесса подготовки и расчета задачи в ЛОГОС.ПреПост (штриховой линией выделены этапы работы, на которых осуществляется препроцессинг данных).

Разработка ЛОГОС.ПреПост началась в 2010 г. и изначально базировалась на требованиях к функциональности (исходных данных) методик расчета аэродинамики, гидродинамики, теплопереноса и прочности. Поэтому под сторонними разработчиками в рамках доклада подразумеваются разработчики тех методик, чьи требования к функциональности не учитывались при проектировании архитектуры ЛОГОС.ПреПост.

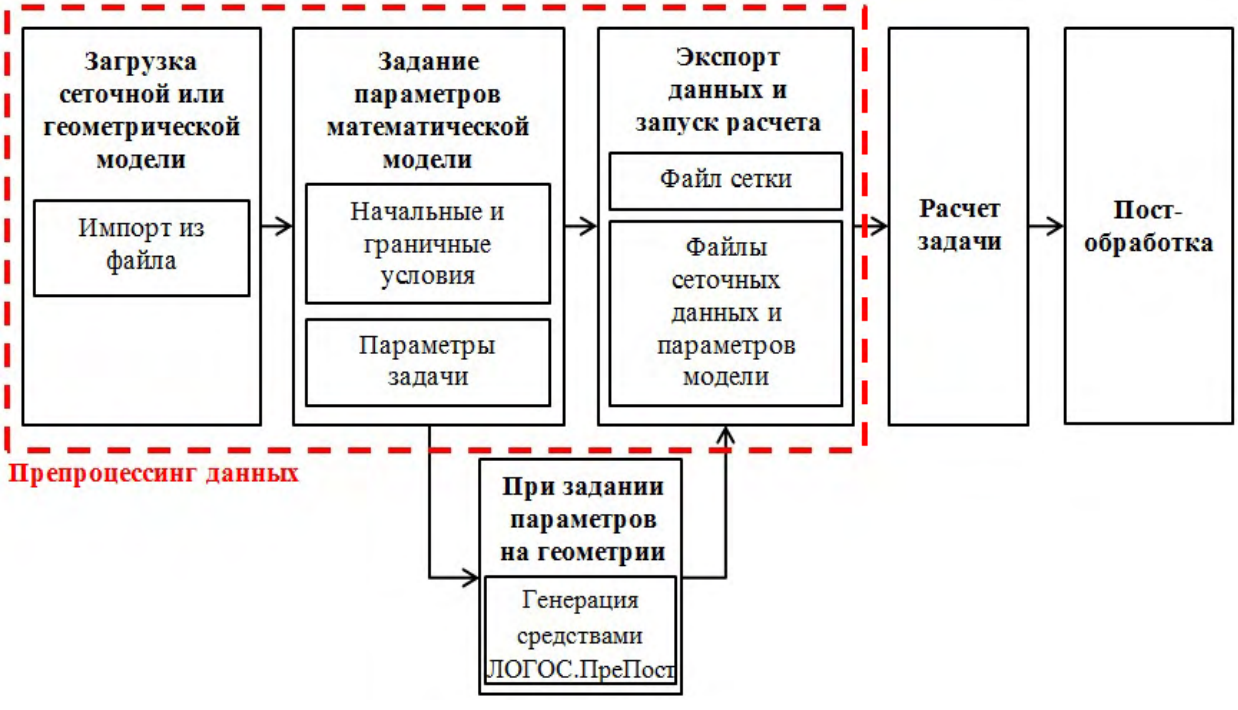


Рис. 1. Схема типового рабочего процесса подготовки и расчета задачи в ЛОГОС.ПреПост

Описание проблемы

В рамках работ по развитию ЛОГОС.ПреПост ведется разработка графического пользовательского интерфейса (ГПИ), предназначенного для предварительной обработки данных (препроцессинга) и анализа результатов расчетов (постпроцессинга), проведенных с использованием отечественных счетных кодов.

Основным направлением развития препроцессинга является реализация средствами ЛОГОС.ПреПост дружественного интерфейса для подготовки данных, необходимых методике для проведения расчета. Проблема внедрения в ЛОГОС.ПреПост и последующего сопровождения с наименьшими трудозатратами новой функциональности (в частности, модулей препроцессинга) является актуальной, поскольку предварительная обработка данных является неотъемлемой частью процесса подготовки задач.

Модуль препроцессинга в ЛОГОС.ПреПост представляет собой совокупность программных средств, участвующих в предварительной обработке данных при подготовке задач.

В процессе интеграции модуля препроцессинга для сторонней счетной программы разработчикам ЛОГОС.ПреПост необходимо:

- обеспечить преемственность ГПИ;
- максимально задействовать имеющиеся средства формирования математических моделей ЛОГОС.ПреПост (для снижения трудозатрат на реализацию и последующее сопровождение программного кода).

Перед разработчиками методики, в свою очередь, стоит задача определения способа своего участия в процессе интеграции – ограничиться лишь предоставлением исходных данных или же, если позволяет ситуация, задействовать функциональность собственной разработки в модуле препроцессинга ЛОГОС.ПреПост.

Первый вариант, как правило, предполагает отсутствие у разработчиков методики развитого модуля препроцессинга (либо сложность его выделения из общего кода) и обладает рядом нюансов:

- возникает необходимость в подготовке разработчиками методики больших объемов исходных данных и требований к функциональной логике ЛОГОС.ПреПост;
- требуется непрерывное взаимодействие с разработчиками ЛОГОС.ПреПост (передача исходных данных, получение новых версий ЛОГОС.ПреПост, тестирование и описание выявленных несоответствий и т. д.);
- не используются наработки методики в части препроцессинга (при таком варианте взаимодействия подразумевается создание модуля препроцессинга «с нуля»);
- имеет место высокая зависимость от разработчиков ЛОГОС.ПреПост при сопровождении кода.

Главной отличительной особенностью второго варианта взаимодействия является требование к наличию собственной функциональности в части препроцессинга, оформленной в виде набора динамически подключаемых библиотек. Активное взаимодействие с разработчиками ЛОГОС.ПреПост в данном случае происходит на этапе проектирования архитектуры кода и реализации программного интерфейса для подключения библиотек к ЛОГОС.ПреПост.

Способы интеграции

В зависимости от функциональности, требуемой счетной методикой от препостпроцессора, а также исходя из имеющихся возможностей инструментария ЛОГОС.ПреПост, расширение функциональности ЛОГОС.ПреПост в части модулей препроцессинга может быть реализовано одним из следующих способов (или обоими одновременно):

1) редактирование текстовых файлов подсистемы конфигурирования;

2) добавление или замена модифицируемых компонентов, реализующих определенные программные интерфейсы.

Интеграция первым способом осуществляется преимущественно путем настройки дерева объектов графического пользовательского интерфейса (дерева модели) ЛОГОС.ПреПост и логики взаимодействия его узлов, описания хранилища и динамически генерируемых (шаблонных) диалогов через конфигурационные файлы. При этом возможна модификация или создание модулей импорта/экспорта данных, настройка визуализации и реализация нестандартного интерфейса диалоговых окон (в случае отсутствия возможности реализации требуемого «поведения» диалогового окна через реализованный в ЛОГОС.ПреПост универсальный механизм создания пользовательских интерфейсов).

Интеграция вторым способом осуществляется посредством подключения через SDK к ЛОГОС.ПреПост библиотек, реализующих логику работы дерева модели, импорт/экспорт данных, формирование объектов визуализации в интересах счетной программы. Данный способ требует модификации программных компонентов ЛОГОС.ПреПост (визуализатора, контроллера дерева модели и др.).

Описание архитектуры модуля препроцессинга для определения набора модифицируемых компонентов

После определения способа интеграции в ЛОГОС.ПреПост новых модулей препроцессинга перед разработчиками встает вопрос определения перечня модифицируемых программных компонентов.

Основные усилия авторов доклада были направлены на систематизацию различных подходов к интеграции модулей препроцессинга для счетных программ на основе опыта внедрения различных методик большим коллективом разработчиков за не-

сколько лет развития ЛОГОС.ПреПост. Стоит все же отметить, что описанная выше классификация способов внедрения является достаточно условной, так как при интеграции одним и тем же способом модулей препроцессинга для разных методик набор модифицируемых программных компонентов ЛОГОС.ПреПост может оказаться различным.

Базовый набор компонентов ЛОГОС.ПреПост, участвующих в препроцессинге данных, схематично представлен на рис. 2.

Как видно из рисунка, в архитектуре модуля препроцессинга ЛОГОС.ПреПост можно выделить три основных уровня: уровень представления, уровень функциональной логики (бизнес-логики) и уровень данных.

Уровень представления охватывает все компоненты, которые имеют отношение к взаимодействию пользователя с программой - например, ввод управляющих команд от пользователя и вывод результатов работы на экран монитора. Сюда входит компонент визуализации, графический пользовательский интерфейс для интерактивного взаимодействия и компонент для управления деревом объектов функциональной логики (контроллер дерева модели).

Уровень бизнес-логики реализует основную функциональность системы и обеспечивает взаимодействие между данными и представлением. Для уровня бизнес-логики характерны следующие базовые понятия:

- объект – совокупность данных, представляющих собой логически выделенную единицу с точки зрения предметной области. Как правило, используется для описания интерфейса диалоговых окон (содержит характеристики параметров и диалоговых окон – типы данных, условия видимости, зависимости, флаги, настройки синхронизации, способы задания, свойства и т. п.);
- операция – выделенная с точки зрения предметной области законченная последовательность действий. Компоненты уровня представления могут получить доступ к объектам бизнес-логики посредством операций. Примерами операций являются добавление, удаление, модификация и чтение объектов.

Кроме объектов и операций к уровню бизнес-логики относится компонент конфигурации системы (конфигуратор), который отвечает за разбор конфигурационных файлов и трансляцию в различные структуры данных всей метаинформации о системе (описаний структуры хранилища, объектов системы, операций с объектами, моделей и другой вспомогательной информации, необходимой для работы).

Уровень данных отвечает за хранение, импорт и экспорт обрабатываемой информации. Ключевым компонентом данного уровня является хранилище данных. Хранилище данных представляет собой структуру в оперативной памяти, которая предназначена для хранения данных, описывающих текущую математическую модель – топологию сетки, наборы сеточных элементов, значения начальных и граничных условий, параметров задачи и др.

Также к уровню данных относятся импортеры и экспортеры – динамически подключаемые библиотеки для преобразования данных из различных источников в требуемый формат их физического представления.

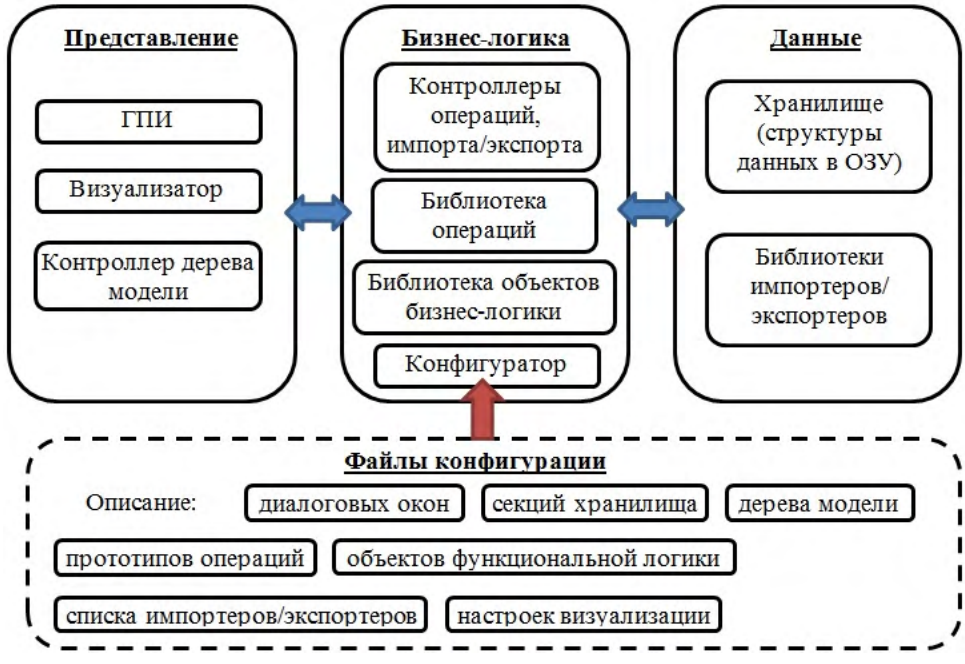


Рис. 2. Базовый набор компонентов ЛОГОС.ПреПост, участвующих в препроцессинге данных

Описание технологии интеграции модулей препроцессинга в ЛОГОС.ПреПост

Для формирования общего представления о процессе внедрения модулей подготовки математической модели в рамках проведенной работы выполнена систематизация накопленных знаний, результат которой представлен в виде описания технологии интеграции модулей препроцессинга.

В технологическом процессе интеграции модулей предварительной обработки данных в ЛОГОС.ПреПост можно выделить следующие этапы:

- передача, анализ и обсуждение исходных данных. К исходным данным относятся:
  - общие требования к интерфейсу;
  - способы задания начальных и граничных условий (на ячейках/гранях/узлах и т.п.);
  - требования к визуализации сеток и оценка ее необходимости для целевой методики;
  - формат хранения топологии сеток (гранереберный, ячеечно-узловой);
  - тип используемых сеток (структурированные/неструктурированные);
  - размерность используемых сеток;
  - список необходимых форматов импортируемых и экспортируемых файлов;
  - необходимый инструментарий для работы с сетками (модификация, анализ и др.);
- определение способа интеграции модуля препроцессинга в ЛОГОС.ПреПост (в зависимости от готовности разработчиков методики подготовить и предоставить функциональность собственной разработки);
- определение зон ответственности разработчиков методики и ЛОГОС.ПреПост, разработка технического задания (ТЗ);
- формирование списка модифицируемых компонентов ЛОГОС.ПреПост;
- модификация программного кода компонентов ЛОГОС.ПреПост;
- тестирование и отладка реализованной функциональности.

Далее в докладе приводится описание примеров внедрения в ЛОГОС.ПреПост модулей препроцессинга для счетных программ по указанной технологии.

Пример интеграции модуля препроцессинга в интересах методики ЛЭГАК

В данном разделе описывается внедрение в ЛОГОС.ПреПост модуля препроцессинга для методики ЛЭГАК [2] в соответствии с ранее описанной технологией. Методика ЛЭГАК служит для расчета на регулярных сетках многомерных задач газовой динамики с учетом различных физико-математических моделей детонации, а также прочности и разрушения материалов.

Интеграция выполнялась согласно техническому заданию и по совокупности требуемых изменений отнесена к первому способу интеграции, основанному преимущественно на редактировании текстовых файлов подсистемы конфигурирования.

В соответствии с выбранным способом интеграции между разработчиками были поделены зоны ответственности. Разработчики ЛЭГАК со своей стороны предоставляли программную документацию и осуществляли консультирование и передачу уточненных исходных данных, а разработчики ЛОГОС.ПреПост отвечали за модификацию программных компонентов ЛОГОС.ПреПост.

Набор модифицируемых компонентов ЛОГОС.ПреПост при внедрении модуля препроцессинга в интересах методики ЛЭГАК отмечен на рис. 3.

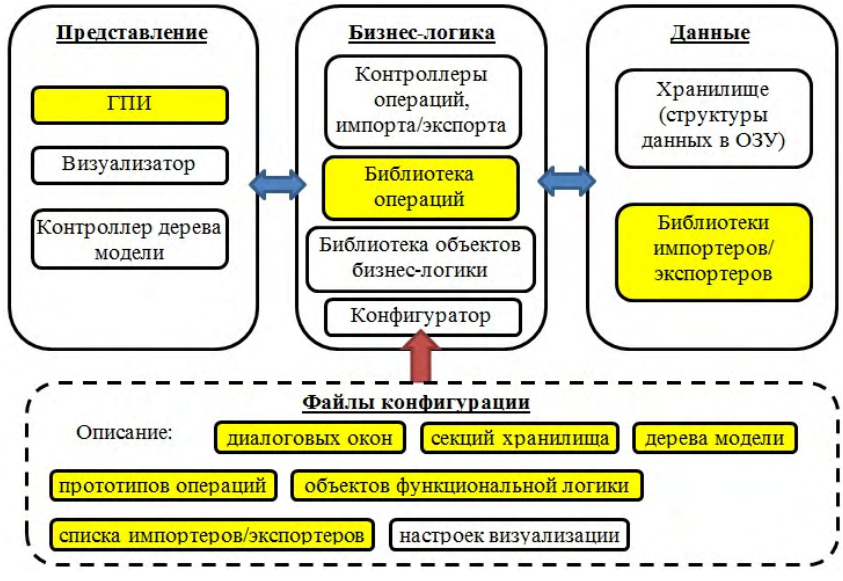


Рис. 3. Модифицируемые компоненты ЛОГОС.ПреПост при интеграции модуля препроцессинга методики ЛЭГАК (выделены цветом)

В частности, было выполнено следующее:

- добавлен большой объем текстовых описаний интерфейса и прочих настроек в файлы конфигурации;
- на уровне бизнес-логики реализован набор специфических операций для работы с данными;
- реализованы импортеры/экспортеры для работы с файлами данных в форматах ЕФР [3] и DBS [4], в которых сосредоточена и упорядочена в единую структуру вся необходимая информация о рассчитываемой задаче;
- реализован нестандартный интерфейс для ряда диалоговых окон (с табличным представлением данных и панелью управляющих элементов).

Отличительной особенностью интегрированного модуля является то, что на этапе предварительной обработки данных для методики ЛЭГАК не предполагается визуализация сеточной топологии. Кроме того, в целях экономии ОЗУ чтение массивов данных из файлов производится «на лету», т. е. непосредственно в момент обращения к ним (через соответствующее диалоговое окно).

В целом интеграция, выполненная в интересах методики ЛЭГАК, хорошо иллюстрирует ЛОГОС.ПреПост как систему, способную предоставить большой набор «штатных» инструментов для добавления нового модуля препроцессинга.

Пример интеграции модуля препроцессинга в интересах методики моделирования движения многокомпонентных механических систем (EULER)

Данный раздел описывает процесс внедрения модуля препроцессинга, разработанного сторонней организацией, в соответствии с ранее описанной технологией.

Интеграция модуля препроцессинга выполнялась в соответствии с техническим заданием, согласно которому требовалось реализовать программное средство (в виде библиотеки с исходными кодами, встраиваемой в ЛОГОС.ПреПост) для подготовки расчетной модели движения автомобиля при имитации дорожных испытаний.

Выбранный подход к решению поставленной задачи в общей терминологии относится к методу неавтоматизированной интеграции «на уровне пользователя» и основывается на взаимодействии разработчиков друг с другом путем обмена данными и файлами через ручное копирование, оправку почты и т. д. [5]. В рамках текущего доклада такой подход относится ко второму способу интеграции, предполагающему добавление или замену модифицируемых компонентов ЛОГОС.ПреПост, реализующих определенные программные интерфейсы.

Согласно выбранному подходу между разработчиками были поделены зоны ответственности. Разработчики сторонней организации со своей стороны готовили программную реализацию методов доступа к внутренней информации своего модуля, а разработчики ЛОГОС.ПреПост отвечали за последующее внедрение указанных методов и реализацию отображения полученных данных в ГПИ ЛОГОС.ПреПост.

Набор модифицируемых компонентов ЛОГОС.ПреПост при интеграции модуля препроцессинга в интересах методики EULER [6] отмечен на рис. 4.

Модуль препроцессинга, разработанный сторонней организацией, представляет собой набор классов и функций, участвующих в сборке программного модуля ЛОГОС.ПреПост, а также набор динамически подключаемых библиотек, которые размещаются в SDK (сокр. от software development kit – набор инструментальных средств разработки) ЛОГОС.ПреПост и предоставляют следующие программные интерфейсы для доступа к внутренней информации:

- чтение данных модели из файла *.ELR;
- доступ к объектам модели;
- сохранение данных модели в файл *.ELR.

Файлы *.ELR хранят данные во внутреннем формате методики EULER в виде текстового описания параметров объектов, участвующих в процессе моделирования движения автомобиля при имитации дорожных испытаний. Фрагмент ELR-файла представлен на рис. 5.

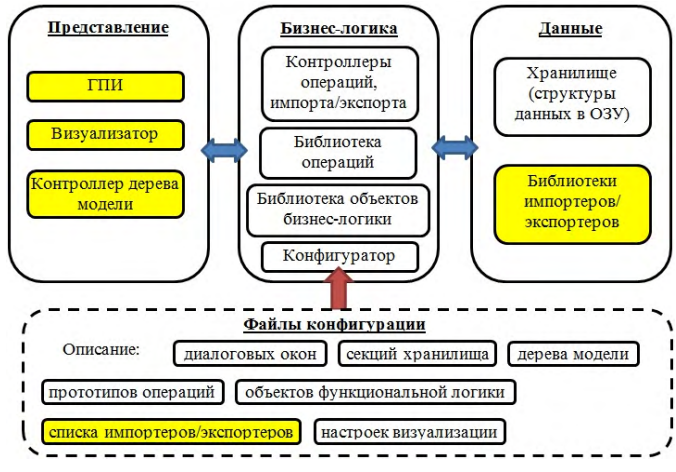


Рис. 4. Модифицируемые компоненты ЛОГОС.ПреПост при интеграции модуля препроцессинга методики EULER (выделены цветом)

```
// Простой автомобиль.
//
scalar B "колея"=1600 [ mm ];
scalar L "база"=2400 [ mm ];
scalar Mk "масса корпуса автомобиля"=1600 [ kg ];
scalar Ms1 "масса подвески колеса"=50 [ kg ];
scalar Mw1 "масса колеса"=50 [ kg ];
scalar Rs "радиус подвески колеса"=160 [ mm ];
scalar fK "частота подвески"=1 [ Hz ];
scalar ksiK "затухание подвески"=0.25;
// Данные шины
scalar B_tire "ширина профиля шины"=240 [ mm ];
scalar Rt "свободный радиус шины"=400 [ mm ];
scalar R_rim "посадочный радиус"=220 [ mm ];
scalar Rp "поперечный радиус"=400 [ mm ];
scalar PN "номинальная нагрузка"=500 [ kgf ];
scalar hN "номинальный прогиб"=20 [ mm ];
scalar Ky "коэфф. сопротивления уводу при номинальной нагрузке"=100 [ kgf/ deg ];
// Параметры и условия движения
scalar V0 "начальная скорость"=30 [ km/h ];
scalar mu_s "коэффициент трения скольжения"=0.9;
//
// Кузов
point pCenter=point( -L/2, 0 [ m ], Rt );
point pK1=point( 0 [ m ], 0 [ m ], 0 [ m ] );
point pK2=point( Rt*1.5, 0 [ m ], Rt*0.5 );
point pK3=point( Rt*1.5, 0 [ m ], Rt*1.5 );
point pK4=point( -Rt, 0 [ m ], Rt*1.8 );
point pK5=point( -Rt*2, 0 [ m ], Rt*3 );
point pK6=point( -L, 0 [ m ], 0 [ m ] );
point pK7=point( -L-Rt*1.2, 0 [ m ], Rt*0.5 );
point pK8=point( -L-Rt*1.2, 0 [ m ], Rt*1.5 );
point pK9=point( -L, 0 [ m ], Rt*3 );
line line_K1=polyLine( list( pK6, pK1, pK2, pK3, pK4, pK5, pK9, pK8, pK7, pK6 ), visible = hide: );
point pK10=point( 0 [ m ], B/2-B_tire, 0 [ m ] );
point pK11=mirror( pK10, planeXZ );
solid solid_K1=extrude( line_K1, pK10, pK11 );
```

Рис. 5. Фрагмент ELR-файла в формате методики EULER

Моделирование кинематики (расчет задач по методике EULER) не требует наличия подробной сеточной топологии в виде описаний ячеек, граней и ребер – сеточная информация в ELR-файле представляет собой совокупность узлов, скаляров и полилиний, на основе которых формируются объемные геометрические тела (путем зеркалирования, экструзии и т. п.).

В соответствии со списком объектов бизнес-логики, полученных из ELR-файла, производится формирование дерева модели в ГПИ ЛОГОС.ПреПост. Пример дерева модели, сформированного в результате импорта ELR-файла, представлен на рис. 6.

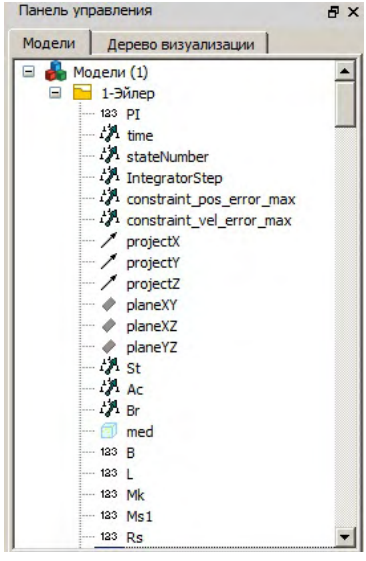


Рис. 6. Пример сформированного дерева модели «Эйлер» в ЛОГОС.ПреПост

Для формирования в окне визуализации ЛОГОС.ПреПост объемных изображений элементов конструкций на основе идеализированных сеточных элементов были реализованы программные интерфейсы для подготовки и передачи сеточных объектов в формате VTK (Visualization Toolkit – открытая кроссплатформенная библиотека трехмерного моделирования, используемая в ЛОГОС.ПреПост).

Впоследствии разработчиками ЛОГОС.ПреПост обеспечена подсветка в окне визуализации и идентификация объектов визуализации по объектам дерева модели и наоборот – переход к соответствующим узлам в дереве модели при интерактивном взаимодействии с элементами отображаемой в окне визуализации сеточной модели. Пример отображения и подсветки элементов сеточной модели представлен на рис. 7.

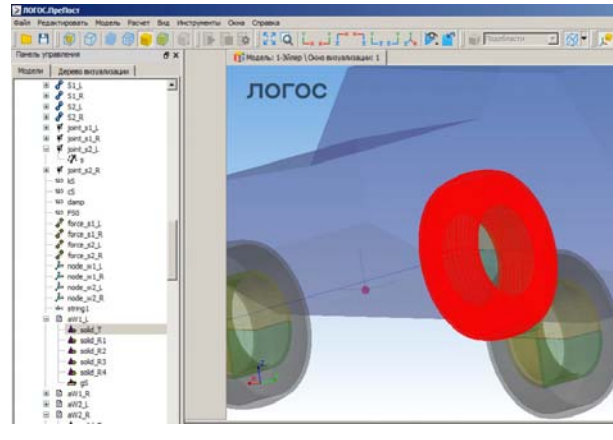


Рис. 7. Отображение и подсветка сеточных элементов модели «Эйлер» в ЛОГОС.ПреПост

Заключение

Представленная технология внедрения модулей предварительной обработки данных для счетных методик является результатом систематизации знаний и опыта, накопленных за 9 лет развития программы ЛОГОС.ПреПост. На примере конкретных методик дано общее представление о способах интеграции модулей препроцессинга в ЛОГОС.ПреПост.

Литература

1. Анищенко А. А., Дерюгин В. И., Дюпин В. Н., Иванов К. В., Санталов А. С., Санталова Е. Е. Препостпроцессор ЛОГОС – ПРЕПОСТ, архитектура уровня бизнес – логики, хранение, импорт и экспорт данных // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2014. Вып. 2. С. 78–82.

2. Бахрах С. М., Величко С. В., Спиридонов В. Ф. и др. Методика лэгак-3d расчета трехмерных нестационарных течений многокомпонентной сплошной среды и принципы ее реализации на многопроцессорных эвм с распределенной памятью // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2004. Вып. 4. С. 41–50.

3. Олесницкая К. К., Антипин И. А., Шубина М. А. Библиотека ЕФР для масштабируемого доступа к файловым данным на многопроцессорных ЭВМ / XIII Международная конференция «Супервычисления и математическое моделирование» // Сб. науч. тр. под ред. Р. М. Шагалиева. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2011. С. 101–102.

4. Артамонов М. В., Величко С. В., Дерюгин В. И., Захарова Н. А., Мустаева Н. А., Резяпов А. А. Подсистема для обработки несеточных данных по задаче и ее интеграция в комплекс ЛОГОС / XVI Международная конференция «Супервычисления и математическое моделирование» //Сб. науч. тр. под ред. Р. М. Шагалиева. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2017. С. 36–41.

5. Думченков И. А. Обзор методов интеграции информационных систем, их преимуществ и недостатков // Молодой ученый. 2018. № 23. С. 176–177.

6. Программный комплекс EULER [Электронный ресурс]: программный комплекс автоматизированного динамического анализа многокомпонентных механических систем / ООО «Автомеханика».[1993–2019]. Режим доступа: http://www.euler.ru/index.php/euler.

РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТАЭВРИСТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ В ВИП «ОПТИМУС»

А. Б. Кондратьев, О. В. Коваленко, И. А. Крючков, Д. В. Ежов, А. В. Огородников

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

За последние годы в различных государственных органах и ведомствах, а также коммерческих организациях возникла потребность в различного рода средствах поддержки принятия решений, основанных на моделировании и оптимизации поведения действующих или вновь реализуемых систем. Основной задачей этих средств является поиск оптимальных способов функционирования, управления и достижения запланированных результатов в различных подразделениях организации или на предприятии в целом.

Разработанная во ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» визуализационно-интеграционная платформа для оптимизационного имитационного моделирования и управления системами (ВИП «ОптИМУС» [8]) позволяет в кратчайшие сроки реализовать тот или иной программный комплекс для различных заказчиков. Эта платформа является основой для коммерческих приложений с различными реализациями функциональности и пользовательских интерфейсов.

Главными особенностями ВИП «ОптИМУС» являются:

– единый комплекс различных компонентов, обеспечивающий удобный интерфейс для конечного пользователя;

– набор средств для моделирования необходимых задач;

– реализация оптимизационных алгоритмов для заданных параметров;

– привязка к различным системам геопозиционирования;

– различные способы хранения полученных результатов.

Одним из основных блоков платформы является блок оптимизации, который позволяет в автоматическом или полуавтоматическом режиме находить наиболее оптимальное решение задачи в зависимости от заданных параметров и критериев. Найденные оптимальные параметры процесса позволяют не только минимизировать расход материальных ресурсов, но и решить множество других проблем. Например, минимизировать человеческие трудозатраты.

В данной работе рассмотрены реализованные в платформе методы оптимизации, основанные на метаэвристических алгоритмах, а также проведено сравнение эффективности работы алгоритмов на тестовых функциях.

Метавристический подход к нахождению оптимального решения

Метаэвристические алгоритмы – алгоритмы решения задачи, основанные на различных эвристиках, как правило, взятых из природных аналогов или практической деятельности человека. Точность этих алгоритмов не доказано, но практика показывает их выдающиеся результаты по сравнению с так называемыми «точными» алгоритмами.

Метаэвристические алгоритмы применяются для задач высокой вычислительной сложности (задачи класса NP).

Эти алгоритмы применяются в областях искусственного интеллекта, таких как распознавание образов и речи, в компьютерных играх и антивирусных программах и ряде других областях.

Основной критерий эффективности метаэвристических алгоритмов является затраченное время на нахождение оптимального решения как функция размерности задачи. С увеличением размерности моделируемой системы растет и вычислительная сложность решаемой задачи. Размерность задач, которые способны решать метаэвристические алгоритмы за разумное время, в сотни раз выше, чем размерность задач, доступная для «точных» методов оптимизации.

Реализованные оптимизационные алгоритмы в ВИП «ОптИМУС»

В ходе создания платформы были реализованы следующие алгоритмы оптимизации:

– метод Монте-Карло;

– полный перебор в заданном диапазоне;

– метод роя частиц;

– муравьиный алгоритм.

Все вышеперечисленные алгоритмы применяются для определенного рода задач, например, полный перебор не работает в поле непрерывных чисел. Так же, работа каждого алгоритма требует различный объем вычислительных ресурсов.

Постановка задачи оптимизации

Для любой задачи оптимизации в ВИП «ОптИМУС» ставится цель найти минимум или максимум значения целевой функции. Целевой функцией могут выступать любые функции, которые зависят от ко-

нечного числа параметров. Эти параметры могут быть представлены в виде заданных промежутков или набора дискретных переменных.

В качестве тестовой задачи в ВИП «ОптИМУС» была представлена задача «Зомби». Суть задачи состоит в том, что на некотором заданном пространстве располагаются объекты типа «Человек» и «Зомби». Задача «Зомби» заразить как можно большее число людей, а задача людей как можно эффективней убежать от них. Целевой функцией здесь выступило значение «Средней жизни людей». Варьируемым параметром была скорость «Зомби».

Метод Монте-Карло

Метод Монте-Карло является численным методом для решения математических задач при помощи моделирования случайных величин. Данный метод можно применить в большом круге областей: в промышленности для моделирования различных изменяющихся процессов; в физике, в химии, в материаловедении для моделирования различных явлений и поиска оптимальных составов; в области игр для моделирования искусственного интеллекта; в финансовой области для вычисления финансовых инструментов. Метод Монте-Карло применим, практически, в любой области.

При решении задачи оптимизации, метод заключается в том, что для целевой функции случайным образом генерируются набор значений, на основе которых вычисляется значение заданной функции. Лучшее значение по заданному критерию считается оптимальным.

Алгоритм поиска состоит в следующем:

1) задаются границы для параметров задачи и максимальное количество итераций;

2) с помощью независимого распределения необходимо выбрать значения параметров и рассчитать значение целевой функции;

3) если значение целевой функции удовлетворяет условию оптимизации, то его необходимо запомнить;

4) выполнить еще одну итерацию и сравнить полученное значение целевой функции с ранее рассчитанной функцией. Запомнить удовлетворяющее значение;

5) повторять с пункта 2 до тех пор, пока не будет выполнено условие по ограничению количества итераций.

Полный перебор

Полный перебор – это математический метод, используемый для нахождения какого-либо решения путем перебора всевозможных решений из заданной области. Этот метод относится к классу методов решения перебора всех вариантов. Любая задача NP класса может быть решена этим способом. Сложность поиска зависит от всего возможного количества решений исходной задачи. Если пространство решений достаточно велико, то на поиск решения могут уйти достаточно большое количество времени (от нескольких часов до нескольких сотен лет).

Ввиду того, что количество всевозможных решений прикладных задач имеет огромное количество всевозможных решений, метод перебора практически не применяется, разве что для взлома шифров. Иногда использование данного метода оправдано, когда комбинация исходных данных мала.

В задаче оптимизации метод перебора используется в случае необходимости провести расчет с небольшим количеством заданных параметров. При этом данный алгоритм будет более эффективен, чем алгоритмы смешанного поиска.

Описание алгоритма:

1) задаются границы для параметров задачи;

2) составляются всевозможные комбинации параметров задачи;

3) выполнить расчет целевой функции с полученными параметрами и выбрать удовлетворяющее задаче оптимизации решение.

Метод роя частиц

Основная идея метода роя частиц (Particle swarm optimization – PSO) состоит в математическом моделировании поведения роя (стаи) животных в поисках пищи [1, 6]. Данный алгоритм представляет собой метаэвристическую оптимизацию. Как только одна особь из роя увидит путь к цели, остальные особи быстро последуют его примеру. Примерами такого поведения является слет птиц к корму, стая рыб и т. п.

Каждый член стаи рассматривается как частица в пространстве со своими координатами и скоростью движения. Частица, двигаясь по пространству, запоминает координаты наилучшего положения, в котором целевая функция достигала необходимого значения. Так же, каждый член стаи обменивается информацией о «хороших» позициях и использует эту информацию для корректировки своего положения и скорости. На каждой итерации, каждая частица использует прошлый опыт для поиска своего решения поставленной задачи.

Для обмена информацией между членами стаи существует несколько способов. Можно использовать расстояние, так как информация от ближайших соседей порой не обладает какой-то ценностью. Оптимальной идеей будет обмениваться информацией со случайными частицами.

Процедура поиска оптимума заканчивается при достижении максимального числа итераций. В качестве оптимального решения используется наилучшее решение среди всех частиц.

Алгоритм поиска оптимального значения методом роя частиц заключается в следующем:

1) задается количество частиц в стае, $Nl_{\min}$, $Nl_{\max}$ – параметры выбора «соседей» в стае, N –

максимальное число итераций, ω – весовой коэффициент инерции, α и β для вычисления скорости;

2) формируется стая. Положить число итераций $k = 0$. Задать позиции частицам используя равномерный закон распределения $x_i^{j,0} = R[a_i, b_i]$ (1). Положить начальные скорости равными нулю $v^{j,0} = 0$ (2);

3) для каждой частицы найти случайное число Nl_j соседей при помощи равномерного распределения на отрезке $[Nl_{\min}, Nl_{\max}]$, среди них найти частицу с номером n_j и позицией $\hat{x}^{n_{j,k}}$, которая соответствует заданному оптимизационному значению. Наилучшую позицию запомнить как $\hat{x}^{j,k}$;

4) для каждой частицы в стае найти скорость и положение на следующей итерации $v^{j,k+1} = \omega v^{j,k+1} + \alpha r_1 \left(\hat{x}^{j,k} - x^{j,k}\right) + \omega\beta r_2 \left(\hat{x}^{n_{j,k}} - x^{j,k}\right)$ (3), $x^{j,k+1} = x^{j,k} + v^{j,k+1}$ (4), где $v^{j,k}, x^{j,k}$ – скорость и положение частицы с номером j на k-ой итерации, r_1 и r_2 – случайные параметры, заданные нормальным законом распределения на отрезке [0, 1]. Если $f\left(x^{j,k+1}\right) < f\left(\hat{x}^{j,k}\right)$ (или $f\left(x^{j,k+1}\right) > f\left(\hat{x}^{j,k}\right)$, в зависимости от оптимизационной задачи), то запомнить новую наилучшую позицию $\hat{x}^{j,k+1} = x^{j,k+1}$ (5), $f\left(\hat{x}^{j,k+1}\right) = f\left(x^{j,k+1}\right)$, (6), $k = k + 1$;

5) проверяется условие выхода. Если $k = N$, то процесс закончить, частицу в стае с оптимальным решением взять как результат. Если $k < N$, то перейти к Шагу 3.

Муравьиные алгоритмы

Муравьиные алгоритмы (Ant colony optimization – ACO) одни из эффективных алгоритмов нахождения оптимального значения искомого параметра в системе [7]. Муравьи – социальные насекомые, которые живут в колонии. Их число в одной колонии может достигать до нескольких миллионов особей и может распространяться на обширные территории. Однако колония не имеет какого-либо централизованного управления, а обмен информацией осуществляется через непрямой обмен информацией, благодаря феромону, испускаемого муравьями в процессе своего движения. Чем больше муравьев пройдет по определенному пути, тем больше концентрация феромонов будет на нем. Описанные принципы лежат в основе рассматриваемых алгоритмов.

Суть подхода заключается в моделировании поведения муравьев, добывающие продовольствие от колонии к источнику питания. Данный алгоритм является метаэвристической оптимизацией.

Изначально муравьиные алгоритмы были использованы для приближенного решения задачи коммивояжера и других аналогичных задач поиска оптимальных маршрутов, но со временем они были расширены на пространство непрерывных чисел. Здесь же будут рассмотрены расширения ACO на непрерывные и дискретно-непрерывные области.

Ant colony optimization for continuous domain (ACO-R)

Идеей алгоритма ACO-R является приращение компонентов вектора варьируемых аргументов, полученных на зависимости от «феромонов» вероятностном выборе компонентов [5]. Это приращение достигается заменой дискретного распределения вероятностей непрерывной функцией (функции плотности вероятности) распределения Гаусса. Алгоритм использует ядро Гаусса для взвешенного суммирования нескольких функций плотности вероятности.

Определим ядро Гаусса как сумму одномерных функций Гаусса (рис. 1):

$$G^i(s) = \sum_{l=1}^{k} \omega_l \, g_l^i(x) = \sum_{l=1}^{k} \omega_l \frac{1}{\sigma_l^i \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\left(s_l^i - \mu_l^i\right)^2}{2\sigma_l^{i\,2}}}, \qquad (7)$$

где k – число функций плотности вероятности, i – измерение, ω_l – весовая функция, μ_l^i – вектор средних значений (вектор математических ожиданий), σ_l^i – вектор дисперсий.

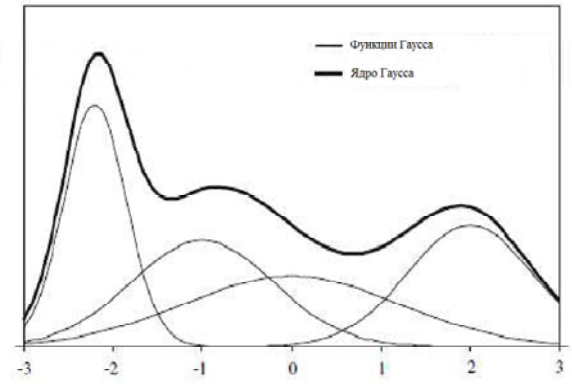


Рис. 1. Функции и ядро Гаусса

Модель «феромонов» ACO-R определяется ранжированием архива решений T (рис. 2). На каждой итерации к архиву решений добавляется N решений и производится упорядочивание с исходным критерием оптимальности. В итоге в архиве будет находиться k решений, в котором худшие решения отсеются. Выше описанная процедура имитирует обновление «феромонов». Целью данной операции является смещение процесса поиска в сторону лучших решений, найденных при оптимизации.

Для удобства описания алгоритма введем массив решений, он же архив решений. В таблице со-

держатся: решения s_l^i согласно их рангу (s_l^i – лучшее решение); ω_l – вес каждой функции плотности вероятности ($\omega_1 \geq \omega_2 \geq \ldots \geq \omega_n$); ядро Гаусса для i-го шага $G^i(s)$.

s_1^1	s_1^2	...	s_1^i	...	s_1^n	ω_1
⋮	⋮	...	⋮	...	⋮	⋮
s_l^1	s_l^2	...	s_l^i	...	s_l^n	ω_l
⋮	⋮	...	⋮	...	⋮	⋮
s_k^1	s_k^2	...	s_k^i	...	s_k^n	ω_k
G^1	G^2	...	G^i	...	G^n	

Рис. 2. Архив решений ACO-R

Для получения решения, муравей на каждом шаге $i = 1 \ldots n$ выбирает значение решения s^i в n-мерной задачи оптимизации.

Сам алгоритм заключается в следующем:

1) для k муравьев случайно генерируются решения $s^i \ldots s^n$;

2) решения упорядочиваются по значениям целевой функции, где $l = 1$ является лучшим рангом;

3) вычисляется вес ω_l для каждого решения, где

$$\omega_l = \frac{1}{qk\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(l-2)^2}{2q^2k^2}}, \qquad (8)$$

где q – коэффициент. При $q \sim 0$ означает, что только функция плотности вероятности лучшего решения была использована для создания нового решения, а при большом q получается более равномерная вероятность;

4) вычисляется вероятность каждого решения

$$p_l = \frac{\omega_l}{\sum_{r=1}^{k} \omega_r}; \qquad (9)$$

5) используя метод рулетки, случайно выбирается одно решение s_l, используя рассчитанную вероятность;

6) полагается, что математическое ожидание $\mu_l^i = s_l^i$;

7) вычисляется дисперсия в i-ом измерении по формуле $\sigma_l^i = \xi \sum_{e=1}^{k} \frac{\left| s_e^i - s_l^i \right|}{k-1}$ (10), где ξ – коэффициент, определяющий испарение «феромонов»;

8) рассчитывается решение, используя генератор случайных чисел и распределение вероятностей, полученное с помощью ядра Гаусса;

9) вычисляется значение целевой функции;

10) полученные решения добавляются в архив решений T;

11) решения упорядочиваются по значениям целевой функции;

12) k оптимальных решений сохраняются в архиве T;

13) если решение удовлетворяет критериям останова, то поиск завершается, иначе переходят на 3 шаг.

Ant colony optimization for mixed variable (ACO-MV)

ACO-MV представляет собой расширение ACO-R на поле дискретных значений задаваемых параметров [4]. Алгоритм поиска оптимального решения не сильно отличается от алгоритма ACO-R. Главным отличием является добавленный алгоритм поиска оптимального значения для дискретных значений. Архив решений отличается от предыдущего алгоритма только тем, что в нем присутствуют данные по дискретным переменным (рис. 3).

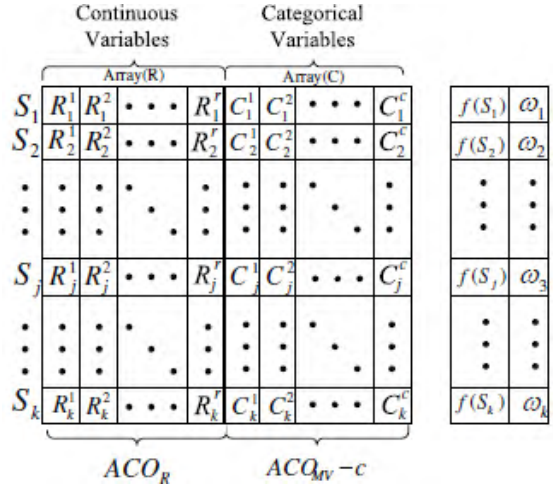


Рис. 3. Архив решений ACO-MV

Измененный алгоритм будет следующим (здесь и далее относится к дискретной части параметров):

1) для k муравьев случайно генерируются решения $s^1 \ldots s^n$;

2) решения упорядочиваются по значениям целевой функции, где $l = 1$ является лучшим рангом;

3) вычисляется вес ω_l для каждого дискретного решения с помощью формулы $\omega_l = \frac{\omega_{jl}}{u_l^i} + \frac{q}{\eta}$ (11), где u_l^i количество решений, использующих v_l^i для i-ой переменной в архиве решений, $v_l^i \in D_i = \left\{ v_l^i, \ldots, v_{c^i}^i \right\}$, η – количество дискретных переменных неиспользованных для поиска оптимума, jl – индекс наилучшего решения, использующий i-ю переменную;

4) вычисляется вероятность каждого решения $o_l^i = \frac{\omega_i}{\sum_{r=1}^{c} \omega_r}$ (12);

5) далее выполняются пункты 5–10 алгоритма ACO-R;

6) после выполняются пункты 3–10 алгоритма ACOR-R для непрерывных параметров;

7) решения упорядочиваются по значениям целевой функции;

8) k оптимальных решений сохраняются в архиве T;

9) если решение удовлетворяет критериям останова, то поиск завершается, иначе переходим на 3 шаг.

Стоит заметить, что при отсутствии дискретных переменных алгоритм ACO-MV становится алгоритмом ACO-R.

Тестовые функции

Для тестирования алгоритмов оптимизации было создано большое количество различных аналитических функций, имеющих множество локальных экстремумов и единственное наименьшее (наибольшее) значение [1]. Основным критерием правильности выполнения алгоритма оптимизации является нахождение глобального наименьшего (наибольшего) значения заданной функции.

В качестве тестовых функций будут рассмотрены следующие функции:

1. функция Растригина:

$$f(x) = 10 + \sum_{i=1}^{d} \left(x_i^2 - 10\cos(2\pi x_i) \right) \qquad (13);$$

2. функция Розенброка:

$$f(x) = \sum_{i=1}^{d-1} \left[\left(1 - x_i\right)^2 + 100\left(x_{i+1} - x_i^2 \right)^2 \right] \qquad (14);$$

3. функция Стиблинского–Танга:

$$f(x) = \sum_{i=1}^{d} \left(x_i^4 - 16x_i^2 + 5x_i \right) \qquad (15);$$

4. функция Экли:

$$f(x) = \sum_{i=1}^{d} \left(\left(10^6\right)^{(i-1)/(d-1)} x_i^2 \right) \qquad (16);$$

5. функция Эггхолдера:

$$f(x) = -(x_1 + 47)\sin\sqrt{\left|\frac{x_0}{2} + (x_1 + 47)\right|} - x_0 \sin\sqrt{\left|x_0 - (x_i + 47)\right|}. \qquad (17)$$

Результаты тестирования

В табл. 1 представлены результаты тестирования алгоритмов для различных тестовых функций для случая 5 независимых переменных (функция Эггхолдера зависит от двух переменных).

В табл. 2 представлены результаты тестирования алгоритмов для различных тестовых функций для случая 20 независимых переменных.

Различия в скорости сходимости объясняются зависимостью алгоритмов от их параметров (испарение «феромона», коэффициента инерции и др.). Использование того или иного алгоритма оптимизации позволяет дополнять друг друга в поисках оптимума. В реальных же задачах наперед неизвестны точные значения оптимума целевой функции, поэтому целесообразно применение различных алгоритмов, каждый из которых может привести к «своему» оптимальному (субоптимальному) решению.

Тестовой задачей ВИП «ОПТИМУС» была задача «Зомби» (рис. 4), описанная выше. Целевая функция зависела от одного параметра – скорости агента. Естественно, ограничения по скорости были в тех рамках, чтобы «зомби» не заразили людей в первые секунды жизни.

Таблица 1

Результаты тестирования для $d = 5$

Функция	Монте-Карло	PSO	ACO-R/ACO-MV	Точное значение	Кол-во итераций
Розенброка	2,124	0,038	0,0	0,0	500
Растригина	3,448	0,0	0,0	0,0	500
Стиблинского–Танга	–127,341	–195,831	–195,831	–195,83085	500
Экли	12,922	0,0	0,0	0,0	500
Эггхолдера	–342,179	–959,640663	–959,640663	–959,6407	500

Таблица 2

Результаты тестирования для $d = 20$

Функция	Монте-Карло	PSO	ACO-R/ACO-MV	Точное значение	Кол-во итераций
Розенброка	96,348	72,169	10,639	0,0	500
Растригина	219,401	5,97	70,056	0,0	500
Стиблинского–Танга	–321,448	–784,323	–698,371	–783,3234	500
Экли	48,964	0,0	2,608	0,0	500

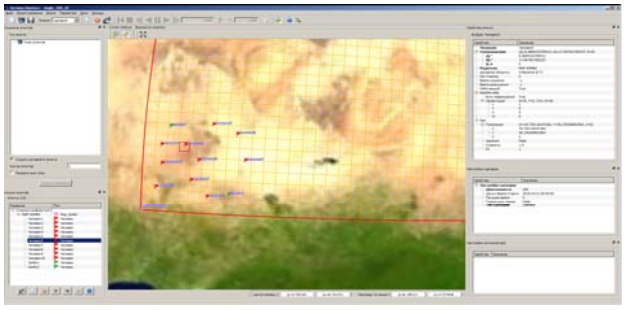


Рис. 4. Начальное положение агентов «зомби» и людей в расчетной области

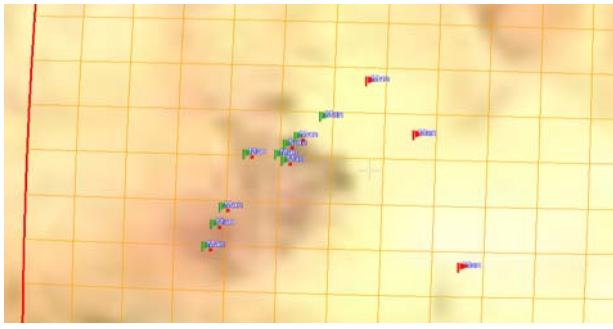


Рис. 5. Движение «зомби» и людей

Проведя расчет, исходя из исходных данных (10 людей, 2 «зомби»), без учета оптимизации средняя продолжительность жизни людей составила 175 секунд модельного времени. При использовании алгоритма оптимизации (PSO), средняя продолжительность жизни уменьшилась до 118 секунд модельного времени.

Заключение

Задачи оптимизации играют большую роль в задачах математического моделирования поведения систем. Используя алгоритмы оптимизации можно сократить дорогостоящие ресурсы компании путем переброса их в другие подсистемы. Метаэвристические алгоритмы позволяют использовать принципы, заложенные природой в математическом моделировании. Порой метаэвристические алгоритмы превосходят в плане сходимости и точности решения точные алгоритмы, а если система не имеет аналитического вида, то метаэвристические алгоритмы будут одним из лучших решений поставленной задачи.

Реализованные в ВИП «ОПТИМУС» алгоритмы оптимизации в дальнейшем будут дорабатываться и совершенствоваться, что может привести к улучшению поиска оптимума. Сейчас эти алгоритмы являются начальным этапом в развитии блока оптимизации на разрабатываемой платформе.

Литература

1. Пантелеев А. В. Метаэвристические алгоритмы поиска глобального экстремума. Москва, 2005.

2. Tianjun Liao, Population-based heuristic algorithms for continuous and mixed discret-continuous optimization problems: Dissertation of doctor of science (engineering). École Polytechnique de Bruxelles, 2012.

3. Zhiming Chen, Shaorui Zhou, Jieting Luo, A robust ant colony optimization for continuous functions // Expert Systems with Applications, 2017. N 81. P. 309–320.

4. Abbas Afshar, Shahrbanoo Madadgar, Ant-Based Algorithms for Optimization of Mixed Variable Domain Engineering Problems; Application to Water Main Pipeline Design.

5. Krzysztof Socha, Marco Dorigo, Ant colony optimization for continuous domains // European Journal of Operational Research, 2008. N 185. P. 1155–1173.

6. Гальченко В. Я., Якимов А. Н. Популяционные метавристические алгоритмы оптимизации роем частиц. Луганск-Черкассы, 2015.

7. Карпенко А. П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Москва, 2014.

8. Коваленко О. В., Крючков И. А., Ежов Д. В., Огородников А. В., Ерошкина И. В., Собанин Д. С., Хочкин Н. И., Варгина Е. Ф., Тихомиров Ю. В., Рыжих А. В., Васильева Е. А., Кондратьев А. Б. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019617157 «Визуализационно-интеграционная платформа для оптимизационного имитационного моделирования и управления системами (ВИП «ОПТИМУС»)», правообладатель – ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ».

РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ КОНСТРУКТОРСКИХ РЕШЕНИЙ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ

Д. А. Мяндин

ФГУП «ВНИИА им. Н. Л. Духова», Москва

Процесс проектирования конструкции устройств автоматики состоит из параллельной разработки каждого отдельного узла, с последующей общей компоновкой. Таким образом, весь процесс проектирования представляет комбинацию сначала нисходящего, а затем восходящего подхода. Это означает, что необходимо сначала определить облик всей конструкции, распределить место под все узлы, проработать все соединения. Затем, спроектировав конструкцию каждого отдельного узла, собрать их вместе, обеспечив при этом завершенную конфигурацию, которая может быть реализована технологически. В то же время она должна отвечать всем предъявляемым требованиям по массе, габаритам, прочности и стойкости к механическому и специальному воздействиям и т. д.

Для решения задач конструирования на сегодняшний день применяются различные программные комплексы и системы автоматизированного проектирования. Машиностроительные САПР (Autodesk AutoCAD, PTC Creo/ProE, SolidWorks, КОМПАС-3D) позволяют разрабатывать 3D-модели устройств и на их основе создавать конструкторскую документацию в соответствии с ЕСКД. Электронные САПР (P-CAD/Altium Designer, Mentor Graphics, MATLAB Simulink) дают возможность разработать электрическую схему устройства, промоделировать ее и создать на ее основе печатную плату. Различные системы конечно-элементного анализа (ANSYS, COMSOL Multiphysics) позволяют оптимизировать механическую прочность конструкции, промоделировать тепловые, электромагнитные режимы работы и подтвердить ее работоспособность при определенных воздействиях.

Электронные модули систем автоматики – это узлы, преимущественно состоящие из печатных плат. Основная трудность проектирования таких устройств заключается в том, что они обладают сложной конфигурацией. Это вызвано тем, что в системах автоматики зачастую невозможно размещение крупных объектов правильной геометрической формы без потерь габаритов и массы. Более того, в компоновке заранее могут быть определены места расположения разъемов и примененных узлов. Таким образом, оставшееся место под электронные модули представляет собой объем сложной конфигурации, в котором сложно судить заранее о принципиальной возможности размещения того или иного узла.

Существующие инструменты компоновки элементов на печатной плате не позволяют учесть все особенности проектирования. Большинство алгоритмов предназначено для поиска такого решения, которое способствует созданию оптимальной трассировки. Кроме того не существует такого алгоритма, который бы за адекватное время решал задачу компоновки и находил оптимальное размещение элементов. В связи с этим, в последнее время широко применяются эвристические алгоритмы, которые хоть и не гарантируют нахождение оптимального решения, но за приемлемое время позволяют получить допустимый результат. Дальнейшим развитием эвристических алгоритмов являются генетические алгоритмы поиска, которые используются для решения задач оптимизации путем случайного подбора, комбинирования и вариации искомых параметров.

Недостаток генетических алгоритмов поиска оптимальной компоновки заключается в том, что для каждого нового размещения необходимо будет заново подбирать набор хромосом, так как найденный ранее способ решения не применим к другим задачам.

Необходимо разработать метод нахождения набора решений, сочетающего в себе вариативные преимущества генетических алгоритмов с возможностью избежать заведомо неприемлемые решения.

Другой важный аспект создаваемой системы заключается в информационной поддержке разработчика на этапе создания конструкции и оформления конструкторской документации. Автоматическое создание списка технических требований на основе принятых решений и используемых элементов с учетом ранее накопленного опыта является важной задачей, сокращающей время оформления конструкторской документации и снижающее число возникающих ошибок.

Размещение электронных компонентов на печатной плате является одним из наиболее ответственных этапов проектирования. Именно на этом этапе обеспечивается собираемость разрабатываемого блока, качество трассировки, электромагнитная совместимость и т. д. Возможность быстрого определения возможных вариантов, их обработка и анализ должны быть неотъемлемой частью используемой системы автоматизированного проектирования. Исходя из реалий современного процесса проектирования систем инициирования, определение облика такой информационной системы, ее разработка и реализация является актуальной задачей.

Алгоритмам размещения различных объектов посвящено множество работ [1–4]. Тем не менее, на сегодняшний день не существует ни одного оптимального решения для автоматизированного размещения элементов на печатных платах, применяемых в системах инициирования. Подобное решение позволило бы не только сократить время проектирования электронных узлов, но и помогло бы проанализировать множество возможных вариантов размещения и выбрать наилучший из них по какому либо определенному критерию.

Анализ современного состояния проблемы

Размещение элементов внутри заданного объема относится к классу NP-сложных. Использование точных методов размещение в процессе проектирования не представляется возможным, так как полный перебор всех возможных комбинаций в настоящее время неосуществим за разумные сроки. Например, предположим, что количество элементов на плате системы инициирования ограничивается числом в 50 единиц (что является относительно скромным числом элементов для размещения исходя из общемировой практики). Известно, что для определения числа возможных перестановок следует использовать формулу факториала. Таким образом, одних лишь комбинаций, отличающихся порядком следования размещаемых элементов, насчитывается около $3 \cdot 10^{64}$, не говоря уже о поворотах элементов, и изменении их взаимного расположения друг относительно друга. Очевидно, что необходимо прибегать к некоторым эвристическим методам размещения, которые способны сократить количество рассматриваемых вариантов и достигнуть пусть и не оптимального, но адекватного результата за ограниченное время.

В работе [1] был рассмотрен гибридный метод, основанный на применении жадных алгоритмов, эволюционно-генетического подхода и многоуровневой технике сведения к задачам меньших порядков. В работе приводится сравнительный анализ работы трех алгоритмов размещения прямоугольников: алгоритм Монте–Карло, генетический алгоритм без редукции и многоуровневый генетический алгоритм с уровнем редукции 2. Эксперимент показал, что наиболее качественный результат компоновки был достигнут с применением генетического алгоритма, который использовал механизм редукции.

В работе [2] предлагается другой гибридный генетический алгоритм для решения задачи планирования сверхбольших интегральных схем, а именно - меметический алгоритм, сочетающий в себе методы глобального и локального поиска для минимизации площади микросхемы. С помощью генетических алгоритмов могут быть найдены относительно качественные решения, но для получения оптимального решения, или близкого к нему, необходимо учитывать специфику задачи.

Альтернативная адаптация используется как метод локального поиска. Получая на входе бинарное дерево в виде обобщенной польской записи, и изменяя хромосому, отвечающую за ориентацию модулей, алгоритм производит локальный поиск экстремума целевой функции.

В заключении отмечается необходимость развития метаэвристического метода, обеспечивающего баланс между генетическими алгоритмами и альтернативными адаптациями для достижения более качественного результата с меньшими вычислительными затратами. Эта необходимость обусловлена особенностями конкретной задачи, которая может быть определена и классифицирована с помощью гибридных метаэвристических методов.

Вместе с генетическими алгоритмами для решения задач размещения разногабаритных топологических блоков могут быть применены итерационные алгоритмы имитации отжига и другие методы размещения с использованием грубой силы. Основное различие между генетическими алгоритмами и алгоритмами имитации отжига заключается в том, что имитация отжига в один момент времени производится с одной конфигурацией размещения, улучшая и оптимизируя ее, в то время как генетический алгоритм оперирует популяцией (набором конфигураций) которые оптимизируются одновременно [3]. Таким образом можно заключить, что имитация отжига хоть и направлена на поиск глобального оптимума, она работает уже с заранее определенной конфигурацией, а генетический алгоритм рассматривает несколько вариантов размещений, исключая попадание в локальный оптимум, и, как следствие, получения не самого лучшего результата.

Известно множество способов описания размещения расположения элементов на печатных платах. Одним из них является метод графов (бинарные, диагональные, горизонтальные деревья), который применяется, как правило, для размещения элементов на регулярных сетках. Тем не менее, для размещения различных по габаритам элементов необходимо разработать простую, но наглядную систему кодировки.

Для решения оптимизационной задачи с помощью генетических алгоритмов используются генетические операторы: кроссинговер и мутация. Кроссинговер предназначен для получения новых популяций (размещений) за счет комбинирования генов максимально приспособленных особей в процессе эволюции. Мутации служат для случайного, спонтанного изменения какого либо гена для исключения вероятности попадания в локальный оптимум. В работе [3] показано использование генетических операторов для изменения дерева размещения за счет поворота поддеревьев, поворота листьев и парной перестановки имен – перекрестный обмен конструкциями одинаковой длины. Поэтому для осуществления парной перестановки имен у обоих родителей обязательно должны быть конструкции одинаковой длины. Причем, как и у алгоритмов симуляции отжига, операторы кроссинговера должны усиливаться с ходом времени, а операции мутации – ослабевать.

В работе [4] предлагается использовать гибридный алгоритм размещения элементов на основе генетического поиска для решения задачи многокритериальной оптимизации СБИС с целью уменьшения временных задержек и обеспечения возможности трассировки. Постановка задачи заключается в поиске оптимального решения размещения элементов с фиксированными расстояниями между рядами, с целью минимизации времени прохождения сигнала. То есть число и расположение допустимых посадочных мест для элементов заранее известно и фиксировано.

Особенности реализации автоматизированной информационной системы поддержки принятия конструкторских решений электронных модулей

Для реализации системы автоматизации проектирования электронных модулей необходимо обладать базой элементов с определенными свойствами: габариты элемента (длина, ширина, высота), габариты посадочного места (длина, ширина), позиционное обозначение, номер ID СПВП, обозначение посадочного места, минимальный отступ от посадочного места и прочие производные данные, такие как площадь элемента/посадочного места и объем элемента.

Кроме того, система должна обладать информацией, уникальной для каждого типа элементов, представляющей собой накопленный опыт проектирования. Например, рекомендуемый тип припоя или необходимость приклеивать определенный корпус перед пайкой.

Также целесообразно реализовать возможность учета варианта формовки и установки элементов на плату (вплотную, с зазором, на прокладку, на клей и т. д.), с последующим подсчетом общей высоты посадочного места с установленным элементом.

На рис. 1 представлен пример исходных данных в виде электрической схемы, посадочных мест и 3-D моделей элементов.

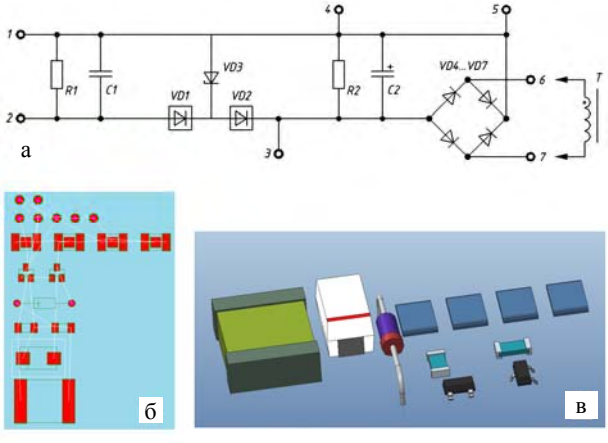


Рис. 1. Пример исходных данных: а – электрическая схема; б – посадочные места для элементов; в – 3D-модели элементов

Внешний вид интерфейса окна просмотра решений представлен на рис. 2. В нем можно выполнять предварительную сортировку элементов по различным критериям, указывать максимальные габариты будущего блока, выбирать минимальный допустимый зазор между элементами. Также интерфейс содержит кнопки запуска решения, просмотра возможных вариантов, вывода сравнительного графика и импорта выходного файла для передачи решения в машиностроительный САПР. Имеется окно предварительного просмотра компоновки. При использовании программы пользователь может вручную перемещать элементы и устанавливать их в определенные координаты.

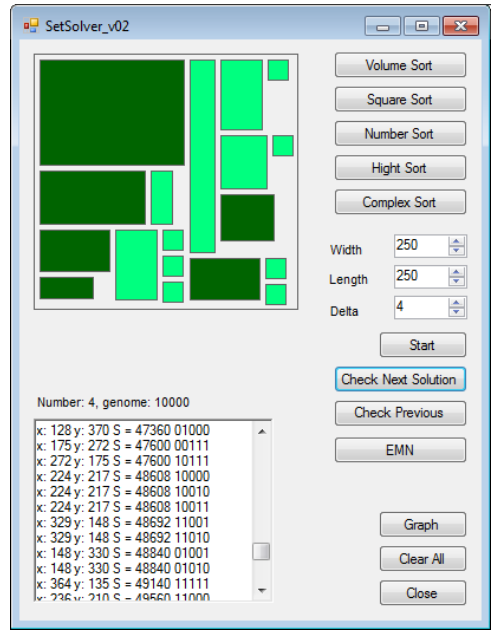


Рис. 2. Интерфейс окна просмотра решений

На рис. 3 представлены возможные варианты компоновок и их сравнительная гистограмма. Как видно, система предоставляет набор различных решений, указывает наилучшие из них по определенным критериям и позволяет пользователю самому выбрать подходящий для его задачи форм-фактор.

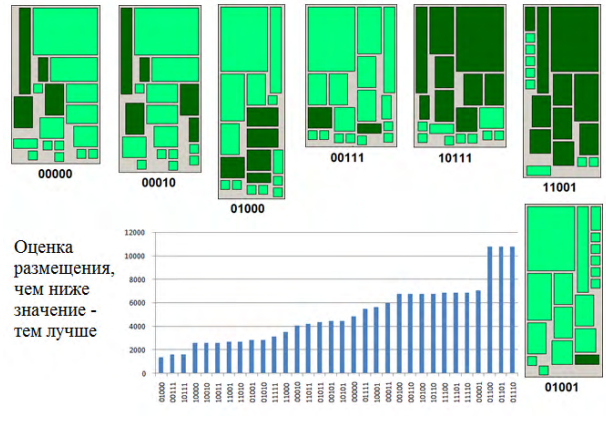


Рис. 3. Варианты компоновок и сравнительная гистограмма

Пример импорта выбранной компоновки в электронный и механический САПР представлен на рис. 4.

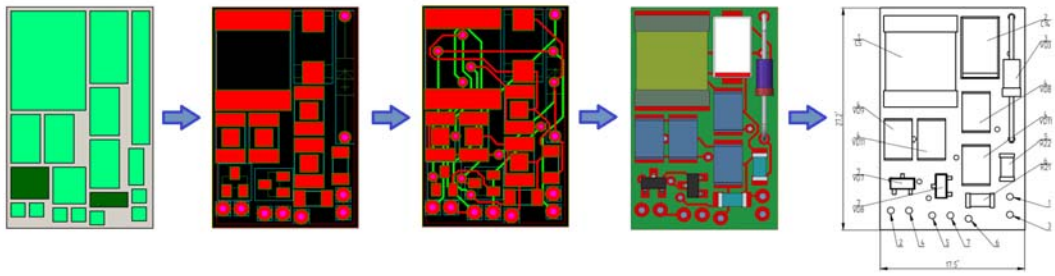


Рис. 4. Импорт выбранной компоновки в электронный САПР, создание проводящего рисунка, импорт в механически САПР и создание чертежа

Заключение

Таким образом, была разработана система, позволяющая генерировать различные наборы решений, оценивать их и предлагать наилучшее. Быстродействие алгоритма позволяет получать одно решение за 1,5 минуты при размещении 500 элементов произвольной формы с плотностью до 92 %. Количество различных решений определяется пользователем.

Помимо своей основной функции система позволяет реализовывать ручное перемещение, искать альтернативное место для выбранного компонента или устанавливать его в определенную координату, создавать различные наборы решений и количественно оценивать их качество, передавать данные по любому решению для дальнейшего проектирования в другие САПР.

В настоящий момент ведется разработка автоматизированного генератора списка технических требований на основе используемых элементов и принятых решений.

Литература

1. Старостин Н. В., Силаев А. Н., Седых И. О. Многоуровневый эволюционно-генетический метод размещения прямоугольников // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского, 2009. № 5. С. 163–168.

2. Ерошенко И. Н. Меметический алгоритм планирования СБИС // Известия ЮФУ. Технические науки. С. 55–62.

3. Ковалев А. В., Бушин С. А. Эволюционный метод размещения разногабаритных блоков СБИС // Известия ЮФУ. Технические науки. С. 45–53.

4. Лисяк М. В., Лежебоков А. А. Алгоритм многокритериального размещения элементов СБИС // Известия ЮФУ. Технические науки. С. 70–75.

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ РАБОЧЕЕ МЕСТО ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ПЕРЕНОСА ИНФОРМАЦИИ МЕЖДУ АВТОМАТИЗИРОВАННЫМИ СИСТЕМАМИ, ОБРАБАТЫВАЮЩИМИ ИНФОРМАЦИЮ РАЗЛИЧНОГО УРОВНЯ КОНФИДЕНЦИАЛЬНОСТИ

В. О. Носков, Д. Г. Аннин, А. П. Афонин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Несмотря на стремительное развитие информационных технологий, для некоторых автоматизированных систем (АС) единственным возможным каналом обмена информацией остается так называемый «воздушный зазор», то есть канал передачи информации через носители информации [1]. Если, при этом, в АС обрабатывается конфиденциальная информация, то становится актуальной задача предотвращения утечки при переносе информации. В основном для этого используются промежуточные АС, состоящие из одного или нескольких автоматизированных рабочих мест (АРМ), в которых используются внешние носители информации, предназначенные для переноса информации из одной АС в другую АС. Однако при этом риски утечки информации, связанные с ошибками пользователя («человеческий фактор») сохраняются. Поскольку АС, обрабатывающие информацию различного уровня конфиденциальности, широко используются на практике, разработка способа организации специализированного АРМ для обмена информацией между такими АС является актуальной задачей.

Описание способа организации автоматизированного рабочего места

При организации АРМ для переноса информации между автоматизированными системами, обрабатывающими информацию различного уровня конфиденциальности, основной задачей является реализация системы защиты информации на таком АРМ. Поскольку АРМ предназначается только для переноса информации, причем перенос информации может выполняться между АС, обрабатывающими информацию различного уровня конфиденциальности, АРМ является изолированным, то есть не подключенным к каким-либо локальным вычислительным сетям (ЛВС) [2]. Основными информационными потоками взаимодействия с АРМ являются ввод/вывод информации через внешние носители и (или) накопители (Н/Н) информации.

Возможными угрозами безопасности информации, передаваемой через АРМ, в части несанкционированного доступа к информации являются:

- нарушение конфиденциальности информации при ее вводе/выводе в/из АРМ с/на внешние Н/Н информации;
- нарушение доступности и целостности информации за счет использования вредоносного программного обеспечения (ПО).

Для предотвращения нарушения конфиденциальности информации при ее вводе/выводе в/из АРМ с/на внешние Н/Н информации на АРМ реализуются следующие мероприятия:

- операционная система (ОС) устанавливается на встроенный Н/Н информации, заблокированный для записи («только на чтение»);
- дискреционно ограничиваются права пользователя в ОС АРМ так, что из возможных действий у него остается только просмотр содержимого внешних Н/Н информации и перемещение/копирование информации с одного внешнего Н/Н информации на другой внешний Н/Н информации;
- в АРМ настраивается мандатное разграничение доступа таким образом, что пользовательским учетным записям устанавливаются сеансы доступа, соответствующие уровням конфиденциальности переносимой информации;
- служебная информация, создаваемая ОС в процессе функционирования АРМ, размещается в оперативной памяти;
- уровень конфиденциальности используемого сеанса равен высшему уровню конфиденциальности внешних Н/Н информации;
- уровень конфиденциальности внешнего Н/Н информации - передатчика информации не превышает уровень конфиденциальности Н/Н информации – приемника информации.

Для предотвращения нарушения доступности и целостности информации за счет использования вредоносного ПО на АРМ используется антивирусное средство.

Пример реализации автоматизированного рабочего места

Способ организации АРМ рассмотрим на следующем примере. Пусть имеются две автоматизированные системы: АС1 и АС2, обрабатывающие информацию различного уровня конфиденциальности. Необходимо организовать перенос информации ме-

жду АС1 и АС2. При этом количество уровней конфиденциальности переносимой информации равно двум, АРМ входит в состав АС3.

Исходя из постановки задачи, схема организации АРМ для переноса информации выглядит следующим образом (рис. 1). Стрелками отмечены информационные потоки ввода/вывода информации в/из АРМ.

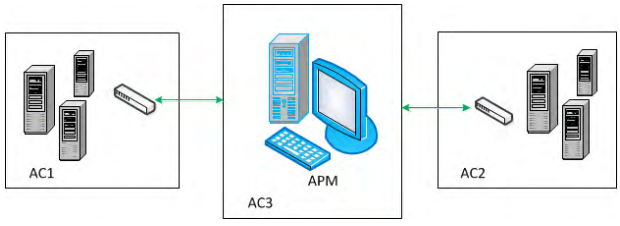


Рис. 1. Схема организации АРМ для переноса информации

В качестве аппаратного обеспечения АРМ используются:

1) системный блок;
2) монитор;
3) клавиатуру;
4) манипулятор типа «мышь».

В качестве внешних Н/Н информации будем использовать USB-flash накопители.

В качестве средств защиты информации на АРМ будем использовать:

1) АПМДЗ «Максим-М1» с microSD-картой;
2) ОС Astra Linux SE;
3) антивирусное средство Dr.Web Enterprise Security Suite.

Выполняются основные настройки средств защиты информации на АРМ:

1) в АПМДЗ «Максим-М1» включим режим загрузки ОС только с microSD-карты;

2) в АПМДЗ «Максим-М1» для microSD-карты включим режим «только на чтение»;

3) в ОС Astra Linux SE для пользователя создадим учетную запись с двумя сеансами, соответствующими уровням конфиденциальности переносимой информации;

4) в ОС Astra Linux SE для учетной записи пользователя дискреционно ограничим права: оставим возможность выполнять вход только в графический интерфейс своей учетной записи; заблокируем все кнопки и ярлыки, кроме кнопки выхода из сеанса и завершения работы; из возможных действий в ОС оставим только просмотр содержимого внешних Н/Н информации и перемещение/копирование информации с одного внешнего Н/Н информации на другой внешний Н/Н информации.

Перенос информации на АРМ состоит из следующих этапов:

1) пользователь включает АРМ, проходит процедуры идентификации/аутентификации на уровне АПМДЗ и ОС;

2) для переноса информации из АС1 в АС2 пользователь выбирает сеанс, равный высшему уровню конфиденциальности внешних Н/Н информации;

3) пользователь вставляет Н/Н информации АС1 и Н/Н информации АС2 в АРМ (при подключении Н/Н информации происходит автоматическая проверка на вредоносное ПО антивирусным средством), убедившись, что уровень конфиденциальности Н/Н информации АС1 не превышает уровень конфиденциальности Н/Н информации АС2;

4) пользователь переносит информацию из Н/Н информации АС1 на Н/Н информации АС2;

5) пользователь отключает Н/Н информации обоих АС и выходит из сеанса, либо завершает работу на АРМ.

Перенос информации из АС2 в АС1 выполняется аналогично.

Для администрирования АРМ администратор в настройках АПМДЗ «Максим-М1» включает режим записи для microSD-карты, который автоматически отключается после перезагрузки АРМ.

Заключение

Таким образом, с помощью предлагаемого способа организации АРМ возможен перенос информации между автоматизированными системами, обрабатывающими информацию различного уровня конфиденциальности. При этом вероятность нарушения конфиденциальности, целостности и доступности информации в результате непредумышленных действий пользователя при переносе информации сведена к минимуму.

Литература

1. Гирфанова Л. Р. Системы автоматизированного проектирования изделия и процессов. Уфа, 2014. С. 45.

2. Современные технологии защиты от утечки конфиденциальной информации [Электронный ресурс] / Диалог Наука, 2010. Режим доступа: https://dialognauka.ru/press-center/article/4761/, свободный.

АСПЕКТЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КИБЕРБЕЗОПАСНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

А. Ю. Павлин, Н. Н. Акимов, А. В. Жулин[1]

Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю. Е. Седакова», г. Нижний Новгород
[1]НГТУ им. Р. Е. Алексеева, г. Нижний Новгород

Вопросам обеспечения безопасности автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) в настоящее время уделяется пристальное внимание на государственном уровне [1]. Например, указ Президента РФ № 620 от 22.12.2017 г. «О совершенствовании государственной системы обнаружения, предупреждения и ликвидации последствий компьютерных атак на информационные ресурсы РФ».

Разработаны нормативно-методические документы в области информационной безопасности, к которым относятся методические документы государственных органов России и стандарты информационной безопасности.

К методическим документам государственных органов России относятся:

− доктрина информационной безопасности РФ;

− приказы и руководящие документы федеральной службы по техническому и экспортному контролю (ФСТЭК) (Гостехкомиссии России);

− приказы федеральной службы безопасности;

Стандарты информационной безопасности, среди которых выделяют:

− международные стандарты;

− государственные (национальные) стандарты РФ;

− рекомендации по стандартизации;

− методические указания.

Авторы документа «Доктрина информационной безопасности Российской Федерации» [2], введенной Указом Президента РФ от 05.12.2016 № 646 учли текущую ситуацию в мире информационных технологий и не обошли стороной проблему компьютерных атак, направленных на промышленную сферу [3].

К приоритетам РФ в сфере информационной безопасности отнесено:

– «Обеспечение устойчивого и бесперебойного функционирования информационной инфраструктуры, в первую очередь критической информационной инфраструктуры Российской Федерации и единой сети электросвязи Российской Федерации, в мирное время, в период непосредственной угрозы агрессии и в военное время»;

– «Развитие в Российской Федерации отрасли информационных технологий и электронной промышленности, а также совершенствование деятельности производственных, научных и научно-технических организаций по разработке, производству и эксплуатации средств обеспечения информационной безопасности, оказанию услуг в области обеспечения информационной безопасности»;

– «Содействие формированию системы международной информационной безопасности, направленной на противодействие угрозам использования информационных технологий в целях нарушения стратегической стабильности, на укрепление равноправного стратегического партнерства в области информационной безопасности, а также защиту суверенитета Российской Федерации в информационном пространстве».

Анализ нормативной базы по кибербезопасности АСУ ТП атомной электростанции (АЭС) показал, что существующие стандарты в рамках принципов и подходов к информационной безопасности можно считать результатом доработки существующих методик, учитывающих специфику АСУ ТП. Сами же стандарты можно разделить на общие стандарты, учитывающие специфику промышленных систем, в частности наличие таких элементов, как автоматизированная система управления и различные датчики, и отраслевые стандарты, учитывающие особенности конкретной отрасли [4].

Современные АСУ ТП представляют собой сложные компьютеризированные системы, отличающиеся большой разветвленностью, большим числом и разнотипностью оборудования, сложностью алгоритмов управления. Многообразие функций АСУ ТП, интегрированность с объектом управления, очевидно, приводит к многообразию угроз и потенциальной опасности при нарушении кибербезопасности АСУ ТП АЭС. Вместе с развитием АСУ ТП развиваются и совершенствуются угрозы кибербезопасности, устанавливаются новые требования по защищенности АСУ ТП:

– нормативная документация РФ – Приказ ФСТЭК № 31 от 14 марта 2014 г., федеральный закон № 187 от 26 июля 2017 г., Приказ ФСТЭК № 235 от 21.12.2017 г., Приказ ФСТЭК № 239 от 25.12.2017 г.;

– стандарты международной электротехнической комиссии (МЭК/IEC) – IEC 61513:2011, IEC 60880:2006, IEC 62645:2014, IEC 62859:2016, проект IEC 63096;

– документы международного агентства по атомной энергии – NSS 17, NST036, NST037, NST038, NST045, NST047.

Основное внимание предлагается уделить методологии определения рисков от возможного намеренного вмешательства в систему управления с целью нанесения вреда для потенциально опасного промышленного объекта.

В настоящее время предложен ряд подходов к оценке рисков информационных систем, используемых в промышленности, в том числе:

– оценка критических эксплуатационных угроз и уязвимостей (OCTAVE – Operationally Critical Threat and Vulnerability Evaluation) [5];

– метод анализа и управления рисками Центрального агентства по вычислительной технике и телекоммуникациям (CRAMM – Central Computer and Telecommunications Agency Risk Analysis and Management Method) [6];

– консультативный, целевой и бифункциональный анализ рисков (COBRA – Consultative, Objective and Bifunctional Risk Analysis [7];

– консультативный и целевой анализ рисков (CORAS – Consultative and Objective Risk Analysis) [8, 9];

– основанная на модели, методология оценки рисков для систем, критичных по безопасности (model-based risk assessment methodology for security-critical systems).

Применительно к опасным промышленным объектам, к которым относится АЭС, целесообразно рассматривать проблемы безопасности как проблемы надежности сложных человеко-машинных систем по отношению к здоровью и жизни людей, состоянию окружающей среды, материальному ущербу. Проблема кибербезопасности может рассматриваться как частный (специфический) случай проблемы обеспечения надежности/безопасности объектов. Таким образом, логично применить известные методы для качественного и количественного анализа кибербезопасности из теории надежности, такие как «Анализ дерева событий», представленный на рис. 1 и «Анализ дерева неисправностей», представленный на рис. 2.

Следует отметить, что поскольку срок службы энергоблока АЭС составляет более 30 лет с возможностью его продления, а также оборудование и система управления подвергаются периодической замене и модификации, то анализ защищенности от киберугроз необходимо проводить на всем жизненном цикле системы.

Несмотря на то, что современная АЭС является изолированной от внешнего мира системой и содержит большой набор средств защиты, как любая сложная система имеет конечную вероятность возникновения нештатных ситуаций в случае преднамеренного воздействия на нее. Комплексная система безопасности должна обеспечивать защиту всех элементов АСУ ТП и не приводить к снижению уровня надежности, установленного в техническом задании на систему. Для решения данной проблемы необходимо совершенствование нормативной базы, совершенствование культуры безопасности и продолжение проведения исследований в данном актуальном направлении.

Рис. 1. Структура дерева событий применительно к оценке кибербезопасности

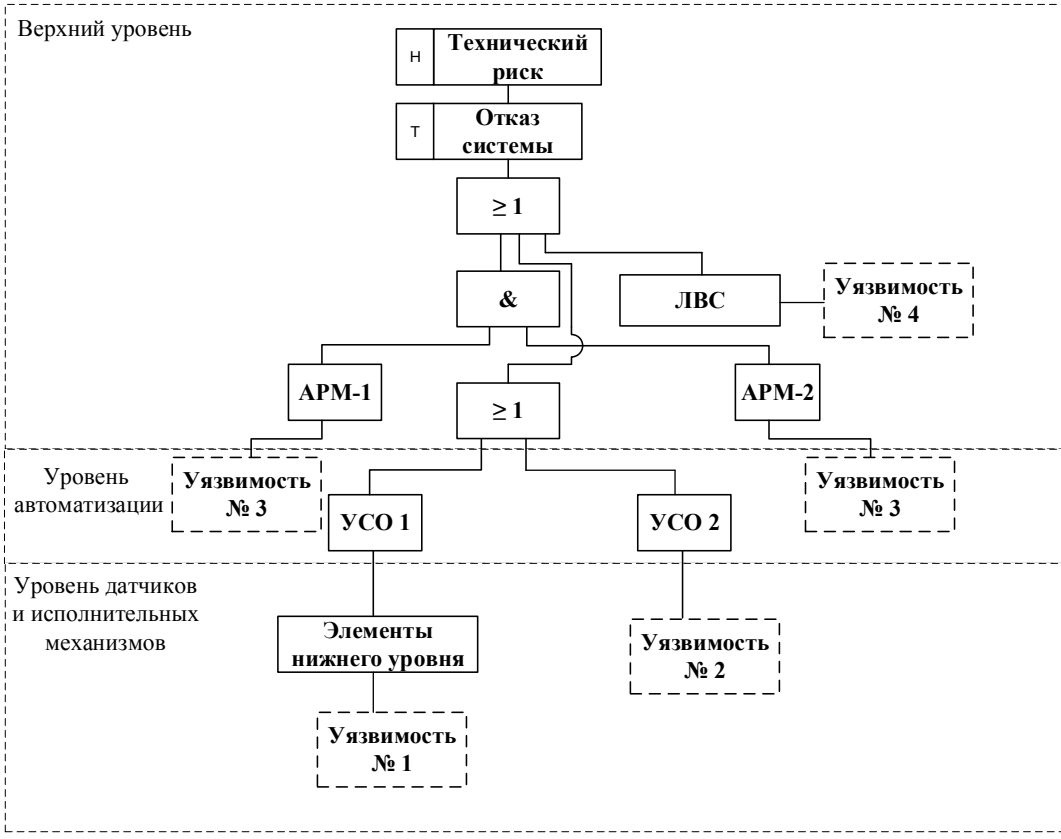


Рис. 2. Структура дерева неисправностей применительно к оценке кибербезопасности: АРМ – автоматизированное рабочее место; ЛВС – локальная вычислительная сеть; УСО – устройство связи с объектом

Литература

1. Дмитриев С. М., Акимов Н. Н., Кольцов В. А. Аспекты обеспечения кибербезопасности АСУ ТП АЭС // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2017. № 8 (15). С. 7–13.

2. «Доктрина информационной безопасности Российской Федерации», введенная Указом Президента РФ от 05.12.2016 № 646.

3. Анализ положений Доктрины информационной безопасности РФ. [Электронный ресурс] Режим доступа: https://www.securitylab.ru/analytics/485289.php

4. Душа И. Ф., Зуйков А. В., Духвалов А. П. Информационная безопасность АСУ ТП КВО: нормативно-правовое обеспечение, текущая ситуация // Информационная безопасность. 2014. № 10. С. 100–104.

5. Alberts C, Dorofee A, Stevens J,Woody C. Introduction to the OCTAVE approach. Software Engineering Institute; 2003.

6. Yazar Z. A qualitative risk analysis and management tool – CRAMM. SANS Institute; 2002.

7. RiskWorld. <http://www.riskworld.net/>. [accessed 16.10.15]. RISI. Industry attacks growing. October 14. <http://www.isssource.com/risi-industry-attacks-growing>; 2013 [accessed 23.01.15].

8. Aagedal J., Braber D., Dimitrakos T., Gran B., Raptis D., Stolen K. Model-based risk assessment to improve enterprise security. In: Proceedings of the sixth international enterprise distributed object computing conference. 2002. P. 51–62 EDOC'02.

9. Stolen K., den Braber F., Dimitrakos T., Fredriksen R., Gran B., Houmb S., et al. Model-based risk assessment – the CORAS approach. In: 1st iTrust workshop. 2002.

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ ДИАГНОСТИКИ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МНОГОКАНАЛЬНОЙ ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКИ

Т. А. Панкова, В. Д. Исаев, В. Н. Лотов

Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю. Е. Седакова», г. Нижний Новгород

Введение

Данная работа посвящена разработке комплекса программного обеспечения системы диагностики параметров лазерного излучения, входящей в состав многоканальной лазерной установки.

Лазерная установка (ЛУ) строится по модульному принципу, подразумевающему объединение нескольких оптических каналов в один самостоятельный модуль с последующим объединением таких модулей в единую установку. Включение и настройка всей лазерной установки, юстировка оптических каналов, проверка готовности к эксперименту и его проведение вручную становится физически невозможным, так как время подготовки одного канала к эксперименту силами нескольких человек может измеряться часами. Использование систем автоматического управления для автоматизации всех процессов подготовки и проведения эксперимента в таких условиях становится жизненно необходимым для работы установки.

Информационно-управляющая система (ИУС) лазерной установки предназначена для управления установкой в автоматическом и автоматизированном режимах, оперативного сбора информации об ее работоспособности, реализации комплексной защиты персонала и установки, сбора, хранения и предварительной обработки результатов экспериментов, обеспечения сервисного обслуживания установки.

ИУС ЛУ включает в себя несколько подсистем, одна из которых система диагностики параметров лазерного излучения (СДПЛИ).

СДПЛИ предназначена для сбора и обработки данных о параметрах лазерного излучения нескольких оптических каналов в ходе подготовки и проведения экспериментов.

Система диагностики параметров лазерного излучения

СДПЛИ разработана как многоуровневая система и включает в себя:

– верхний уровень управления – уровень центрального пульта управления установки (ЦПУ), предназначенный для организационного, информационного и технического обеспечения всех работ, проводимых на установке в штатных режимах и аварийных ситуациях. При проведении эксперимента на АРМ ЦПУ задается шаблон эксперимента, отслеживаются этапы подготовки всех систем, инициируется запуск автоматического проведения эксперимента, отслеживаются аварийные события и принимаются решения о дальнейшем проведении или отмене эксперимента;

– средний уровень управления – уровень местных пультов управления (МПУ). При проведении эксперимента на АРМ МПУ СДПЛИ осуществляется подготовка системы к эксперименту, в зависимости от шаблона эксперимента. Так же на МПУ СДПЛИ проводятся работы при пуске-наладке и тестировании оборудования.

– нижний уровень управления – уровень систем автоматического управления (САУ) технологических объектов. На САУ СДПЛИ происходит сбор необходимой информации о состоянии технологического оборудования, передача данной информации на МПУ СДПЛИ, управлением технологическим оборудованием в зависимости от полученных команд с МПУ СДПЛИ.

Технологическое оборудование СДПЛИ:

– блоки ввода-вывода;

– шаговые двигатели;

– моторизованные оправы зеркал;

– регистратор энергетического контраста;

– блоки сменных светофильтров;

– ФПЗС-камеры (фотоприбор с зарядовой связью);

– джоульметры;

– источник бесперебойного питания.

Из основного светового канала отводится часть излучения на регистрирующее оборудование. Для точного наведения излучения на ФПЗС-камеры, регистратор энергетического контраста и джоульметры проводится юстировка диагностического канала. Юстировка производится с помощью моторизованных оправ зеркал и шаговых двигателей по алгоритмам юстировки в автоматическом режиме или по командам оператора в ручном. Для управления технологическим оборудованием одного канала реализовано более 100 команд.

В качестве результатов эксперимента сохраняются следующие данные:

– изображения с камер после юстировки;

– изображения с камер во время эксперимента;

– энергия во время эксперимента;

– энергетический контраст;

– изображения с камер после эксперимента;

– используемые светофильтры и их коэффициенты пропускания;

– всего ~15 Мбайт информации сохраняется в каждом эксперименте для одного канала.

Для функционирования СДПЛИ был разработан «Программный комплекс управления системой диагностики параметров лазерного излучения многоканальной лазерной установки».

Программный комплекс управления СДПЛИ многоканальной лазерной установки включает в себя:

– прикладное программное обеспечение (ППО) ЦПУ СДПЛИ;

– ППО МПУ СДПЛИ;

– ППО САУ СДПЛИ.

Структурная схема программного комплекса управления СДПЛИ представлена на рис. 1.

Требования к компонентам программного комплекса управления СДПЛИ

Требования к ППО ЦПУ СДПЛИ:

– определение условий и порядка проведения всех видов работ на установке;

– контроль основных показателей и координацию работы систем установки;

– сбор и предварительная оценка результатов проведенного эксперимента и состояния оборудования установки;

– обработка предупредительной и аварийной информации, выполнение аварийных защит с участием персонала и в автоматическом режиме;

– хранение информации о проведении экспериментов и регламентных работ, проводимых на комплексе;

– управление механизмами резервного копирования и восстановления;

– предоставление данных по запросу от других подсистем, в соответствии с техническими решениями;

– контроль исправности аппаратных и программных средств СДПЛИ;

– ведение системных журналов работы.

Требования к ППО МПУ СДПЛИ:

– сбор, накопление, обработка, хранение технологической информации;

– сбор, обработка и вывод сигнализации о предупредительных и аварийных ситуациях;

– отображение технологического процесса системы и его результатов в удобной форме;

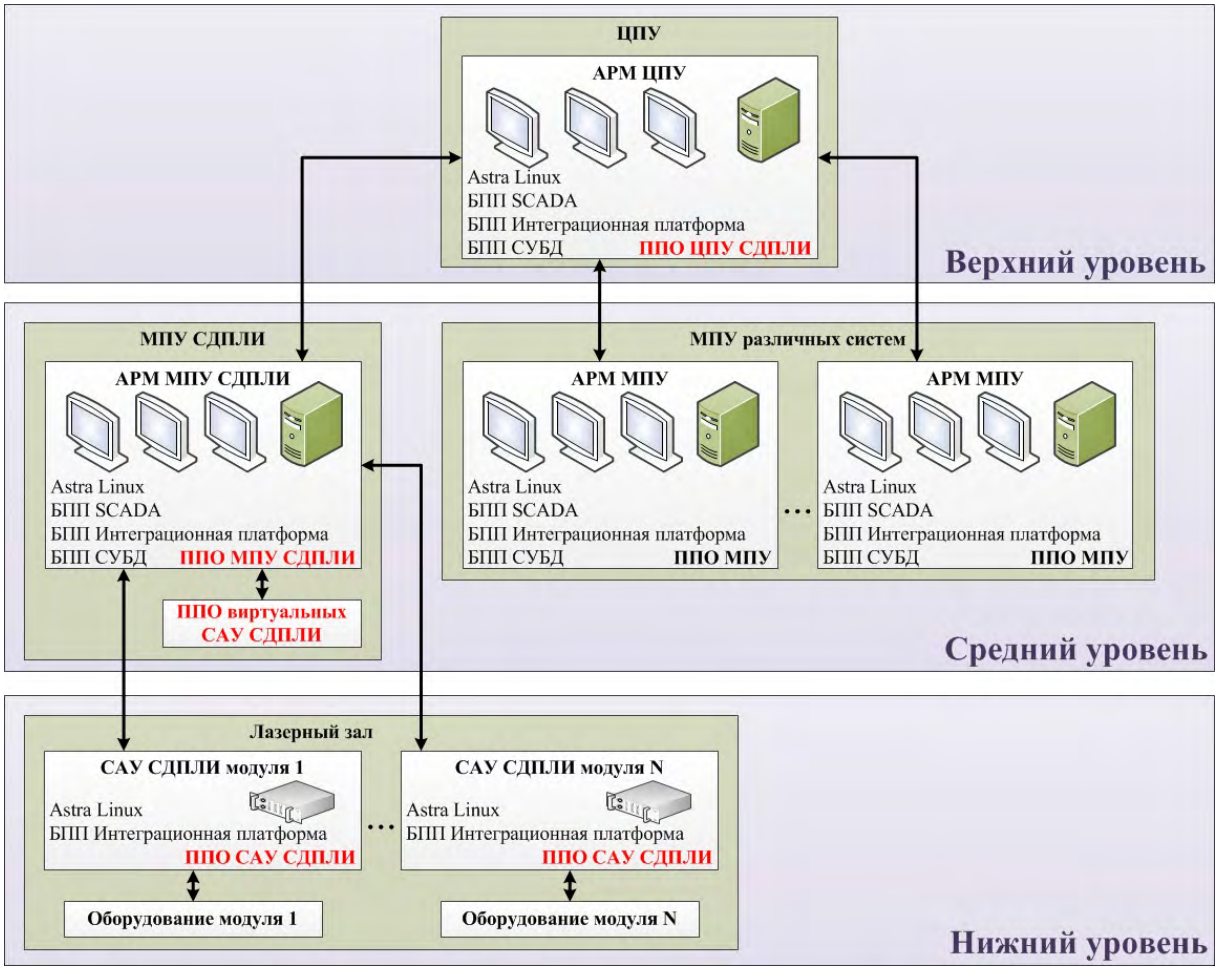


Рис. 1. Структурная схема программного комплекса управления системой диагностики параметров лазерного излучения многоканальной лазерной установки

– передача информации в ЦПУ;

– проведение самодиагностики;

– выдача по запросам информации о состоянии системы и режиме работы;

– принятие и выполнение команд с ЦПУ;

– управление ходом технологического процесса по команде оператора с ЦПУ;

– управление контроллерами нижнего уровня СДПЛИ с помощью команд и загрузки файлов;

– синхронизация времени между МПУ и технологическим оборудованием;

– обеспечение разграничения прав доступа различных пользователей;

– МПУ должны функционировать как в автономном режиме, так и в составе ИУС.

Требования к ППО САУ СДПЛИ:

– прием команд управления от верхнего уровня СДПЛИ ЛУ по интерфейсу интеграционной платформы;

– передача данных (в том числе изображений с камер) на верхний уровень СДПЛИ по интерфейсу интеграционной платформы;

– выполнение алгоритмов управления САУ по полученной команде в ручном режиме или самостоятельно в автоматическом режиме;

– проверка допустимости выполнения команд управления в зависимости от текущего состояния системы и оборудования;

– выдача команд управления технологическим оборудованием и контроль их выполнения;

– осуществление непрерывной диагностики состояния подключенного технологического оборудования и самодиагностики САУ;

– сбор данных, в том числе изображений камер, с подключенного технологического оборудования, как по команде, так и при проведении эксперимента;

– ведение журнала выполненных действий, архива изображений результатов юстировки, эталонов изображений БЗ и ДЗ;

– обработка, анализ полученных изображений без участия оператора.

Для обеспечения требований, предъявляемых к ЦПУ, МПУ и САУ были разработаны и согласованны с Заказчиком:

– перечень возможных статусов канала, а также их цветовая индикация на видеокадрах;

– перечень задаваемых параметров;

– перечень управляющих команд и правила блокировки команд в зависимости от состояния канала и состояния смежных систем;

– перечень параметров, которые являются результатом эксперимента;

– перечень параметров, которые необходимо сохранять от эксперимента к эксперименту;

– перечень видеокадров, обеспечивающих возможность просмотра необходимой информации и управление оборудованием;

– алгоритмы отработки аварийных и внештатных ситуаций;

– перечень технологического оборудования;

– алгоритмы управления оборудованием при отработке управляющих команд и самодиагностики.

Технология разработки программного комплекса

Для возможности ведения разработки программного комплекса СДПЛИ в части ЦПУ и МПУ СДПЛИ параллельно и независимо от разработки физического оборудования были разработаны виртуальные САУ, которые имитируют работу реальных устройств.

При разработке виртуальных САУ, так же, как и реальных САУ в качестве базового ПО, была использована интеграционная платформа. Это позволило обеспечить единство работы МПУ СДПЛИ с виртуальными и реальными САУ СДПЛИ и быстрый переход без какой-либо доработки ППО МПУ СДПЛИ по мере подключения реального оборудования.

При разработке виртуальных САУ были использованы те же исходные данные, что и при разработке реальных САУ СДПЛИ, то есть имена параметров и команд идентичны. Виртуальное САУ СДПЛИ при получении управляющих команд от МПУ СДПЛИ по заданному алгоритму и на основе входных параметров генерирует значения выходных параметров. Оператор только по косвенным признакам может отличить работу с виртуальным САУ СДПЛИ от работы с реальным САУ СДПЛИ.

На рис. 2 представлены укрупненные схемы ППО САУ СДПЛИ и ППО виртуальной САУ СДПЛИ.

Эта технология позволила вести разработку программного комплекса СДПЛИ на ранних этапах создания ЛУ и ее тестирование до монтажа реальных устройств на установке, что в свою очередь позволит соблюсти сроки сдачи программного комплекса СДПЛИ.

Кроме того, виртуальные САУ обеспечивают возможность безопасного тестирования нового и модернизируемого оборудования. Также они позволяют смоделировать различные аварийные ситуации оборудования, для отладки работы программного комплекса СДПЛИ, без вывода из строя реального оборудования.

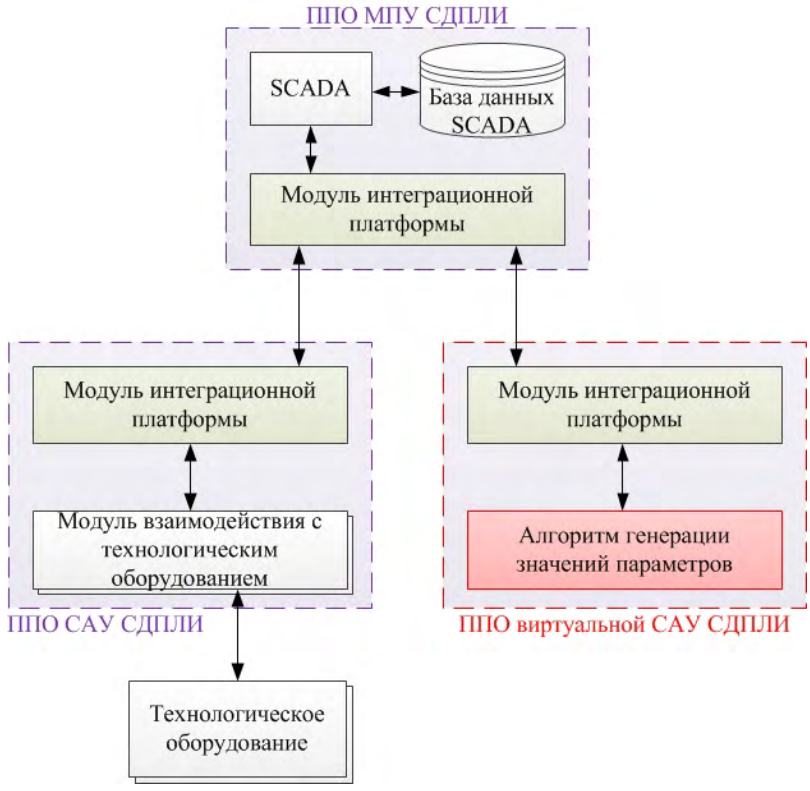


Рис. 2. Укрупненные схемы ППО САУ СДПЛИ и ППО виртуальной САУ СДПЛИ

Взаимодействие систем

При разработке ИУС большое внимание было уделено рассмотрению этапов подготовки к эксперименту и проведению эксперимента всех систем ЛУ. Была разработана схема взаимодействия систем на каждом этапе.

В результате, для СДПЛИ была определена зависимость от системы автоматической юстировки (САЮ), которая обеспечивает точное наведение луча на мишень. Юстировка канала диагностики должна выполняться после завершения юстировки канала САЮ. Поэтому на видеокадрах СДПЛИ присутствует информация о признаке окончания юстировки САЮ, а также блокируются кнопки на подачу команд «Юстировка» в случае отсутствия данного признака.

СДПЛИ влияет на возможность проводить настройку адаптивного зеркала, поэтому на видеокадрах системы усиления лазерной энергии (СУЛЭ) отображается информация о признаке окончания подготовки к эксперименту СДПЛИ, а также блокируются кнопки на подачу команды «Настройка» в случае отсутствия данного признака.

Описание видеокадров ЦПУ и МПУ СДПЛИ

Для обеспечения выполнения требований, предъявляемых к ЦПУ и МПУ СДПЛИ, были разработаны видеокадры.

Видеокадр «Система диагностики параметров лазерного излучения» отображает текущее состояние всех каналов. Присутствует возможность подать основные управляющие команды сразу на несколько каналов. На данном видеокадре также отображается признак какой-либо ошибки или аварийной ситуации на канале, а также отображено текущее состояние САЮ. На рис. 3 представлен данный видеокадр.

В окне «Журнал событий» отображается информация о поданных командах, о сменах статуса оборудования, о возникающих ошибках на оборудовании.

В окне «Этапы юстировки» отображается информация о времени начала юстировки, результате юстировки, направлении и количестве шагов, произведенных шаговыми двигателями, а также координаты центра тяжести изображения, полученного с камер на каждом этапе юстировки. Данная информация необходима для возможности возврата к начальной оптической схеме, в случае увода пятна из поля зрения камер.

Видеокадр «Состояние оборудования канала» дает возможность подать весь спектр команд, отображает текущее состояние всего оборудования канала, наличие запрета/разрешения на подачу определенных команд от смежной подсистемы, а также отображается возникшая ошибка или аварийная ситуация.

Видеокадр «Юстировка канала» позволяет запустить юстировку в автоматическом режиме и наблюдать процесс юстировки, либо отъюстировать

канал в ручном режиме путем управления моторизованными оправами зеркал и шаговыми двигателями и анализом изображений с камер. Также присутствует возможность подбирать светофильтры путем подачи команд на смены светофильтров и анализировать изображения с камер. На рис. 4 представлен данный видеокадр.

Видеокадр «Данные предыдущих экспериментов» отображает результаты проведенных экспериментов. Результатами являются числовые данные, осциллограммы и изображения с камер. Также отображается информация какие светофильтры использовались во время эксперимента и их степень пропускания. На рис. 5 представлен данный видеокадр.

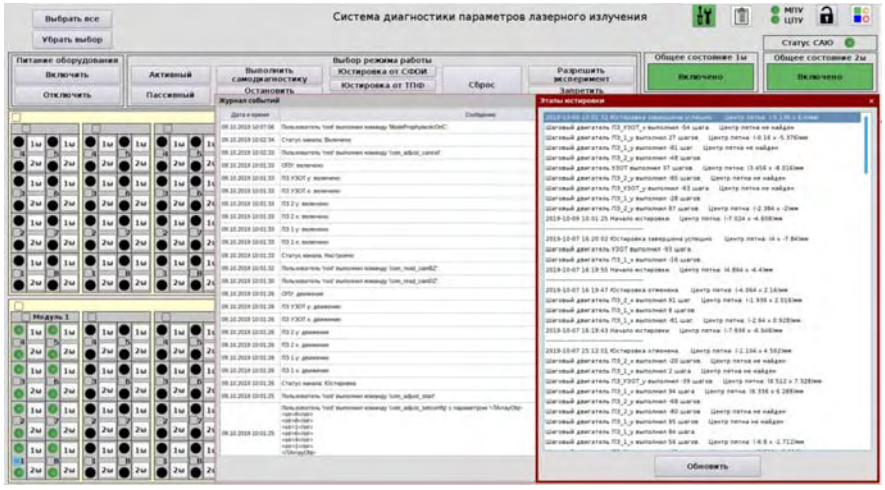


Рис. 3. Видеокадр «Система диагностики параметров лазерного излучения»

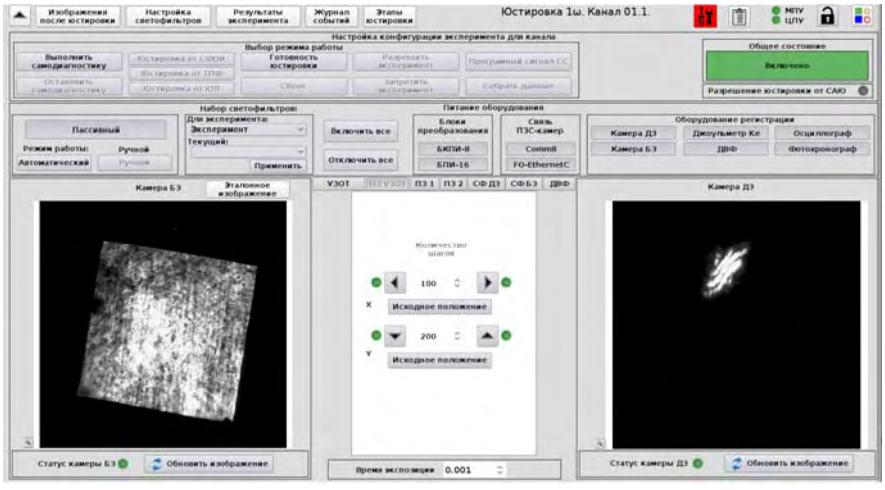


Рис. 4. Видеокадр «Юстировка канала»

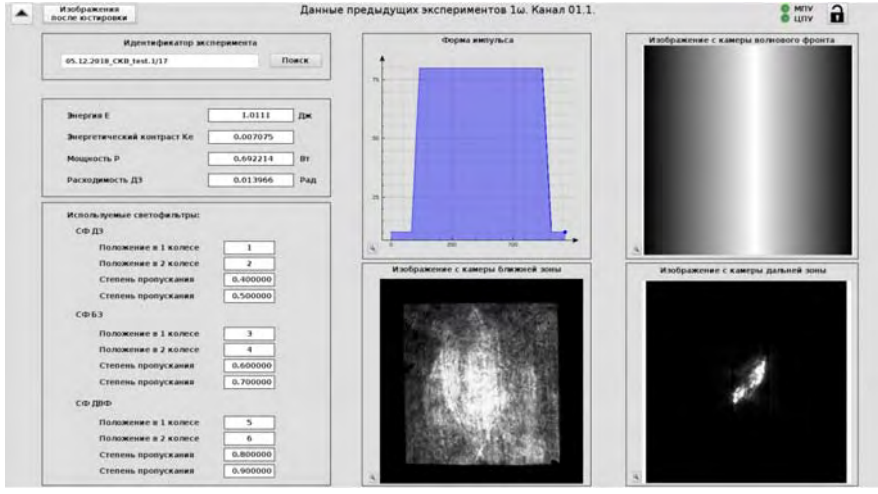


Рис. 5. Видеокадр «Данные предыдущих экспериментов»

Описание САУ СДПЛИ

ППО САУ СДПЛИ построено по модульному принципу, и состоит из отдельных, независимо выполняющихся в среде ОС Astra Linux программ различного назначения, взаимодействующих с внешними системами и между собой. Перечень программных модулей ППО САУ СДПЛИ:

– модуль интерфейса интеграционной платформы (МИИП) (8 шт.);

– модуль алгоритмов САУ (МА САУ) (8 шт.);

– модуль управления БВВУ (МУ БВВУ) (8 шт.);

– модуль управления камерой S2C (МУК S2C) (2 шт.);

– модуль управления камерой VAC (МУК S2C) (1 шт.);

– модуль обработки и анализа изображений (МОАИ) (1 шт.);

– модуль управления комплектом джоульметров (МУ КД) (1 шт.);

– модуль сбора данных ИБП (МСД ИБП) (1 шт.).

Схема взаимодействия модулей приведена на рис. 6. Обозначения на схеме:

– ИП – интеграционная платформа;

– ИБП – источник бесперебойного питания;

– БВВУ – блока ввода-вывода универсальный;

– ШД – шаговый двигатель;

– СФ – светофильтр;

– ПЗ – поворотное зеркало;

– РЭК – Регистратор энергетического контраста;

– ЛД – Лазерный джоульметр;

– ПЭ – Джоульметр-монитор;

– ПЭШ – Джоульметр широкоапертурный;

– VAC – ФПЗС (фотоприбор с зарядовой связью) – камера;

– S2C – ФПЗС – камера.

Применяемые технологии

В ходе разработки программного комплекса управления СДПЛИ ЛУ были применены следующие технологии:

– ОС Astra Linux;

– высокоуровневые языки программирования C и C++;

– скриптовый язык программирования JavaScript;

– СУБД PostgreSQL;

– процедурный язык SQL;

– объектно-ориентированное программирование;

– многопоточное программирование;

SCADA – система из состава БПП.

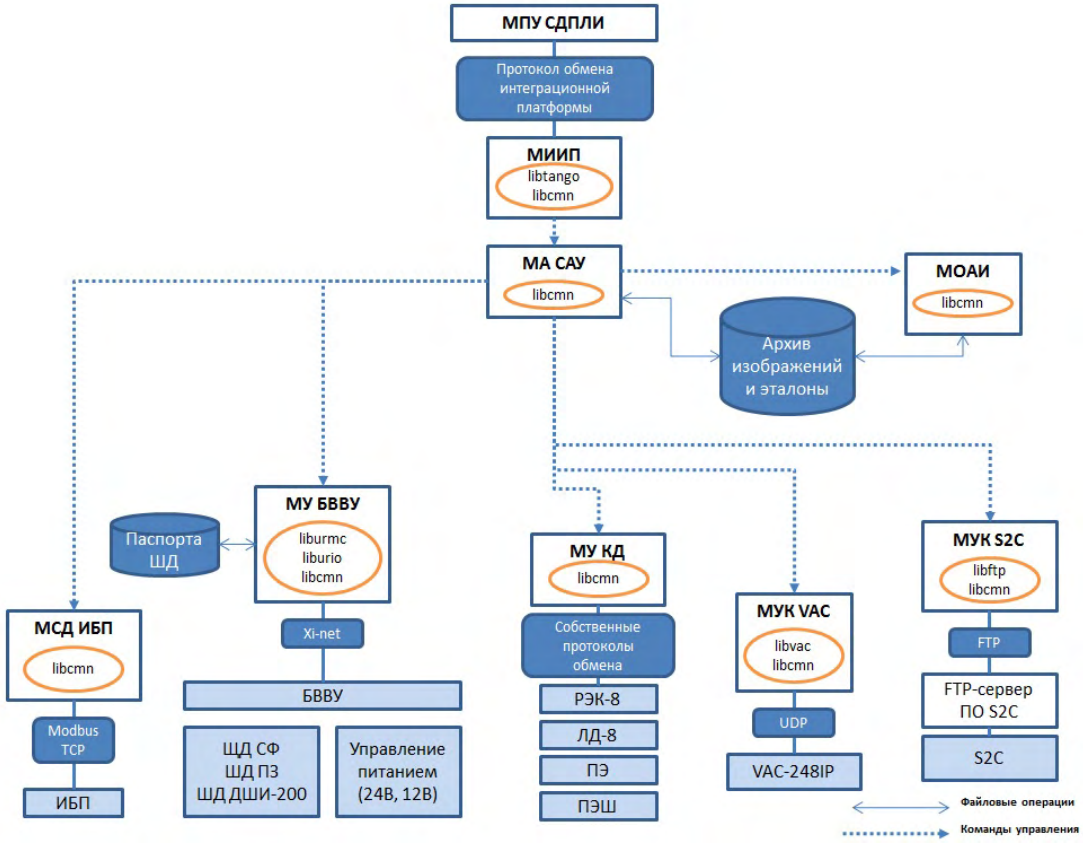


Рис. 6. Схема ППО САУ СДПЛИ

Проведение испытаний

Для проведения испытаний программного комплекса СДПЛИ был организован испытательный комплекс восьмиканального модуля. На момент проведения испытаний реальное оборудование обеспечивало работу СДПЛИ только одного канала одного модуля, поэтому так же были использованы виртуальные САУ СДПЛИ, которые были запущены на сервере интеграционной платформы СДПЛИ.

В ходе проведения испытаний было проведено несколько экспериментов со срабатыванием реального оборудования.

В результате испытаний было определено, что разработанный программный комплекс управления системой диагностики параметров лазерного излучения многоканальной лазерной установки обеспечивает выполнение требований к ЦПУ, МПУ СДПЛИ, САУ СДПЛИ, а именно:

– обеспечивает возможность проведения эксперимента на всей установке;

– обеспечивает возможность работы только на МПУ с целью проведения ремонтных и тестовых работ;

– обеспечивает сбор отображения и хранение информации об ошибках, а так же отработка аварийных защит;

– обеспечивает сбор, хранение и возможность просмотра результатов эксперимента;

– обеспечивает выдачу команд управления технологическим оборудованием и контроль их выполнения;

– осуществляет непрерывную диагностику состояния подключенного технологического оборудования и самодиагностику САУ;

– обеспечивает проведение автоматической юстировки, а также юстировки в ручном режиме;

– обеспечивает подготовку оборудования к проведению эксперимента, и сбор данных эксперимента.

Заключение

Разработанный авторами программный комплекс управления системой диагностики параметров лазерного излучения многоканальной лазерной установки, состоящий из ППО ЦПУ, ППО МПУ СДПЛИ и ППО САУ СДПЛИ, обеспечивает:

– возможность отображения оператору всей необходимой информации для проведения эксперимента и проведения тестовых работ, обеспечивает сбор, хранение и возможность просмотра результатов эксперимента;

– отображение и хранение информации об ошибках;

– в автоматизированном режиме включение и настройку технологического оборудования;

– выполнение автоматической юстировки оборудования оптических каналов, а также позволяет автоматизировать все процессы подготовки и проведения эксперимента. Автоматизация этих процессов позволяет значительно облегчить эксплуатацию лазерной установки и сократить время подготовки к эксперименту.

В настоящее время программный комплекс управления СДПЛИ ЛУ разработан, установлен на испытательном стенде восьмиканального модуля и проходит опытную эксплуатацию на объекте заказчика.

ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ФИЗИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ «ОБЗОР»

Д. С. Собанин, О. В. Коваленко, И. В. Ерошкина, И. А. Крючков, Н. И. Хочкин, Е. Ф. Варгина, Ю. В. Тихомиров

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Система физической защиты (СФЗ) объекта [1, 2] – это совокупность технических средств и организационных мер для предотвращения несанкционированных действий, таких как диверсия или хищение, против заданных предметов физической защиты (ПФЗ).

В докладе представлено разработанное программное обеспечение (ПО) «ОБЗОР» для оценки эффективности (ОЭ) систем физической защиты стационарных объектов в противодействии несанкционированным действиям нарушителя, в том числе группам совместно действующих нарушителей.

Целью разработки ПО было совершенствование и автоматизация оценки эффективности путем компьютерного имитационного мультиагентного моделирования, а также сокращение трудозатрат аналитика и повышение достоверности и вариативности результатов его работы по поиску существующих и потенциальных уязвимостей в СФЗ.

Актуальность работы обусловлена необходимостью проведения оценки эффективности СФЗ при проектировании и модификации, для обоснования достаточности защиты объектов в соответствии с требованиями нормативных документов [3].

В настоящее время существует ряд инженерных методик и компьютерных программ для ОЭ СФЗ стационарных объектов [4, 5]. Представляемое ПО обеспечивает гибкий подход и более реалистичные модели за счет реализации и использования:

– мультиагентного моделирования;

– возможностей задания произвольной сложной логики поведения (тактики действий) для индивидуальных агентов нарушителей и сил охраны посредством визуального предметно-ориентированного макроязыка;

– технологии навигационных сетей для автоматического поиска оптимальных маршрутов;

– трехмерной и двумерной среды визуализации на виртуальном глобусе;

– технологии автоматического построения трехмерной геометрической модели по двумерным графическим геоданным и поэтажным планировкам зданий;

– интеграции с единой базой данных (БД), доступной для чтения и редактирования из сторонних инструментов и содержащей всю требуемую для расчетов актуальную информацию по объектам защиты.

Общие сведения о возможностях программы

Ключевой технологией, используемой в ПО «ОБЗОР» является мультиагентное моделирование. Это такое направление в имитационном моделировании [6], которое предполагает работу с децентрализованной моделью, состоящей из множества индивидуальных объектов (агентов) и их окружения. Поведение всей системы можно рассматривать, как результат поведения большого числа автономных объектов, взаимодействующих друг с другом и с окружающей средой (внешний код не управляет поведением агентов, дает только глобальные цели, агенты управляются внутренними правилами).

Таким образом, разработанное ПО представляет собой среду мультиагентного имитационного моделирования конфликтной ситуации в системе «силы физической защиты» (технические средства и персонал охраны) – «нарушители». Конфликтная ситуация определяется прямо противоположными целями сил охраны и нарушителя.

В рамках мультиагентного подхода для решения задачи ОЭ СФЗ в ПО моделируется:

– трехмерная окружающая среда – здания, сооружения, предметы, области, линии, точки;

– действия тактических групп нарушителя;

– действия тактических групп сил охраны;

– инженерно-технические средства обнаружения (ТСО – технические средства обнаружения) нарушителя – датчики, действующие на различных физически принципах

– инженерно-технические средства задержки (ФБ – физические барьеры) нарушителя – ограждения, двери, окна

На рис. 1 показан пример гипотетического объекта и вариант задания начальных данных сценария. В частности, выполнен ввод данных о СФЗ гипотетического модельного объекта, отмечены зоны обнаружения ТСО, значками отмечено начальное положение тактических групп охраны и нарушителя.

После задания начальных данных выполняется имитация развития ситуации сценария до победы одной из сторон.

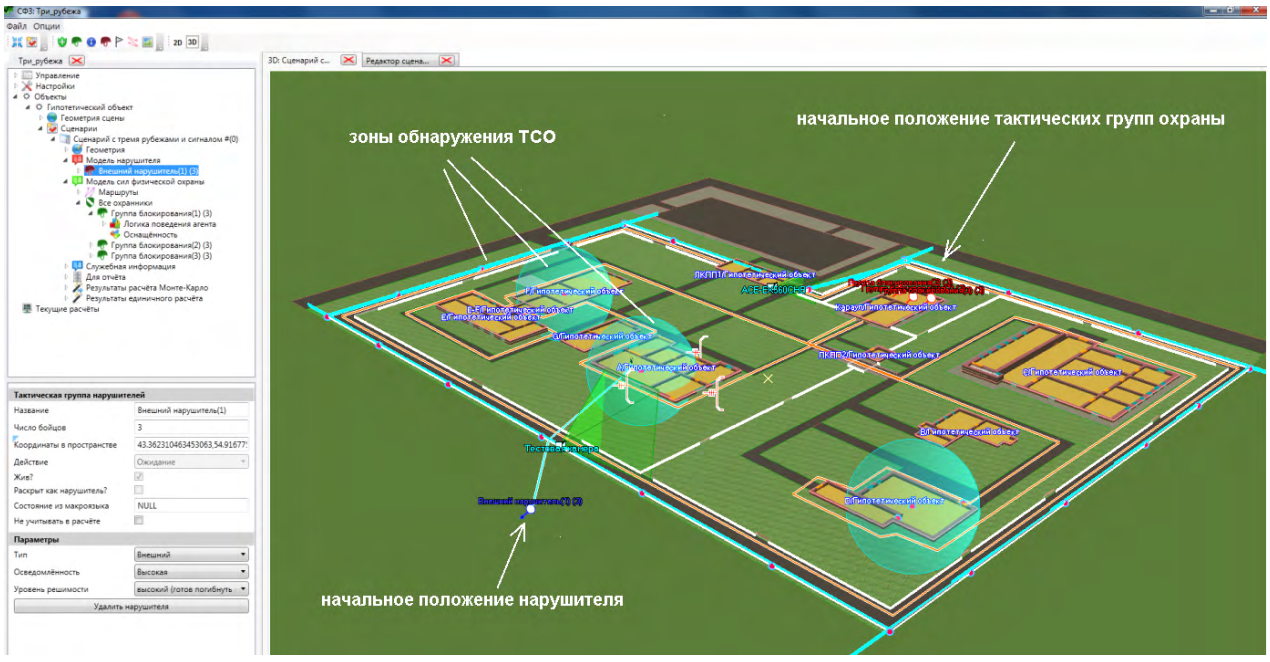


Рис. 1. Исходные данные для сценария

Количественный показатель эффективности СФЗ определяется как вероятность предотвращения несанкционированных действий нарушителей. Для его получения используется метод Монте-Карло [7, 8], при котором мультиагентная имитация запускается статистически значимое количество раз, и результаты (результат расчета сценария – победа либо поражение сил СФЗ) усредняются (см. рис. 2).

Такой подход, в отличие от аналитических методов, не требует никаких априорных предположений о независимости случайных величин и не накладывает ограничений на вид их распределений.

При каждом запуске заново разыгрываются случайные величины, представляющие стохастические факторы и нечетко определенные исходные данные – случайный характер времен движения и преодоления физических барьеров, вероятность срабатывания средства обнаружения, исход боестолкновения.

По результатам расчета по Монте-Карло пользователь-аналитик имеет возможность подробно визуализировать развитие событий интересующих его реализаций сценария (см. рис. 3), чтобы определить уязвимые места в СФЗ и тактике действий сил охраны.

Результаты расчета кратко могут быть представлены в виде отчетных форм, которые можно сохранить как документы Microsoft Word.

ПО содержит трехмерную и двумерную среду визуализации на виртуальном глобусе (см. рис. 1). Реализована технология автоматического построения трехмерной геометрической модели, необходимой для расчета и визуализации, по двумерным графическим геоданным (ограждения, растительность, дороги и др.) и поэтажным планировкам зданий (двери, окна, этажи и др.), вводимым в ГИС и САПР.

ПО интегрировано с единой базой данных (БД), доступной для чтения и редактирования из сторонних инструментов. БД содержит всю требуемую для расчетов актуальную информацию по объектам защиты (геометрия – пространственные графические данные, и табличные данные), а также справочники по техническим средствам ФЗ с параметрами расчетным моделей и др. Это позволяет переиспользовать единожды введенные данные по объектам, а также использовать для ввода и редактирования данных мощные ГИС-инструменты.

Уникальной особенностью ПО ОЭ СФЗ «ОБЗОР» является возможность задания произвольной сложной логики поведения (тактики действий) для индивидуальных агентов нарушителей и сил охраны посредством визуального предметно-ориентированного макроязыка (см. рис. 4). То есть можно быстро и легко изменять модели нарушителей, конфигурацию СФЗ, порядок действий сил охраны и обороны и тем самым обеспечивать быструю и эффективную разработку логики принятия решений.

Макроязык позволяет задавать цели агентов (пример – план движения нарушителя), реакции агентов на внешние события (например, сигналы от ТСО), взаимодействие между агентами (например, коммуникация тактических групп охраны путем посылки сигналов по рации).

Для ускорения ввода типовых тактик разработан набор типовых моделей (шаблонов) поведения, которые можно брать за основу и свободно модифицировать.

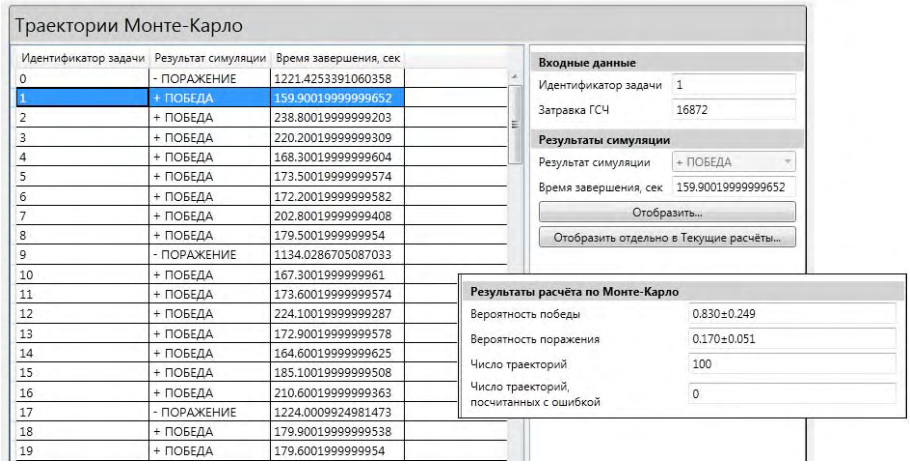


Рис. 2. Результаты расчета по методу Монте-Карло

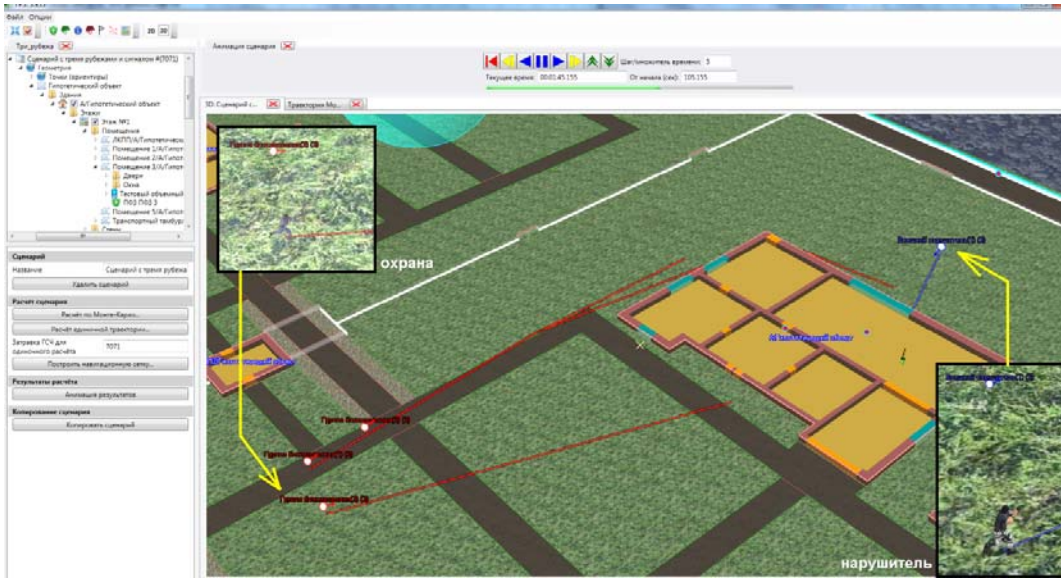


Рис. 3. Визуализация развития отдельной реализации сценария

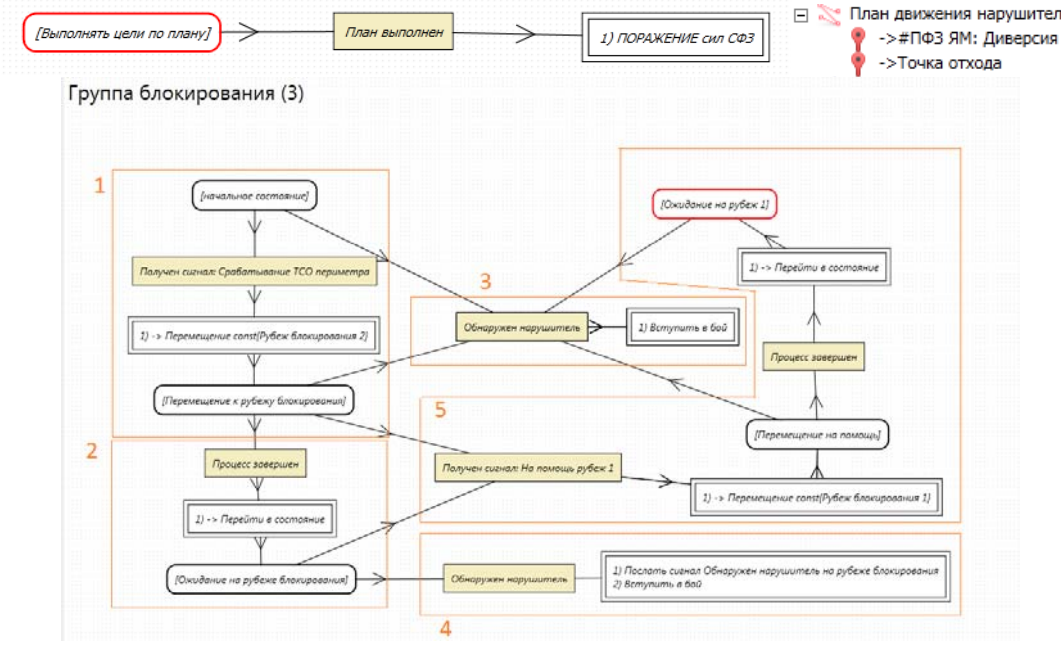


Рис. 4. Задание логики поведения агентов посредством визуального предметно-ориентированного макроязыка

Для автоматического построения корректных и оптимальных маршрутов движения агентов сил охраны и нарушителя между заданными начальными и конечными точками (как статически на этапе задания сценария, так и динамически в процессе счета) реализован модуль геометрических расчетов на базе технологии навигационных сетей (NavMesh), пример визуализации, которой приведен на рис. 5.

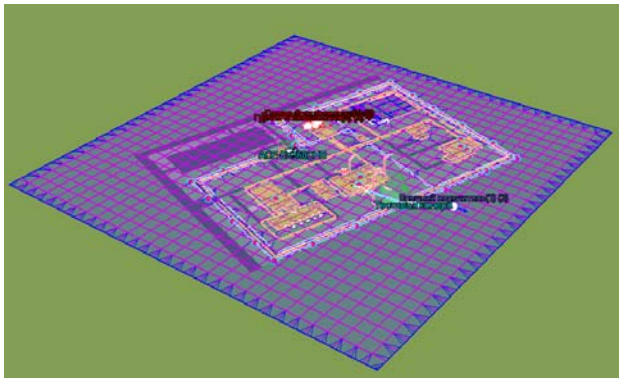


Рис. 5. Пример навигационной сети

Навигационная сеть [9] является представлением доступного для передвижения агентам пространства в виде многолистовой поверхности из связанных выпуклых многоугольников. Многоугольники образуют граф, к которому применимы эффективные графовые поисковые алгоритмы. В отличие от регулярного разбиения, большие открытые пространства представляются максимально крупными ячейками, что существенно экономит вычислительные ресурсы без потери точности представления геометрии. Естественным образом представляются этажи зданий и переходы между ними. Генерация навигационной сети по трехмерной геометрии окружающей среды выполняется полностью автоматически робастными алгоритмами.

Заключение

В докладе представлены результаты разработки ПО «ОБЗОР» для оценки эффективности систем физической защиты стационарных объектов в противодействии несанкционированным действиям нарушителя, в том числе группам совместно действующих нарушителей. В представленном ПО используется серия технологий (мультиагентное моделирование, навигационные сети, визуальный макроязык и т. д.), которые придают программному продукту уникальные свойства. Для подтверждения функциональных возможностей выполнена сертификация ПО и получен сертификат соответствия [10, 11].

Литература

1. Бондарев П. В. Физическая защита ядерных объектов: Учебное пособие для вузов / Бондарев П. В., Измайлов А. В., Толстой А. И. Под ред. Погожина Н. С. М.: МИФИ, 2008.
2. Гарсиа М. Проектирование и оценка систем физической защиты. Пер. с англ. М.: Мир: ООО «Издательство АСТ», 2002. С. 386.
3. Правила физической защиты ядерных материалов, ядерных установок и пунктов хранения ядерных материалов. Утверждены постановлением Правительства Российской федерации от 19.07.2019 № 456.
4. Электронный ресурс ФГУП «СПНПО «Элерон» Программный комплекс Вега-2. Режим доступа http://www.eleron.ru/development.html.
5. Программные комплексы ASSESS, JTS. – Лекции по оценке эффективности СФЗ. Межотраслевой специальный учебный центр, г. Обнинск, 2005.
6. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход, 2-е изд. : Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2006.
7. Соболь И. М. Численные методы Монте-Карло. М.: Наука, 1973.
8. Ермаков С. М. Метод Монте–Карло и смежные вопросы. – М.: Наука, 1971.
9. Электронный ресурс https://github.com/recastnavigation/recastnavigation. Режим доступа 10.02.2017.
10. Коваленко О. В., Собанин Д. С., Ерошкина И. В., Крючков И. А., Хочкин Н. И., Варгина Е. Ф., Тихомиров Ю. В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018616230 «Программное обеспечение оценки эффективности СФЗ», правообладатель – ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ».
11. Сертификат соответствия № 12.0001.1731. «Программное обеспечение оценки эффективности систем физической защиты «ОБЗОР». Орган по сертификации: Автономная некоммерческая организация «Межрегиональный испытательный центр» 124489, г. Москва, Зеленоград, корп. 601-а.

СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ СТЕНДОВ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В ИНТЕРЕСАХ ВОДОРОДНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ С ВОДО-ВОДЯНЫМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ РЕАКТОРАМИ

А. А. Тараканов, Е. В. Безгодов, Ю. Ф. Давлетчин, Д. Л. Мошкин, М. В. Никифоров, С. Д. Пасюков, И. А. Попов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Е. И. Забабахина», г. Снежинск Челябинской обл.

Введение

На атомных электростанциях, оснащенных водо-водяными реакторами причиной возникновения тяжелой аварии является нарушение проектных режимов охлаждения активной зоны реактора из-за разрыва трубопровода первого контура или полного обесточивания АЭС с потерей электропитания собственных нужд и не запуском основных и резервных дизель-генераторов [1]. В этих случаях, процесс развития тяжелой аварии можно разделить на четыре фазы:

– разогрев и последующее расплавление активной зоны;

– выпаривание остаточной воды в корпусе реактора;

– разогрев и расплавление корпуса реактора;

– проникновение расплава в бетон защитной оболочки.

В результате нарушения целостности реакторной зоны создаются условия для выделения водорода в объеме под защитной оболочкой, прежде всего, за счет окисления циркония в топливных оболочках. Водород, распределяясь в объеме под защитной оболочкой, смешивается с воздухом, водяным паром и другими продуктами окисления расплавов компонентов разрушающейся реакторной зоны. Таким образом, под защитной оболочкой и в помещениях образуются области, заполненные водородосодержащими смесями, способными к воспламенению, при относительно небольших внешних энерговложениях. В дальнейшем процесс может развиваться следующим образом: горение затухает; по горючей смеси распространяется медленная или быстрая волна горения; реализуется переход от дозвукового горения к детонации; возможно возбуждение детонации в результате интенсивного энерговложения. Все эти проявления дополнительного энерговыделения за счет химической реакции горения водорода могут привести к разгерметизации защитной оболочки АЭС и обусловить опасное радиоактивное заражение больших территорий [2].

Практика проектирования АЭС с водо-водяным энергетическим реактором требует достоверного предсказания распространения в объеме защитной оболочки АЭС водородосодержащих парогазовых смесей, условий возникновения горения этих смесей и моделирования воздействия и последствий горения на защитную оболочку в процессе тяжелых аварий.

Комплекс стендов для изучения водородной безопасности АЭС, расположенный на испытательном полигоне РФЯЦ-ВНИИТФ, предназначен для исследования процессов поступления пара, водорода и других газов в помещения защитной оболочки реактора, расслоения и перемешивания газовых составов, воспламенения и распространения пламени при условиях, характерных для тяжелых аварий [3].

В состав комплекса входит «легкая» БМ-Л и «прочная» БМ-П экспериментальные установки.

Экспериментальная установка БМ-Л

С целью выполнения исследований в интересах водородной безопасности на испытательном полигоне РФЯЦ-ВНИИТФ создана экспериментальная установка (ЭУ) БМ-Л, конструкция которой повторяла геометрию смежных помещений АЭС – главного циркуляционного насоса (ГЦН) и парогенератора (ПГ) в масштабе 1:10. Стенд состоял из внутренней и внешней камеры. Внутренняя камера построена из бруса и прозрачного монолитного поликарбоната, для обеспечения оптической регистрации. Внешняя камера, утеплена листами минеральной ваты, для поддержания требуемого градиента температур внутренней камеры. При создании внутренней камеры учтены все тонкости геометрии помещений и расположения оборудования внутри них: установлены макеты ГЦН и ПГ, выполнены в масштабе существующие проемы и перегородки. Установка БМ-Л предназначена для проведения экспериментов с водородопарогазовыми смесями (ВПГС) при атмосферном давлении и температуре выше 100 °С. Изображение внешнего вида экспериментальной установки БМ-Л представлено на рис. 1.

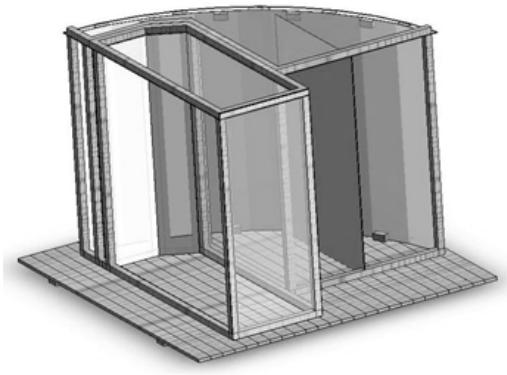


Рис. 1. Внешний вид экспериментальной установки БМ-Л

После серии успешных испытаний по истечению ВПГС внутри помещений экспериментальная установка БМ-Л была модифицирована под испытания опытных образцов пассивных каталитических рекомбинаторов водорода (ПКРВ), применяемых на АЭС. За основу был взят 5-тонный железнодорожный контейнер. К одной из сторон контейнера приварена рамка для крепления съемного поликарбонатного листа, через который производится видеорегистрация экспериментов. Внутренняя и внешняя камеры оснащены клапаном для одностороннего выхода газов из установки наружу, измерительными методиками, трубами для подачи ВПГС, размещенными в отверстиях пола внутренней камеры, устройством открытия/закрытия входов рекомбинатора с удаленным управлением и вентиляторами для обеспечения однородного газового состава. Изображение внешнего вида экспериментальной установки БМ-Л для испытаний ПКРВ представлено на рис. 2.

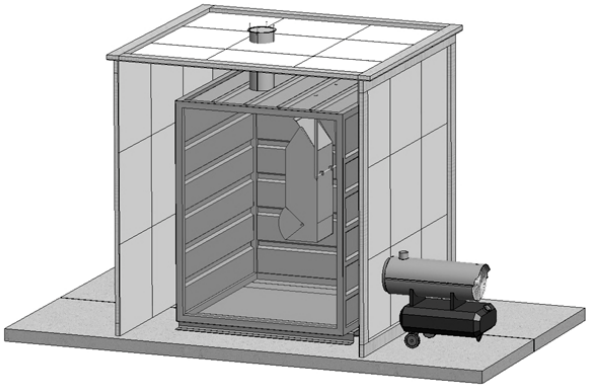


Рис. 2. Внешний вид экспериментальной установки БМ-Л для испытаний ПКРВ

Экспериментальная установка БМ-П

Установка БМ-П предназначена для проведения экспериментов с ВПГС при температуре до 200 °С и давлении до 0,5 МПа. В ее состав входят две металлические камеры, высотой 5 метров и диаметром 2 метра, соединенных между собой съемным сильфоном с проходным диаметром 500 мм.

На ЭУ расположены два типа люков: диаметром 200 и 500 мм, предназначенные для ввода систем регистрации внутрь камеры, а также для визуализации процессов сквозь смотровые иллюминаторы. На рис. 3. представлено изображение внешнего вида экспериментальной установки БМ-П.

ЭУ оборудована системой нагрева и термостабилизации. Нагрев и поддержание необходимой температуры установки производится с помощью нагревательного кабеля и многоканальных регуляторов температуры. Регулировка мощности производится индивидуально на каждом нагревательном элементе. Суммарная мощность системы нагрева камеры 80 кВт. ЭУ аттестована в соответствии с ГОСТ Р 8.568-97 и ГОСТ РВ 0008-002-2013.

Рис. 3. Внешний вид экспериментальной установки БМ-П

Система управления технологическим оборудованием и газонаполнением экспериментальных установок

Система управления технологическим оборудованием и газонаполнением ЭУ обеспечивает управление компрессорной установкой, парогенератором, вентиляторами, устройством открытия/закрытия входов рекомбинатора, а также обеспечивает заданные темпы поступления газов (H_2, O_2, пар) в ЭУ и выполняет измерение их расходов. Работа осуществляется в автоматическом режиме, с использованием программно-управляемого пульта дистанционного управления. В данный момент ведется работа по созданию программного обеспечения для мониторинга, анализа, архивирования и постобработки информации, поступающей с измерительной аппаратуры стенда при проведении испытаний.

Системы регистрации экспериментальных установок

Измерение температурных полей

Для измерения температурных полей при проведении экспериментов применяется аттестованная методика измерений (МИ). МИ предназначена для

измерений температуры парогазовой среды в диапазоне от минус 25 до плюс 800 °С, и поверхности ЭУ в диапазоне от минус 25 до плюс 600 °С в стационарном и динамическом режимах. В ее составе используются десять 12-канальных регистраторов. Период опроса аналоговых входов регистратора составляет 1 с. Измерение температуры производится контактным методом с помощью термоэлектрических преобразователей типа ХК(L) и ХА(К), установленных внутри и на поверхности экспериментальной установки.

Система статического и динамического давления

Регистрация статического давления внутри камеры производится с использованием цифрового прецизионного манометра АИР-30. Цифровой выход используется для связи преобразователя с персональным компьютером.

Регистрация динамического (квазистатического) давления парогазовой среды внутри камер установок осуществляется с помощью аттестованной МИ. МИ предназначена для дистанционного измерения максимального избыточного давления в диапазоне от 250 до 2500 кПа. Частота дискретизации аналого-цифрового преобразователя датчика давления составляет 1 кГц.

Визуализация процессов горения ВПГС

Для визуализации горения ВПГС внутри ЭУ был выбран метод теневой съемки на тыльном экране из световозвращающей пленки в расходящемся пучке света. Съемка осуществляется высокоскоростными видеокамерами. Пример высокоскоростной видеорегистрации горения ВПГС представлен на рис. 4.

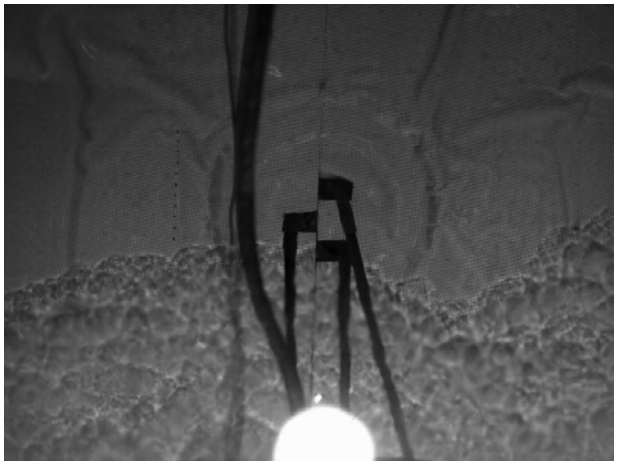


Рис. 4. Пример высокоскоростной видеорегистрации горения ВПГС

Система измерения относительной влажности

Измерение относительной влажности при экспериментальных исследованиях осуществляется с помощью комплекса средств регистрации влажности РАСК2027, разработанного в РФЯЦ-ВНИИТФ. В его составе 24 отметчика влажности и 6 устройств преобразования. Данные регистрируются и обрабатываются на персональном компьютере с помощью специализированного программного обеспечения.

МИ относительной влажности аттестована и предназначена для многоточечного непрерывного измерения значений относительной влажности в ЭУ при проведении опытов в температурном диапазоне от 23 до 150 °С и относительной влажности до 95 %.

Система дискретного контроля газового состава (ДСКГС)

ДСКГС предназначена для многоточечного измерения концентрации газов (водорода, кислорода, азота) в ЭУ в процессе проведения опытов. Обеспечивается одновременный отбор газа в различных точках ЭУ, или последовательный из одной точки с заданными интервалами. Количество каналов: 30. Полученные пробы анализируются с помощью хроматографа. МИ аттестована и применяется для определения объемной доли водорода в диапазоне от 0,1 до 40 %, кислорода – от 0,1 до 21 %, азота – от 1,0 до 100 %, в температурном диапазоне от 20 до 160 °С, абсолютном давлении от 90 до 500 кПа и концентрации водяного пара от 1,0 до 70 %.

Система непрерывного контроля газового состава (НСКГС)

Непрерывный контроль газового состава внутри ЭУ осуществляется с помощью НСКГС, разработанной в РФЯЦ-ВНИИТФ. МИ аттестована и применяется для определения концентрации водорода, кислорода и азота в ВПГС с использованием электрохимических датчиков в диапазоне:

– по водороду: от 0,2 до 20 %;

– по кислороду: от 5 до 30 %;

Количество каналов: 3.

Заключение

В рамках работ по исследованию водородной безопасности АЭС на испытательном полигоне РФЯЦ-ВНИИТФ был создан комплекс стендов, предназначенный для получения экспериментальных данных о процессах, характерных для тяжелых аварий на АЭС, и при условиях, близких к ним. Также, для выполнения данных работ, было разработано специализированное измерительное оборудование, не имеющее аналогов в РФ.

ЭУ БМ-П состоит из двух связанных камер объемом 15 м^3 и позволяет моделировать процессы поступления пара, водорода, других газов в помещения защитной оболочки реактора при температуре до 200 °С, давлении до 0,5 МПа, а также расслоения и перемешивания газовых составов, их воспламенение и распространение пламени.

ЭУ БМ-Л ориентирована на проведение экспериментов, с широкими возможностями оптической регистрации, при температурах выше 100 °С и давлениях близких к атмосферным.

Измерительные методики, входящие в состав экспериментальных установок, позволяют получать информацию о температуре, влажности, газовом составе и давлении формируемой газовой среды. Для визуализации горения ВПГС используются высокоскоростные видеокамеры.

В настоящее время ведется работа по совершенствованию существующих методик измерений, расширению условий их применения и снижению погрешности измерений. Предполагается дооснащение стенда дополнительной измерительной аппаратурой и разработкой методик измерений на ее основе.

Литература

1. Артамонов Н. В., Сидоров А. С. Изменение размножающих свойств реактора типа ВВЭР-1000 при прохождении запроектной аварии с расплавлением активной зоны // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Обеспечение безопасности АЭС. 2012. № 11. С. 102–111.

2. Безгодов Е. В., Иванов А. С., Крюков В. М., Симоненко В. А., Шульц О. В., Павленко А. В., Фролов Д. В., Ушков А. А. Результаты и задачи исследований динамических процессов в водородосодержащих средах с целью противодействия тяжелым авариям на АЭС с ВВЭР / Международная конференция «XIV Забабахинские научные чтения» // Сборник материалов. Снежинск: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ». 2019. С. 192–193.

3. Тараканов А. А. Измерительные методики и системы стенда для выполнения исследований в интересах водородной безопасности АЭС с ВВЭР» / VII научный семинар «Моделирование технологий ядерного топливного цикла» // Сборник материалов. Снежинск: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ». 2018. С. 31.

КЛИЕНТ-СЕРВЕРНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ЛИЦЕНЗИЙ ЛОГОС

А. А. Ярулина, А. В. Дьяков, Д. О. Козлов, А. Г. Надуев,
Д. А. Тишкин, П. А. Тюхтина, А. В. Шемякин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Пакет программ ЛОГОС – это программный продукт для комплексного математического моделирования с использованием ресурсов современных супер-ЭВМ. ЛОГОС – это наукоемкий комплексный цифровой продукт, состоящий из различных компонент. Использование типовых решений для контроля лицензии цифрового продукта ЛОГОС не представляется возможным. Поэтому было принято решение о разработке системы лицензирования, позволяющей контролировать соблюдение пользователями пакета программ ЛОГОС условий лицензии на его использование. Требования к системе лицензирования изложены в техническом задании.

В соответствии с ТЗ в основные функции системы лицензирования входит:

– возможность ограничения количества используемых ядер при проведении расчетов;

– возможность ограничения числа одновременно запущенных расчетов (в том числе и мультидисциплинарных) при проведении расчетов;

– контроль типа запускаемых программных модулей пакета программ ЛОГОС – запуск либо определенных продуктов, либо их комбинации в соответствии с имеющейся у пользователя лицензией;

– сбор статистики по использованию лицензии;

– предоставление пользователю интерфейса управления сервером лицензии.

Чтобы обеспечить выполнение требований к серверу системы лицензирования, лицензия должна содержать следующую информацию:

– цель использования;

– количество вычислительных ядер;

– количество одновременно решающихся задач.

Для централизации управления лицензией на множество копий программного обеспечения ЛОГОС было принято решение разработать сервер лицензий. Клиент сервера лицензии должен встраиваться в каждый компонент программного пакета ЛОГОС. Так же сервер лицензии должен предоставлять механизм доступа к данным лицензии и управления.

Архитектура системы лицензирования ЛОГОС

Система лицензирования ЛОГОС состоит из следующих компонентов:

– сервер лицензии;

– клиентская библиотека, встраиваемая в счетные модули и ЛОГОС-ПреПост;

– вспомогательные утилиты: утилита генерации файла лицензии; консольная утилита управления сервером лицензии.

Общая схема работы системы лицензирования приведена на рис. 1.

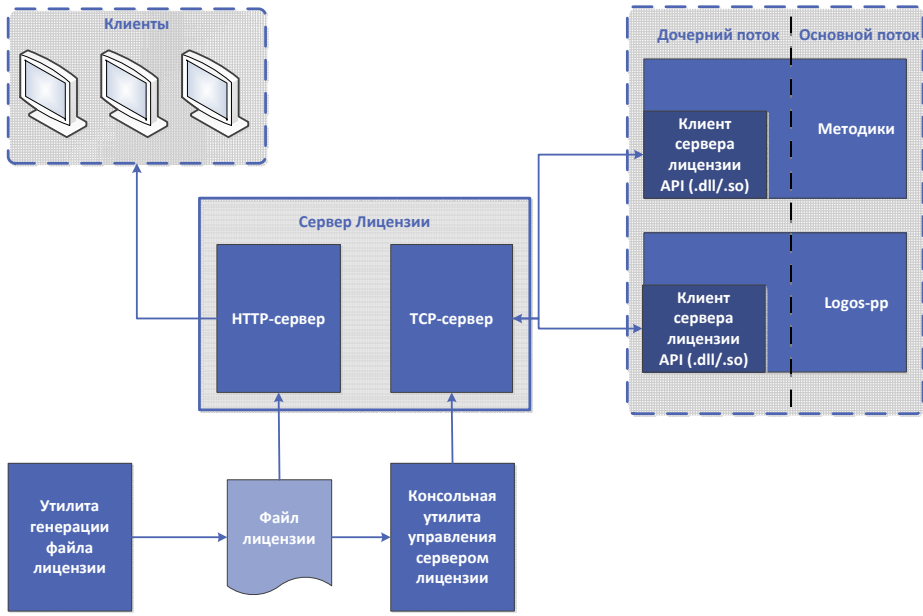


Рис. 1. Общая схема работы системы лицензирования

Сервер лицензии

Сервер лицензии состоит из двух частей: TCP сервера и HTTP сервера. TCP сервер принимает подключения от клиентов и определяет возможность их работы в соответствии с лицензией. HTTP сервер, встроенный в сервер лицензии, предоставляет пользователям информацию о функционировании сервера лицензии, текущей лицензии и подключенных клиентах, позволяет управлять работой сервера лицензии. Клиентской частью для TCP сервера являются счетные модули, для HTTP сервера – браузеры пользователей. Общая схема работы сервера лицензии отображена на рис. 2.

Сервер лицензии выполняет следующие функции:

– чтение лицензионных файлов;

– проверку целостности лицензионных файлов с целью исключения возможности несанкционированной модификации;

– прием входящих запросов на запуск расчетов от программных модулей, подключенных к серверу лицензий;

– анализ входящих запросов и их проверку на соответствие условиям и требованиям лицензии;

– отправку результатов проверки возможности запуска расчета программным модулям, подключенным к серверу лицензий;

– ведение списка запущенных задач;

– отображение информации о числе доступных ядер и количестве доступных пользователю расчетов;

– ведение статистики использования лицензии;

– предоставление интерфейса управления сервером лицензии.

Взаимодействие сервера лицензии с клиентами

На начальном этапе работы клиент выполняет процедуру инициализации для совместной работы с сервером лицензии, на сервере осуществляется проверка возможности запуска клиента, путем проверки лицензии. После инициализации клиент параллельно со своей основной работой отправляет уведомления серверу лицензии с определенным интервалом о продолжении работы. Сервер анализирует данные уведомления и отправляет клиенту сообщение о возможности продолжения работы. Когда клиент пытается завершить свою работу, он уведомляет об этом сервер. Сервер после данного уведомления освобождает ресурсы, занимаемые клиентом.

Сервер лицензии взаимодействует с клиентскими приложениями посредством сообщений, которые могут иметь следующие типы:

– "init" – инициализационное сообщение от клиента;

– "hb" – сообщение о подтверждении работы клиента;

– "resp" – ответ сервера в случае успешного выполнения запроса клиента;

– "fin" – ответ сервера в случае некорректного запроса (например, клиент запрашивает большее количество ресурсов, чем позволяет лицензия, или истекло время возможности подтверждения клиентом своей работы) или ответ на запрос клиента о завершении.

Обмен сообщениями производится посредством протокола TCP.

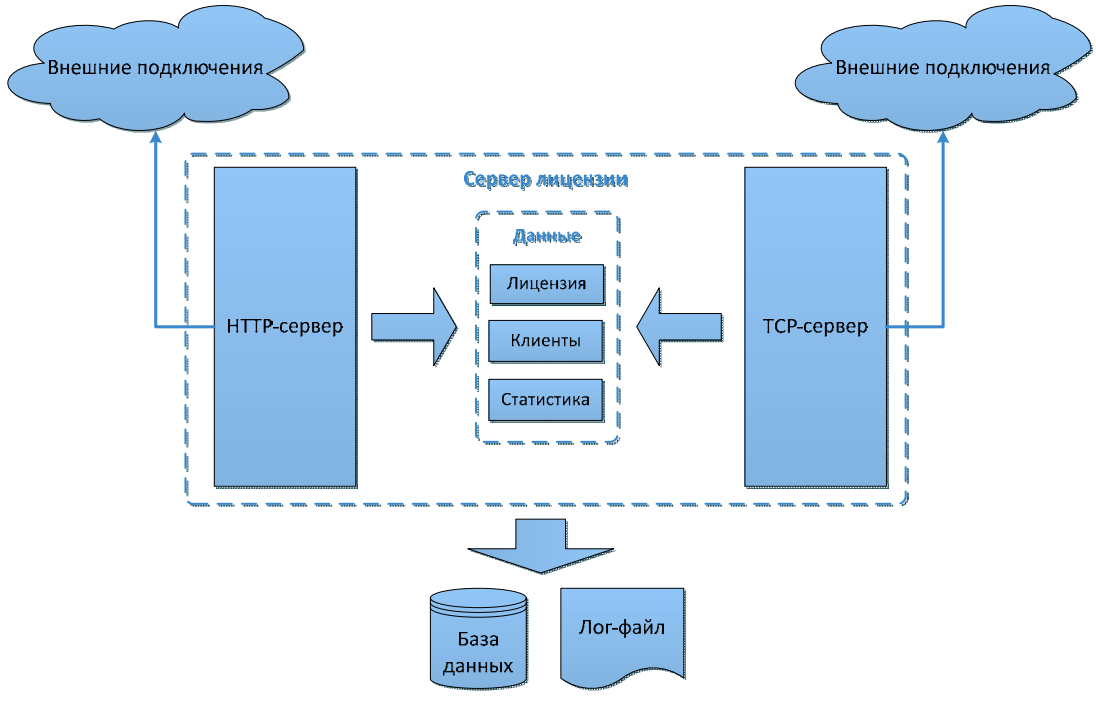


Рис. 2. Структура сервера лицензии

Программный интерфейс взаимодействия с сервером лицензии предоставляет следующие возможности: инициализация клиентов для работы с сервером лицензии, проверка продолжения работы клиента с текущей лицензией, завершение работы клиентов с сервером лицензии. Взаимодействие ЛОГОС-ПреПост и счетных модулей с сервером лицензии показано на рис. 3.

Клиентская часть сервера лицензии представляет собой динамически подключаемую библиотеку lib_lic_client.

Для взаимодействия сервера лицензии с приложением ЛОГОС-ПреПост была реализована библиотека UPPLicClient, предоставляющая графический диалоговый интерфейс и использующая функции из клиентской библиотеки lib_lic_client для взаимодействия с сервером лицензий. Она осуществляет отправку уведомлений серверу лицензии о продолжении работы, с определенным интервалом; завершает работу приложения, в случае получения от сервера соответствующего уведомления; отправляет серверу лицензии уведомление о завершении приложения. С помощью предоставляемого графического интерфейса библиотеки UPPLicClient пользователь при превышении купленной лицензии получает диалоговое уведомление. В диалоговом уведомлении можно выбрать, перепроверить лицензию или закрыть приложение. При выборе пользователем перепроверки лицензии инициируется повторная проверка лицензии через сервер, если занятые ресурсы, купленной лицензии, освободились, то происходит запуск приложения, в противном случае снова появляется диалоговое уведомление о превышении лицензии.

Взаимодействие клиентской библиотеки сервера лицензий со счетными модулями осуществляется при помощи динамической библиотеки ccf_license_client, подключение которой к счетному модулю выполняет модуль сопряжения CCF_Bridge. При запуске расчета задачи, счетные модули, участвующие в расчете, в момент инициализации вызывают метод инициализации модуля сопряжения. Модуль сопряжения, в свою очередь, при инициализации, выполняет подключение библиотеки ccf_license_client. Далее из модуля сопряжения вызывается метод инициализации клиентской библиотеки сервера лицензии. Во время выполнения данного метода копии библиотеки ccf_license_client, каждая из которых принадлежит своему mpi-процессу модуля, обмениваются между собой именами счетных модулей. В результате данного обмена формируется словарь, который хранит список счетных модулей, участвующих в расчете и число mpi-процессов, на которых они запущены. Копия библиотеки ccf_license_client, запущенная на mpi-процессе, номер которого равен 0, передает данную информацию серверу лицензий, который, в свою очередь, вернет клиенту информацию о возможности запуска расчета, таймаут опроса клиентом лицензионного сервера и уникальный идентификатор задачи. Полученный ответ о возможности запуска расчета рассылается с процесса с нулевым номером остальным. Если запуск не возможен, будет выведена информация о причине остановки расчета, счет будет прекращен. В случае положительного ответа будет запущен дочерний поток, который с определенным интервалом будет отправлять уведомления серверу лицензии о выполнении счета. Сервер анализирует данные уведомления и отправляет клиенту сообщение о возможности продолжения работы. Если продолжение расчета невозможно произойдет его остановка, также будет выведена информация о причине остановки. Когда из mpi-процесса счетного модуля с рангом 0 будет вызван метод завершения, клиент остановит свою работу и уведомит об этом сервер. Работоспособность перечисленной выше функциональности обеспечивается также для счетных модулей, собранных без использования mpi. В данном случае будет отсутствовать mpi -обмен внутри библиотеки ccf_license_client.

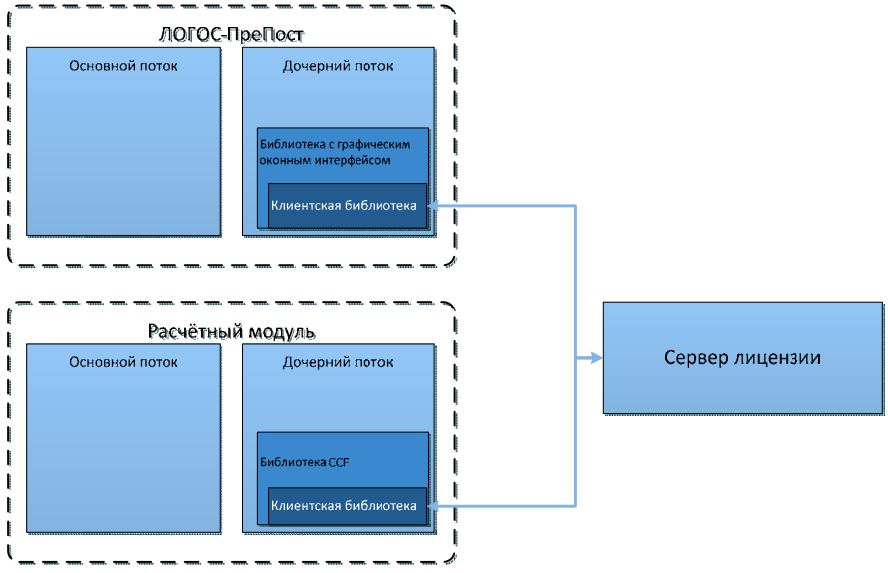


Рис. 3. Схема взаимодействия сервера лицензии с приложениями ЛОГОС-ПреПост и расчетными модулями

Утилита генерации лицензионных файлов

Для генерации входного файла лицензии сервера лицензий, была разработана специальная утилита «Генератор файла лицензии».

Генератор файла лицензии – это диалоговое кроссплатформенное приложение, написанное на языке C++, использующее библиотеку Qt.

Программный интерфейс утилиты генерации файла лицензий предоставляет следующие возможности:

– создание файла лицензии с подписью;

– создание шаблона файла лицензии;

– открытие сохраненного файла лицензии/шаблона;

– редактирование файла лицензий/шаблона.

Внешний вид утилиты представляет собой диалоговое окно с текстовыми областями, куда пользователь вводит текстовую информацию. На рис. 4 представлен внешний вид утилиты.

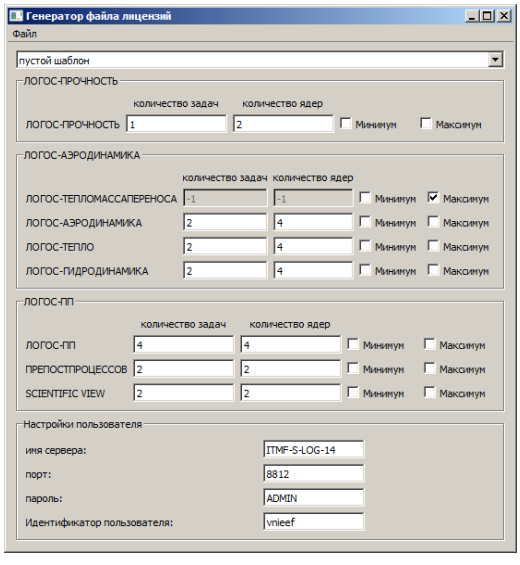


Рис. 4. Внешний вид утилиты генерации лицензионных файлов

Итогом работы утилиты является сгенерированный файл лицензии с подписью в формате JSON.

Веб-консоль управления сервером лицензии

Для управления сервером лицензии была реализована веб-консоль, состоящая из нескольких взаимосвязанных HTML-страниц, схема изображена на рис. 5.

Рис. 5. Схема веб-консоли сервера лицензии

При первом запуске сервера лицензии будет отображен диалог, предлагающий загрузить файл лицензии, изображенный на рис. 6.

При успешной загрузке файла лицензии пользователь будет перенаправлен на страницу аутентификации, изображенную на рис. 7.

После успешной аутентификации, пользователь увидит главную страницу веб-консоли сервера лицензии ЛОГОС, показанную на рис. 8.

С левой стороны на главной странице веб-консоли располагается основное меню, в котором перечислены пункты с названиями страниц доступных пользователю.

На странице "Текущая лицензия" отображено общее количество доступных ресурсов ресурсы, и количество использующихся в настоящее время ресурсов. Пример этой страницы показан на рис. 9.

На странице «Клиенты» отображаются, приложения, выполняющиеся в настоящий момент. Например, на рис. 10 видно, что запущено два совместных расчета.

При переходе на страницу "Статистика" можно увидеть статистику выполнения всех приложений, использующих лицензию, как изображено на рис. 11. Верхняя таблица отображает агрегированную статистику, т. е. общее количество запусков приложения и ядро-часы (т. е. произведение количества используемых ядер на время выполнения). Нижняя таблица отображает название запущенного приложения, которое использовало лицензию, количество используемых ядер, время начала и завершения работы, а также коды запуска и завершения приложения.

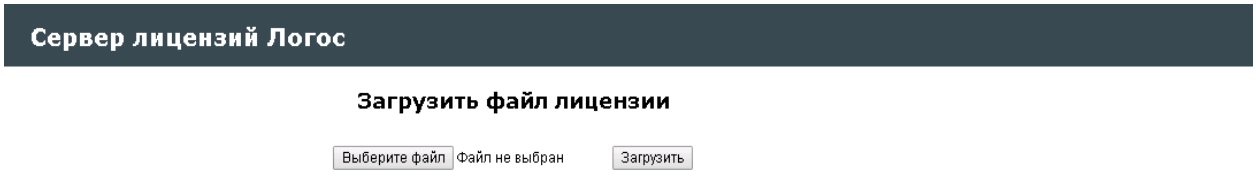


Рис. 6. Диалог загрузки файла лицензии

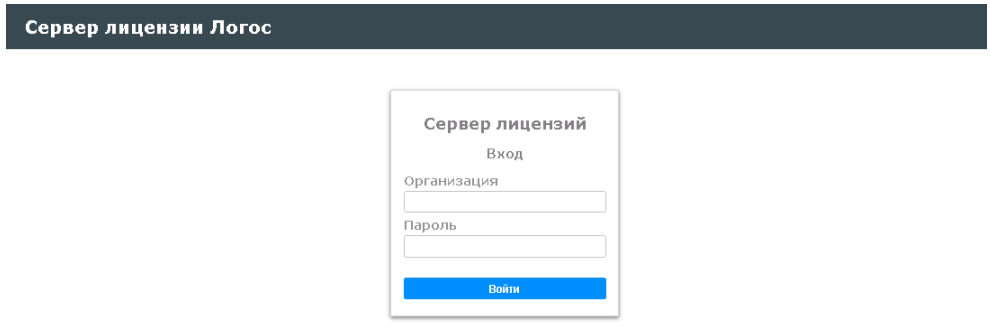


Рис. 7. Страница аутентификации

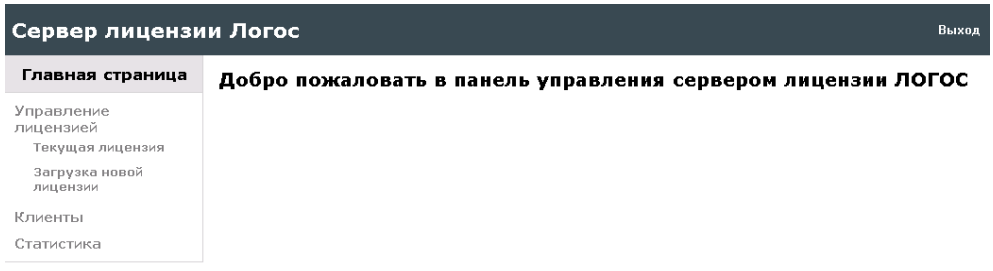


Рис. 8. Главная страница веб-консоли сервера лицензии

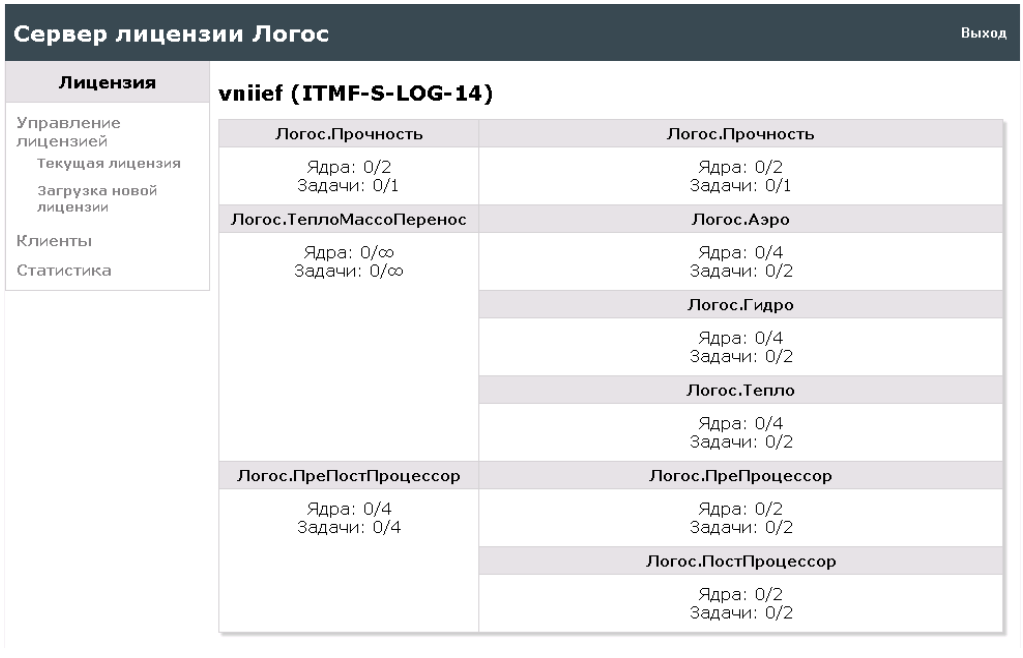


Рис. 9. Сраница, отображающая количество занятых и доступных ресурсов для использования

Рис. 10. Страница "Клиенты", отображающая запущенные в настоящее время приложения

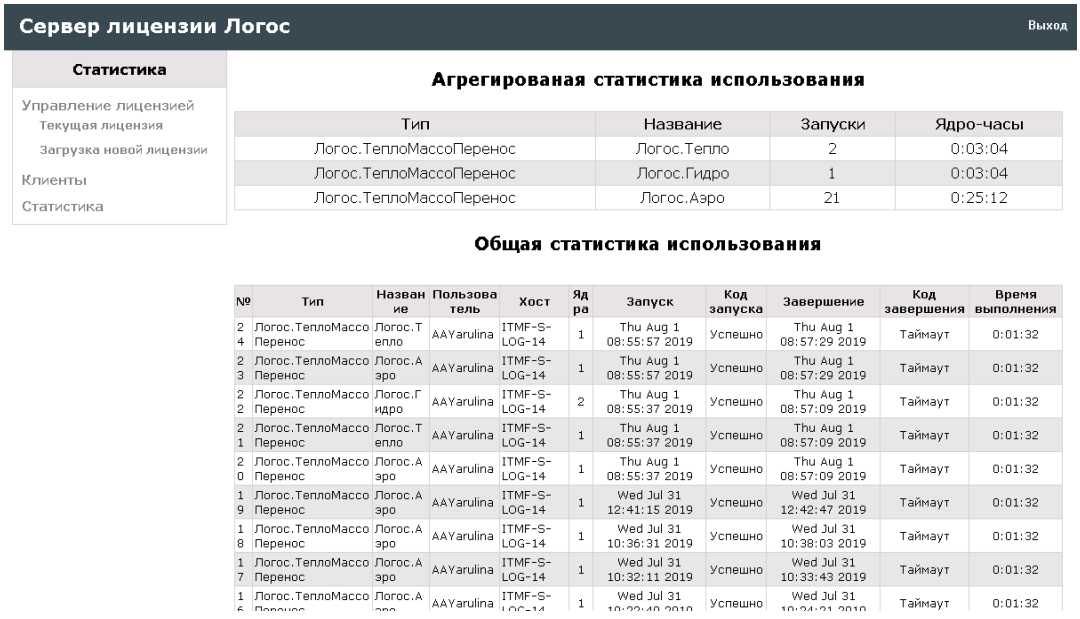


Рис. 11. Страница, отображающая статистику использования всех приложений, использующих лицензию

Особенности работы системы лицензирования под различными ОС

Система лицензирования способна функционировать как под операционными системами семейства Linux, так и под Windows.

Сервер лицензии является сервисом и работает в фоновом режиме. В ОС семейства Linux сервер лицензий запускается как сервис в терминальном окне. Для доступа к веб консоли управления сервера лицензии на экран будет выведен полный адрес для использования в строке браузера, как показано на рис. 12.

```
[root@ne0 ~]# lic_server
LOGOS license server is running…
HTTP server started at http://ne0:3003/
Waiting incoming connection on TCP port 8812
[root@ne0 ~]#
```

Рис. 12. Запуск сервера лицензии в ОС Linux

В ОС Windows при запуске сервера лицензии происходит автоматическое сворачивание приложения в область уведомлений, как изображено на рис. 13. Доступ к веб-консоли управления сервером лицензии осуществляется через браузер путем нажатия правой кнопки мыши на иконке в области уведомлений.

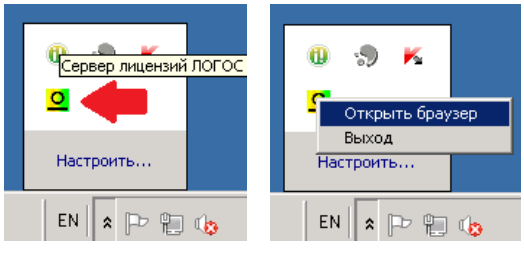


Рис. 13. Иконка сервера лицензии в области уведомлений

Заключение

Разработанная система лицензирования предоставляет возможность контроля использования лицензии программного пакета ЛОГОС. В рамках разработки системы лицензирования были реализованы следующие компоненты:

– сервер лицензии;

– клиентская библиотека сервера лицензии;

– веб-интерфейс и консольная утилита для управления сервером лицензии;

– утилита генерации лицензионных файлов.

Работа выполнена в установленные сроки. Проведены предварительные испытания. По результатам испытаний система лицензирования удовлетворяет заявленным в ТЗ требованиям.

В дальнейшем планируется:

– расширение функциональности ограничения лицензии по времени использования;

– увеличения количества контролируемой информации, содержащейся в статистике использования лицензии ЛОГОС;

– усиление защиты системы лицензирования от несанкционированного доступа к ресурсам лицензии;

– разработка сервера выдачи и учета лицензий.

ВЛИЯНИЕ КОНТРОЛЯ МОЩНОСТИ НА АТМОСФЕРНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЛИНИИ СВЯЗИ ВО ВРЕМЯ СНЕГОПАДА И ДОЖДЯ

Ю. О. Трусова, Н. Н. Вовк, Ю. А. Анисимов, А. В. Овсов, М. А. Царев, Н. Н. Мулин, С. Н. Копылов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Растущий спрос на высокоскоростную связь и услуги с высокой пропускной способностью, а также требования к ограничению энергопотребления привели к определению основных тенденций развития систем и технологий связи. Атмосферная оптическая линия связи (АОЛС, FSO) - это технология прямой видимости, которая передает информационный сигнал лазерным излучением через атмосферный канал вместо оптоволоконных кабелей. Она имеет несколько преимуществ, таких как безлицензионный спектр, большая пропускная способность, высокая скорость передачи данных, простота установки, высокий уровень безопасности и низкие требования к энергопотреблению.

В системе FSO обычно применяют формат двоичной амплитудной модуляции, такой как модуляция с включением-выключением (OOK), из-за его эффективности и простоты. OOK модуляция развернута с модуляцией интенсивности с прямым обнаружением; в передатчике электрический сигнал преобразуется в оптический сигнал путем модуляции интенсивности лазерного источника с использованием схемы модуляции OOK. На приемном конце фотодиод преобразует оптические интенсивности в соответствующий фототок. Схема PPM – еще один популярный формат модуляции, используемый в системах FSO; он более энергоэффективен, чем модуляция OOK, но имеет меньшую эффективность ширины полосы и повышенную сложность демодуляции.

К сожалению, производительность и доступность линии FSO, а также диапазон линии сильно зависят от погоды и атмосферных условий. На беспроводные каналы FSO неблагоприятно влияют различные атмосферные условия, такие как туман, сильный дождь, снег, пыль и дымка; они увеличивают потерю мощности и приводят к ухудшению BER. Чтобы уменьшить замирание канала, в передатчике можно варьировать несколько параметров, таких как тип модуляции, мощность, скорость кодирования и комбинации параметров адаптации.

Рассмотрим системы FSO отдельно для случая дождя и снега. Размер частиц снега находятся посередине между размерами частиц тумана и частиц дождя. Поэтому уровень ослабления из-за снега находится между уровнями для дождя и тумана. Уровень выше, чем с дождем, но ниже, чем с туманом. В этом случае ослабление сравнимо с затуханием в тумане и составляет от 30 до 350 дБ/км.

Модель для снега

Уровень ослабления сигнала при снеге зависит от того, является ли снег сухим или влажным. Сухой снег влияет на канал, когда скорость снегопада низкая, тогда как мокрый снег, влияет на канал, когда скорость снегопада высокая. Затухание определяется на определенном расстоянии и измеряется в дБ/км. Удельное затухание α зависит от скорости снега S мм/ч и определяется по формуле

$$\alpha = aS^b \qquad (1)$$

сухой снег: $a = 5{,}42\cdot10^{-5}\lambda + 5{,}49$, $b = 1{,}37$

мокрый снег: $a = 1{,}02\cdot10^{-4}\lambda + 3{,}78$, $b = 0{,}72$

Модель для дождя

В системе FSO ослабление в дожде особенно велико и сильно зависит от различных моделей распределения капель по размерам. Наиболее часто используемые распределения капель дождя были предложены Маршалом и Палмером. Удельное затухание из-за дождя для беспроводной оптической линии определяется по формуле

$$\gamma = aR^b, \qquad (2)$$

где R – скорость дождя в мм/ч, a и b – параметр закона. Эти параметры зависят от частоты, распределения капель по размерам и температуры дождя.

В сообщениях FSO принимаемая мощность P_r имеет следующее выражение:

$$P_r = P_t \tau_{tx} \tau_{rx} \frac{D^2}{(\theta L)^2} 10^{\frac{-\alpha L}{10}}, \qquad (3)$$

где P_t – мощность передатчика, τ_{tx} и τ_{rx} – эффективность передатчика и приемника, D – диаметр приемника, θ – угол расхождения, L – длина связи.

Отношение сигнал/шум (SNR) для системы оптической связи, использующей лавинный фотодиодный (APD) детектор, составляет

$$SNR = \frac{(R_0 P_r M)^2}{2qBM^{x+2}(R_0 P_r + I_D) + 2qI_L B + 4kTBF / R_{eq}}, \qquad (4)$$

где R_0 – первичная чувствительность APD, M – коэффициент усиления, x – коэффициент избыточности шума, I_D – ток наводки, I_L – ток утечки, q – заряд электрона, k – постоянная Больцмана, B – эквивалентная ширина полосы шума, T – температура системы в Кельвинах, F – коэффициент шума, R_{eq} – эквивалентное сопротивление цепи.

Измеренное значение *SNR* сравнивается с желаемым уровнем ($\gamma = 30$ дБ). Разница между этими двумя значениями квантуется с помощью контроля мощности, и решение контроля мощности (КМ) передается пользователю через канал обратной связи.

$$P_{i+1} = P_i - C\Delta$$
$$C = \begin{cases} -1, \text{ если } \gamma \le \gamma_{th} \\ 1, \text{ если } \gamma > \gamma_{th}, \end{cases} \quad (5)$$

где C – команда КМ, Δ – размер шага.

Производительность системы FSO будет измеряться с помощью BER для двух типов модуляции, модуляции OOK и N-PPM.

$$BER_{OOK} = \frac{1}{2} erfc\left(\frac{1}{2\sqrt{2}}\sqrt{SNR}\right), \quad (6)$$

$$BER_{N-PPM} = \frac{1}{2} erfc\left(\frac{1}{2\sqrt{2}}\sqrt{SNR\frac{N}{2}\log_2(N)}\right). \quad (7)$$

Параметры моделирования представлены в таблице.

Параметры моделирования

Наименование	Значение
Длина волны	850 нм
Мощность передатчика	50–100 мВт
Угол расхождения передатчика	2 мрад
T_x/R_x	0,5
Диаметр приемника	0,1 м
Ток наводки	0,05 нА
Коэффициент усиления	100
Размер шага	5 мВт
Коэффициент избыточности шума	0,5
Ширина полосы шума	25 МГц

На рис. 1 показано ослабление в дожде и снегу для двух типов снега. Сухой снег имеет более высокую степень затухания, чем мокрый. Также можно заметить, что затухание в снегу выше, чем затухание в дожде, из-за большого размера частиц снега. Например, при скорости 10 мм/ч затухание в мокром снегу превышает затухание в дожде на 6 дБ.

Зависимость полученной мощности от расстояния между линиями связи для мокрого снега с затуханием, показана на рис. 2. На рис. 2 видно, что затухание в мокром снегу может снизить принимаемую мощность на 15 дБ на расстоянии 1 км. Использование КМ не влияет на принимаемую мощность при низкой скорости снега 1 мм/ч, но при высокой скорости снега КМ оказывает большее влияние на полученную мощность, особенно при увеличенном расстоянии линии связи.

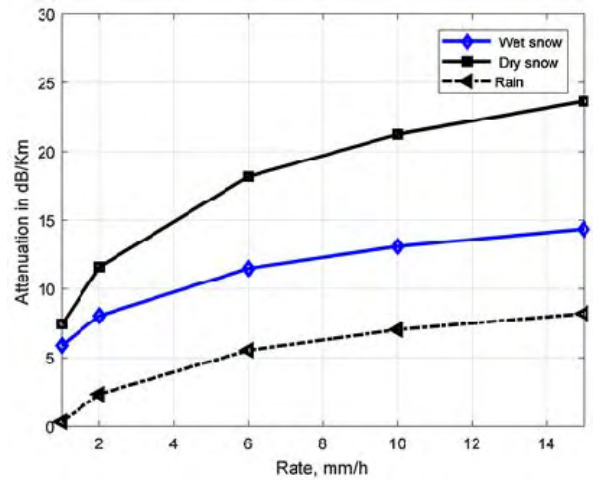


Рис. 1. Затухание сигнала в дожде и снеге

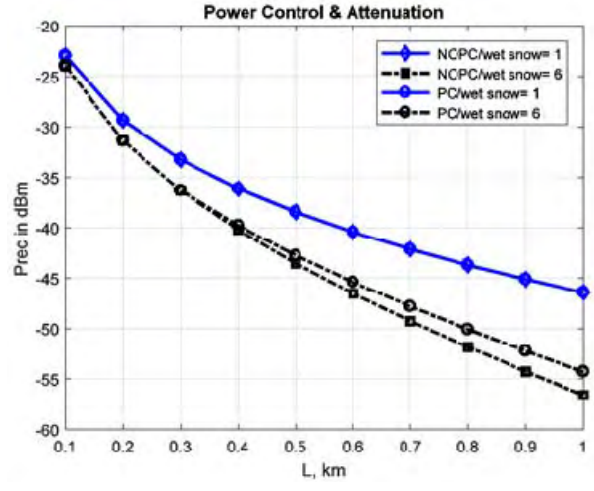


Рис. 2. Принимаемая мощность при мокром снеге

Рис. 3 показывает SNR с КМ во время мокрого снега для двух скоростей снегопада 1 и 6 мм/ч. Использование КМ улучшает SNR для снега со скоростью 6 мм/ч, но не влияет при низкой скорости снега 1 мм/ч. Улучшение очевидно после расстояния 0,4 км и достигает 3 дБ при $L = 1$ км.

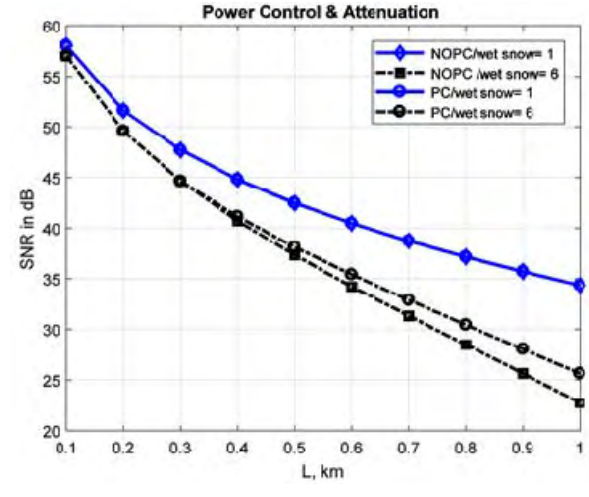


Рис. 3. SNR при мокром снеге

На рис. 4 показано влияние КМ на BER для модуляции OOK. На расстоянии 1 км от линии BER для скорости снега 6 мм/ч оказывается в пределах от $9 \cdot 10^{-3}$ до $6 \cdot 10^{-3}$. BER для низкого уровня снега лучше, чем для более высокого уровня.

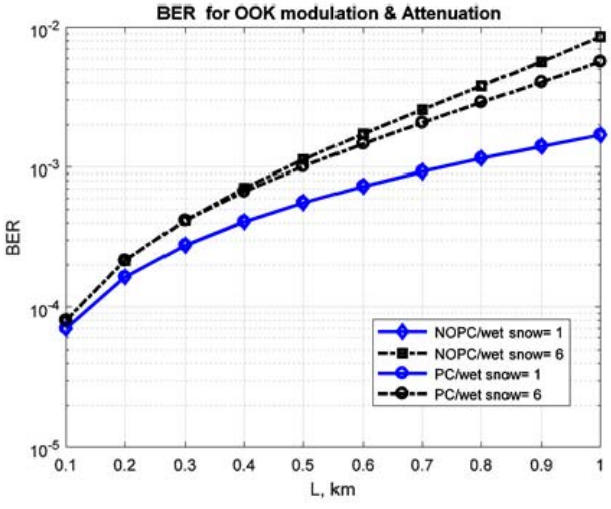


Рис. 4. BER для OOK модуляции для мокрого снега

На рис. 5 сравниваем BER для модуляции OOK с модуляцией 16-PPM для скорости снега, равной 6 мм/ч. КМ улучшает BER для модуляции как 16-PPM, так и OOK, особенно на расстоянии линии связи более 0,6 км. Производительность PPM лучше, чем у OOK-модуляции.

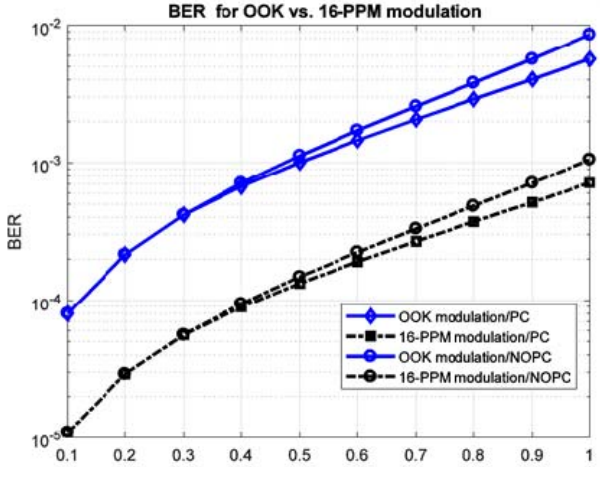


Рис. 5. BER для модуляции OOK и PPM

На рис. 6 показана ОСШ для сухого снега со скоростью 1 и 6 мм/ч. КМ не влияет на SNR для низкой скорости снега, но при высокой интенсивности снега КМ немного улучшает SNR. Сухой снег имеет большее затухание, чем мокрый снег.

На рис. 7 показан эффект ПК с модуляцией OOK для сухого снега при скорости снега 1 и 6 мм/ч.

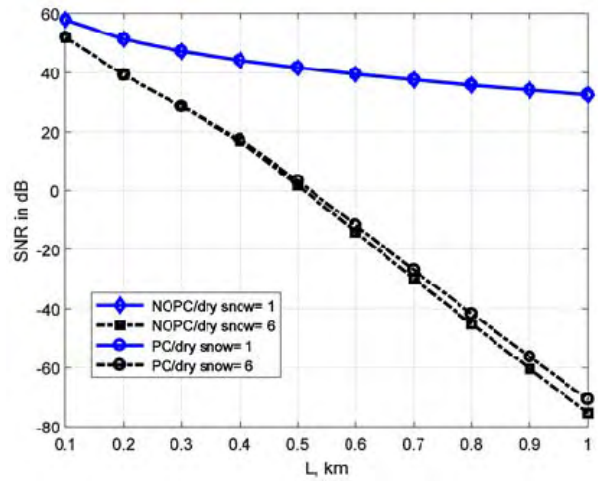


Рис. 6. SNR для сухого снега

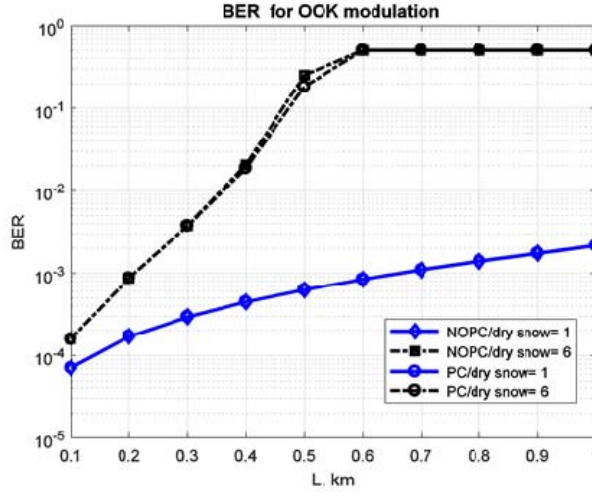


Рис. 7. BER для OOK-модуляции для сухого снега

На рис. 8 показано, что КМ увеличивает принимаемую мощность при ослаблении в дожде на 1 дБ для обеих скоростей дождя при L = 1 км. Кроме того, на рис. 9 показано улучшение SNR с КМ для обеих скоростей дождя.

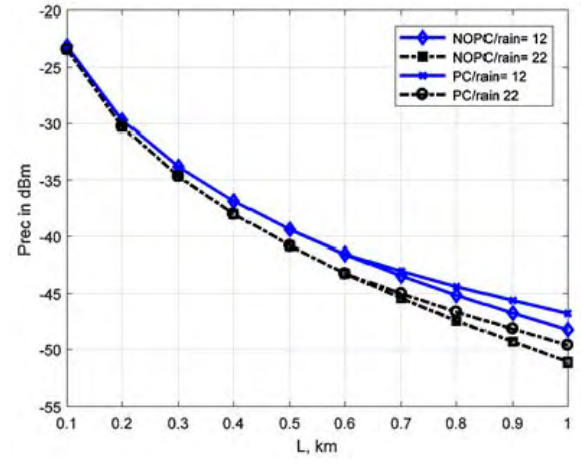


Рис. 8. Принимаемая мощность для дождя

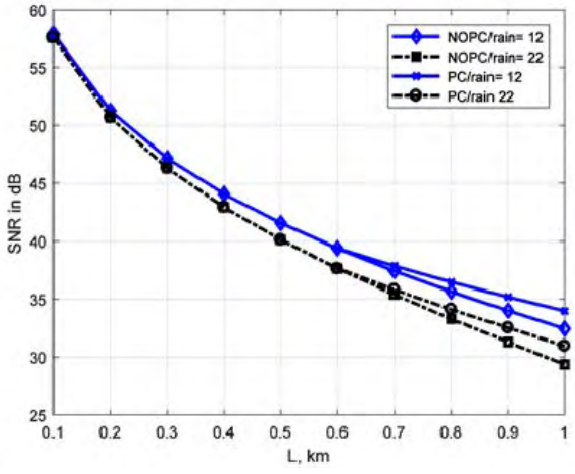


Рис. 9. SNR для дождя

На рис. 10 показан BER для модуляции OOK при затухании в дожде, видно улучшением от $3{,}6\cdot10^{-3}$ до $2{,}6\cdot10^{-3}$ при $L = 1$ км. На рис. 11 показано, что 16-PPM превосходит модуляцию OOK.

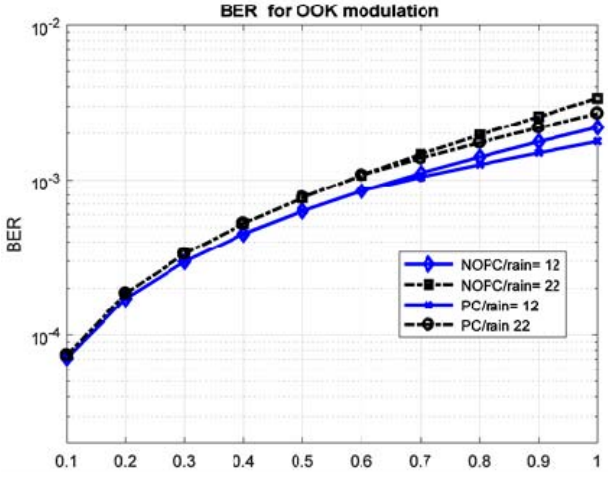


Рис. 10. BER для OOK модуляции при дожде

Система связи FSO – это развивающаяся технология, которая обещает решить проблему узкой полосы пропускания. Однако, погодные условия, такие как снег и дождь, сильно ослабляют канал связи и ухудшают производительность системы. Различные сценарии адаптации были предложены для использования в связи FSO, и один из них – передатчик контроля мощности. В этой статье мы исследовали влияние КМ передатчика на BER для модуляции OOK и PPM во время их ослабления при снеге и дожде. Результаты показывают, что КМ может улучшить BER для сильного мокрого снегопада, но почти не влияет на качество связи FSO при сухом снегопаде. КМ также улучшает канал связи и BER во время высокого уровня осадков. BER для PPM модуляции лучше, чем для OOK модуляции.

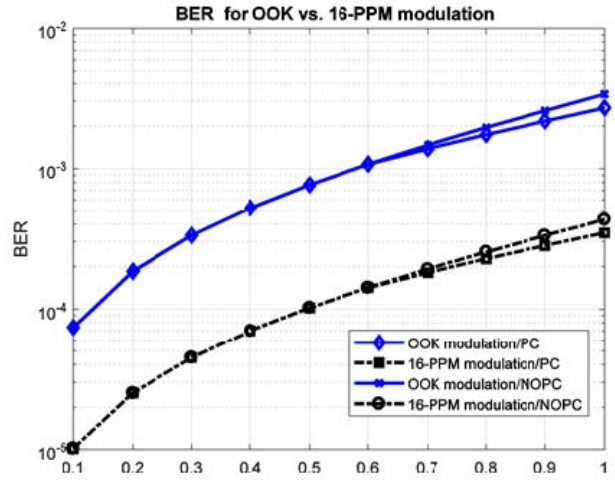


Рис. 11. Сравнение BER для модуляции OOK и PPM при дожде

Литература

1. Elganimi T.Y. Performance Comparison between OOK, PPM and PAM Modulation Schemes for Free Space Optical (FSO) Communication Systems: Analytical Study. International Journal of Computer Applications. 2013. T. 79.P. 22–27.

2. Hassan N. B. and Matinfar M. D. On the Implementation Aspects of Adaptive Power Control Algorithms in Free-Space Optical Communications. Iran Workshop on Communication and Information Theory (IWCIT), Tehran, 2014. P. 1–5.

3. Prediction Methods Required for the Design for Terrestrial Free-Space Optical Links. Recommendation ITU-R. 2007. P. 1814.

4. Zhang W. and Moayeri N. Power-Law Parameters of Rain Specific Attenuation. 2011.

МЕХАНИЗМ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ ФУНКЦИЙ МОДУЛЬНОЙ ИНТЕГРАЦИОННОЙ ПЛАТФОРМЫ ЛОГОС

А. А. Тюндина, Н. А. Побуринная, Д. А. Кожаев

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Пользовательская функция (ПФ) – это функция обратного вызова, разработанная пользователем, вызываемая расчетным модулем в процессе расчета физической задачи. Механизм ПФ предоставляет возможность изменять поведение существующего расчетного модуля (solver).

Модульная интеграционная платформа ЛОГОС (ЛОГОС-МИП) предназначена для решения ряда задач в рамках пакета программ «ЛОГОС», в том числе для динамического подключения пользовательских функций (ПФ) для расчетных задач и для внесения изменений в стандартные параметры задачи в процессе моделирования.

В основе механизма ПФ ЛОГОС-МИП лежит механизм функций обратного вызова – в расчетном модуле реализуются коннекторы ПФ, которые инициализируются в процессе расчета ПФ из динамических библиотек, после чего вызываются в определенных местах расчетного модуля.

Коннектор ПФ – это указатель на функцию, с помощью которого производится вызов пользовательской функции, в которой может быть сохранен адрес любой пользовательской функции с соответствующим интерфейсом.

Механизм ПФ ЛОГОС-МИП обладает следующими особенностями:

– настройка подключения ПФ происходит с помощью графического интерфейса ЛОГОС-МИП;

– отсутствие ограничения по наименованию динамических библиотек;

– отсутствие ограничения по наименованию ПФ и их размещению в динамических библиотеках;

– загрузка динамических библиотек в момент расчета и связывание ПФ с расчетным модулем происходит с помощью модуля сопряжения ЛОГОС-МИП.

Описание механизма пользовательских функций ЛОГОС-МИП

Общая схема механизма ПФ ЛОГОС-МИП представлена на рис. 1.

Для использования механизма ПФ ЛОГОС-МИП необходимо:

– определить API коннекторов ПФ;

– создать коннекторы ПФ;

– определить места вызовов ПФ;

– вызвать ПФ, используя коннекторы ПФ;

– описать API коннекторов ПФ с помощью тегов Doxygen [1] в исходных кодах расчетного модуля;

– создать SPEC-файл (файл спецификации XML-формата [2]) с описаниями API коннекторов ПФ с помощью специальной утилиты, входящей в состав ЛОГОС-МИП;

– разработать ПФ в отдельной динамической библиотеке, с учетом API коннекторов ПФ расчетного модуля;

– описать API ПФ с помощью тегов Doxygen в исходных кодах ПФ;

– создать SPEC-файл с описаниями API ПФ с помощью специальной утилиты, входящей в состав ЛОГОС-МИП.

Настройка подключения ПФ к задачам расчетного модуля происходит с помощью графического интерфейса Интегратора, входящего в состав ЛОГОС-МИП.

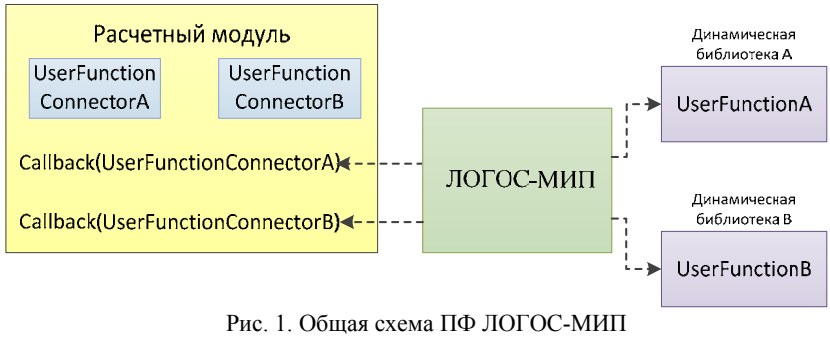


Рис. 1. Общая схема ПФ ЛОГОС-МИП

Для настройки подключения ПФ к задачам расчетного модуля необходимо передать в Интегратор SPEC-файлы коннекторов ПФ расчетного модуля и SPEC-файлы используемых ПФ, как показано на рис. 2.

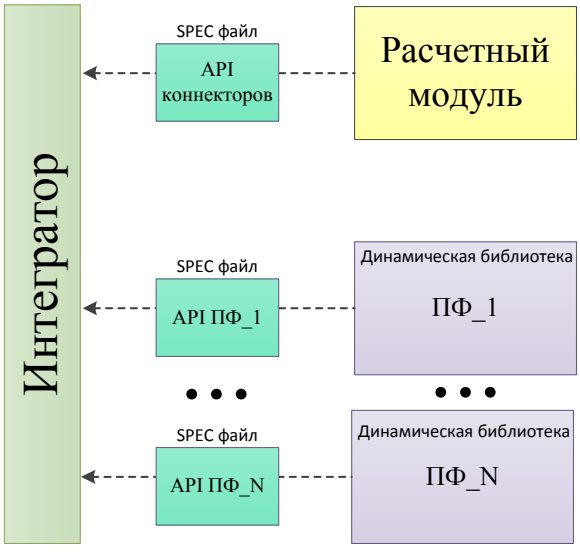


Рис. 2. Передача SPEC-файлов в Интегратор

Используя доступные SPEC-файлы, Интегратор предоставляет пользователю возможность конфигурировать соединение расчетного модуля и ПФ. На основе настройки параметров взаимодействия расчетного модуля с ПФ, Интегратор создает YAML-файл [3] конфигурации ccf.yaml с описанием связей коннекторов и соответствующих ПФ.

Общая схема конфигурирования ПФ ЛОГОС-МИП представлена на рис. 3.

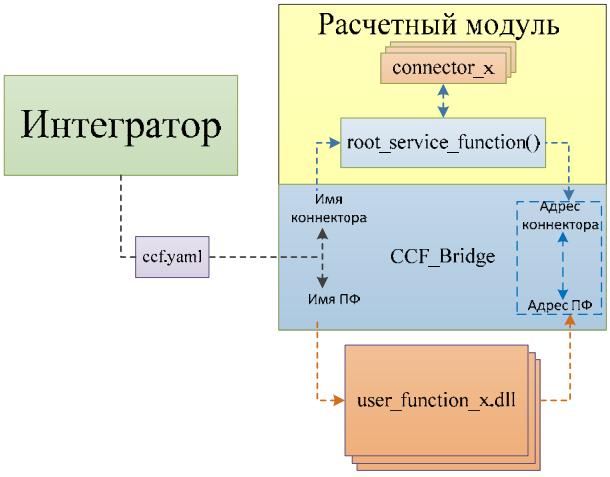


Рис. 3. Общая схема конфигурирования ПФ ЛОГОС-МИП

Интегратор передает файл конфигурации ccf.yaml в модуль CCF_Bridge. При запуске приложения расчетного модуля инициализируется модуль CCF_Bridge и ему передается указатель на функцию root_service_function.

Модуль CCF_Bridge передает в функцию root_service_function имя используемого коннектора ПФ, и получает из этой функции указатель на соответствующий коннектор.

Модуль CCF_Bridge загружает нужные динамические библиотеки с ПФ, и инициализирует указатели коннекторов ПФ адресами соответствующих ПФ. Во время расчета задачи расчетный модуль вызывает ПФ, обращаясь к проинициализированным коннекторам ПФ.

Создание SPEC-файлов

SPEC-файл – это файл спецификации XML формата, используемый Интегратором для получения информации о различных модулях.

Для формирования SPEC-файлов исходные коды ПФ и коннекторов ПФ должны быть описаны с помощью тегов Doxygen. Для описания ПФ и коннекторов ПФ были созданы теги user_function и user_function_connector, соответственно. С помощью тегов Doxygen можно дать описание функции и ее интерфейса.

SPEC-файл с описанием API ПФ создается с помощью специальной утилиты specgen, входящей в состав ЛОГОС-МИП. Алгоритм подготовки SPEC-файлов представлен на рис. 4.

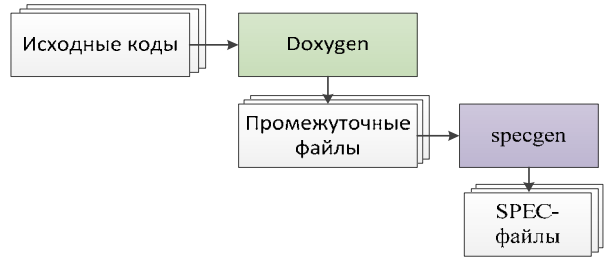


Рис. 4. Алгоритм подготовки SPEC-файлJD

Исходные коды на первом этапе поступают на вход в программу Doxygen. В результате работы Doxygen формирует промежуточные файлы, которые передаются в утилиту specgen. В результате работы утилита specgen создает SPEC-файлы.

Для формирования SPEC-файлов исходные коды ПФ и коннекторов ПФ должны быть описаны с помощью тегов Doxygen. Для описания ПФ и коннекторов ПФ были созданы теги user_function и user_function_connector, соответственно. С помощью тегов Doxygen можно дать описание функции и ее интерфейса.

В SPEC-файл ПФ записывается следующая информация:

- имя библиотеки, в которой находится ПФ;
- имя ПФ;
- описание ПФ;
- интерфейс ПФ и описание к нему.

В SPEC-файл расчетного модуля записывается следующая информация о коннекторах ПФ:

– имя коннектора ПФ;
– описание коннектора ПФ;
– интерфейс коннектора ПФ и описание к нему.

Графический интерфейс настройки подключения ПФ

Настройка подключения ПФ к задачам расчетного модуля происходит с помощью графического интерфейса Интегратора.

Используя доступные SPEC-файлы, Интегратор предоставляет пользователю возможность конфигурировать для расчетной задачи соединение расчетного модуля и ПФ.

Конфигурирование соединения коннекторов ПФ расчетного модуля и ПФ в Интеграторе происходит в специальном диалоге настройки ПФ, в котором пользователь из предложенного списка может выбрать соответствие коннектора ПФ расчетного модуля и доступной ПФ.

Список доступных коннекторов ПФ и ПФ формируется исходя из информации, полученной из спецификаций доступных расчетных модулей и ПФ.

Для каждой задачи пользователь выбирает соответствие коннекторов ПФ и ПФ. Пример графического интерфейса настройки подключения пользовательских функций к расчетному модулю показан на рис. 5.

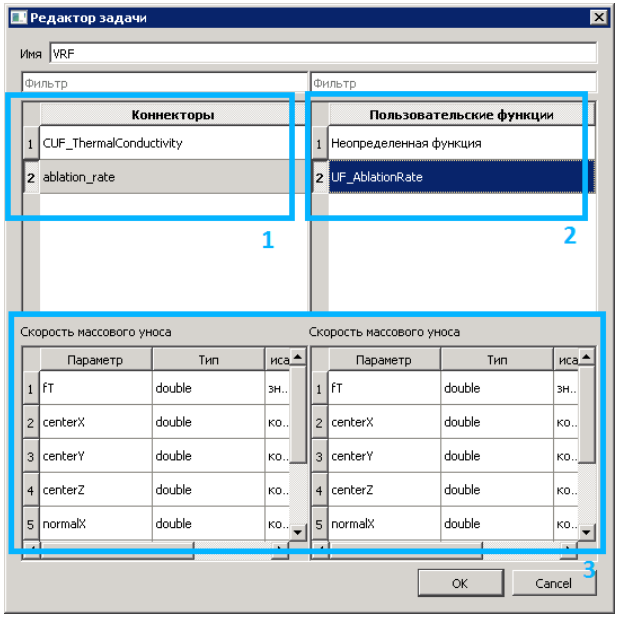


Рис. 5. Внешний вид диалога настройки пользовательских функций

Диалог настройки пользовательских функций и состоит из:

– таблицы коннекторов ПФ (1), которая формируется «Интегратором» на основе спецификации расчетного модуля решаемой задачи;

– таблицы подключаемых к коннекторам ПФ (2), которая формируется «Интегратором» для каждого коннектора на основе спецификации пользовательских функций;

– таблиц описания коннектора/ПФ (3).

Чтобы настроить связь «коннектор-ПФ», пользователю необходимо выбрать коннектор и ПФ, соответствующую ему по интерфейсу. «Интегратор» запоминает выбранный элемент. Для каждого коннектора возможен выбор только одной пользовательской функции из списка доступных ПФ.

После завершения конфигурации, Интегратором создается список связей, типа «коннектор – ПФ», который сохраняется в структуры данных «Интегратора».

На основе настройки параметров взаимодействия расчетного модуля с ПФ, Интегратор создает файл конфигурации ccf.yaml, который является неотъемлемой частью подготовленной задачи.

В файле ccf.yaml для каждой пары соответствия коннектора и ПФ Интегратором формируются следующие поля:

– dll_name – имя динамической библиотеки, в которой расположена ПФ;
– connector_name – имя коннектора ПФ;
– function_name – имя ПФ.

Подготовленный файл конфигурации передается модулю CCF_Bridge и используется им на стадии инициализации расчета.

Модуль сопряжения CCF_Bridge

Связывание ПФ и расчетного модуля обеспечивает модуль CCF_Bridge. Модуль CCF_Bridge реализован в виде статической библиотеки, которая связывается (линкуется) с исполняемым файлом расчетного модуля на стадии сборки приложения.

Основными задачами модуля сопряжения в рамках использования механизма ПФ функций являются:

– загрузка YAML-файла с информацией о динамических библиотеках подключаемых ПФ и связях коннекторов с соответствующими ПФ;

– загрузка динамических библиотек с подключаемыми ПФ;

– получение из расчетного модуля указателей на коннекторы и связывание их с соответствующими ПФ.

Заключение

Реализованный механизм ПФ ЛОГОС-МИП обладает следующими особенностями:

– настройка механизма ПФ производится с помощью графического интерфейса ЛОГОС-МИП;

– отсутствие ограничения по наименованию ПФ и их размещению в динамических библиотеках;

– загрузка динамических библиотек и связывание ПФ с расчетным модулем происходит с помощью модуля CCF_Bridge.

Применение механизма ПФ ЛОГОС-МИП позволяет расширить возможности расчетного модуля, например:

– позволяет инициализировать различные параметры в момент начала расчета (поля скоростей, давления, температур и т. д.);

– позволяет изменять значения различных параметров в процессе расчета (значения плотности, коэффициента теплопроводности, скорости массового уноса материала и т. д.).

Литература

1. Doxygen [Electronic resource]: standard tool for generating documentation / Dimitri van Heesch. [1997–2016]. Modef access: http://www.stack.nl/~dimitri/doxygen/manual/xmlcmds.html.

2. XML [Electronic resource]: standard of XML document / World Wide Web Consortium. [2000–2007]. Mode of access: https://www.w3.org/XML.

3. YAML Ain't Makeup Language [Electronic resource]: data serialization standard / Evans Clark. [S.l.], YAML 10, 2009. Mode of access: http://yaml.org/spec/1.2/spec.html

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОРМИРОВАТЕЛЙ СИГНАЛОВ НА БАЗЕ ЦИФРОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИНТЕЗАТОРОВ

В. И. Долгов, А. П. Мартынов, Д. А. Хазов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

К современным радиотехническим системам формирования сигналов предъявляются противоречивые требования – увеличение выходной частоты и улучшение шумовых свойств выходного сигнала. Развитие элементной базы и совершенствование вычислительной техники привело к созданию цифровых вычислительных синтезаторов (ЦВС). Работа данных синтезаторов частот основана на использовании метода прямого цифрового синтеза. Выходной сигнал таких синтезаторов формируется с помощью цифровой обработки из базового тактового сигнала.

ЦВС обладают множеством преимуществ перед традиционными системами синтеза частот. Это практически мгновенная перестройка частоты в пределах сетки частот без разрыва фазы выходного колебания, возможность создания сетки частот с очень малым шагом перестройки (до тысячных долей Гц), программное управление перестройкой частоты, легкость создания фазовой и частотной модуляции и манипуляции. Кроме того, синтезаторы частоты данного типа обладают достаточно низким уровнем фазовых шумов. Поэтому цифровые вычислительные синтезаторы имеют большую популярность в системах синтеза и широко применяются во множестве современных радиосистем и устройств.

Однако недостатком ЦВС на современном этапе является ограниченная выходная частота, которая не превышает 1500 МГц. Так ЦВС компании Analog Devices – AD9910 – имеет тактовую частоту 1,0 ГГц, соответственно, и встроенный в ЦВС умножитель тактовой частоты, построенный на методе импульсно-фазовой автоподстройки частоты (ИФАПЧ) с коэффициентом умножения до 127. Во многих радиосистемах требуется сформировать сигналы с большей частотой, чем у цифровых вычислительных синтезаторов. Поэтому применяются разнообразные способы повышения выходной частоты ЦВС.

Для повышения выходной частоты ЦВС широко используется умножение выходной частоты, приводящее к значительному возрастанию уровня фазовых шумов. Пример структурной схемы такого формирователя высокочастотных сигналов приведен на рис. 1.

УЧ1 обычно входит в состав интегральных ЦВС в виде системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Ф служит для выделения в спектре нужной частоты. УЧ2 представляет собой последовательно соединенные транзисторные каскады с коэффициентами 2, 3 или 5.

Главный недостаток такой схемы в том, что для существенного увеличения выходной частоты формирователя требуется большой коэффициент умножения n_2 каскадов выходного умножителя частоты. Это приводит к значительному ухудшению шумовых характеристик формирователя, так как спектральная плотность мощности (СПМ) фазовых шумов ЦВС умножается на $(n_2)^2$. Также из-за выходного умножителя частоты происходит расширение шага сетки частот, увеличивается девиация частоты при частотной модуляции, при большом коэффициенте умножения количество каскадов растет, требуется добавлять между транзисторными умножителями частоты дополнительные усилители.

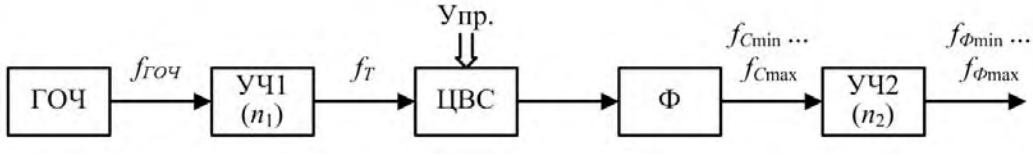


Рис. 1. Структурная схема формирователя сигналов с ЦВС: ГОЧ – генератор опорной частоты; УЧ1 – умножитель тактовой частоты ЦВС; n_1 – коэффициент умножения тактового умножителя; ЦВС – цифровой вычислительный синтезатор; Ф – фильтр на выходе ЦВС; УЧ2 – выходной умножитель частоты; n_2 – коэффициент умножения выходного умножителя

ЦВС с использованием образов основной частоты

Особенностью прямого цифрового синтеза является то, что в спектре выходного сигнала цифроаналогового преобразователя (ЦАП) ЦВС присутствуют копии спектра сигнала основной синтезируемой частоты - продукты зеркального отображения ее гармоник относительно частоты тактового сигнала. В англоязычной литературе данные побочные компоненты спектра имеют название images имиджи, более точным вариантом перевода, передающим смысл термина, являются «образы». Использование указанных побочных компонентов выходного спектра ЦВС, лежащих за пределами частоты Найквиста, может позволить решить проблему ограничения максимальной выходной частоты синтезатора и роста фазовых шумов на ней.

Компоненты спектра, для которых номер образа n принимает отрицательные значения, являются обратными по отношению к основной частоте ЦВС и называются отрицательными образами основной частоты. Соответственно, остальные компоненты спектра, вызванные работой ЦАП, для которых n принимает положительные значения, называются положительными образами основной частоты ЦВС. Выходной сигнал ЦВС содержит частоты

$$f_{\text{обр}\,n} = |n|\, f_T + \operatorname{sgn}(n)\, f_{\text{осн}}, \qquad (1)$$

где $f_{\text{осн}}$ – основная частота ЦВС; $n = \pm 1, \pm 2, \ldots$ – номера образов основной частоты; sgn(x) – функция выделения знака аргумента x.

В подавляющем большинстве случаев от данных паразитных спектральных составляющих избавляются с помощью фильтров низкой частоты (ФНЧ), через которые пропускают выходной сигнал ЦАП (рис. 1). Однако существует возможность использования образов для повышения частоты выходного сигнала ЦВС и формирователей на их основе. Для выделения необходимого побочного компонента с частотой соответствующего образа необходимо использовать полосовой фильтр.

Для повышения выходной частоты ЦВС целесообразно использовать только образы основной спектральной компоненты, поскольку амплитуды гармоник и тем более их образов будут близки к уровню других паразитных спектральных составляющих и недостаточными для дальнейшего выделения и преобразования.

Весьма полезной особенностью использования образов основной частоты ЦВС является тот факт, что фазовый шум для побочного компонента остается таким же, как и для спектральной компоненты основного выходного сигнала. В результате уровень фазового шума синтезатора будет определяться его шумовыми характеристиками не на частоте, выделяемой полосовым фильтром, а в более низкочастотной области.

Огибающая спектра выходного сигнала ЦВС и спектральный состав приведены на рис.2. Для применения образов основной частоты необходимо учитывать, что выбросы и нелинейность ЦАП, включенного на выходе ЦВС, могут быть причиной возникновения прочих побочных компонентов, которые могут попасть в нужный нам частотный диапазон. Притом, огибающая спектра выходного сигнала ЦВС изменяется в соответствии с частотной характеристикой ЦАП.

$$K_{\text{ЦАП}}(f) = \left|\sin c\left(\pi \frac{f}{f_T}\right)\right| = \left|\sin\left(\pi \frac{f}{f_T}\right)\right| \Big/ \left(\pi \frac{f}{f_T}\right). \qquad (2)$$

Это повлечет уменьшение амплитуды образов в сравнении с основной выходной частотой $f_{\text{ЦВС}}$. В итоге отношение сигнал/шум при использовании побочных компонентов уменьшается.

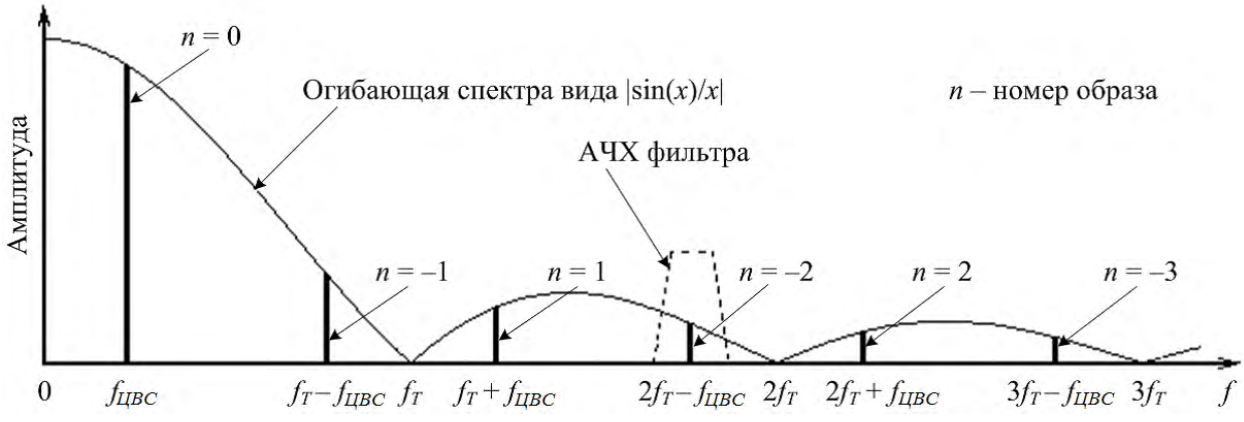


Рис. 2. Спектральный состав выходного сигнала ЦВС

Постановка задачи

В данной работе исследуется схема формирователя сигналов с использованием образов основной частоты ЦВС, которая также позволяет увеличить частоту выходного сигнала ЦВС. Исследований по этому вопросу проведено немного [1–3], поэтому работа является актуальной.

Задачами исследований являлись:

– разработка обобщенной схемы формирователя сигналов, оптимальной для использования образов основной частоты;

– анализ выходного сигнала формирователя, его спектра, а также побочных составляющих;

– расчет параметров формирователя сигналов радиосистемы с использованием образов основной частоты ЦВС (частотное планирование);

– математическое моделирование и экспериментальные измерения СПМ фазовых шумов формирователя сигналов на образах основной частоты ЦВС;

– анализ теоретических и экспериментальных данных;

Результаты частотного планирования

Проведем частотное планирование $f_{\text{обр}}$ для f_{Φ} = 3, 18 ГГц, на примере ЦВС AD9910. Зададим параметры формирователей сигналов:

– тактовая частота: $60 \le f_T \le 1000$ МГц,

– частота ГОЧ: $f_{\text{ГОЧ}} = 24$ МГц,

– диапазон значений $K_{\text{ЦВС}}$:

$$0{,}15 \le K_{\text{ЦВС}} \le 0{,}35.$$

Рассчитаем диапазон значений $n_1 = n_{1\min} ... n_{1\max}$ по формулам (2, 3)

$$f_T = n_1 f_{\text{ГОЧ}}, \qquad (3)$$

$$n_{1\min} = trunc(60/24),\ n_{1\min} = 2,$$

$$n_{1\max} = trunc(1000/24),\ n_{1\max} = 41.$$

Умножитель тактовой частоты может быть внешний, выполненный на транзисторных каскадах. В этом случае тактовая частота AD9910 изменяется в пределах 60–1000 МГц. При частоте ГОЧ 24 МГц коэффициент n_1 = 2…41. В случае, если умножитель частоты встроенный, на системе ФАПЧ, тактовая частота ЦВС AD9910 будет ограничена диапазоном 1400…1500 МГц. Соответственно, для $f_{\text{ГОЧ}}$ = 24 МГц коэффициент n_1 = 59…63. Алгоритм и формулы для частотного планирования были разработаны ранее [4]. Результаты, учитывающие особенности ЦВС AD9910 приведены в табл. 1 и табл. 2.

Из табл. 1 и табл. 2 видно, что частоты выходного сигнала ЦВС на образах существенно отличаются друг от друга. Частота выходного сигнала ЦВС AD9910 при использовании образов и максимальной тактовой частоты достигает 4500 МГц. Коэффициент умножения выходного умножителя в таком случае равен 4. Для получения образа использовалась основная частота 1125 МГц. Если не использовать образы, коэффициент n_2 на такой частоте – 75. Так, использование образов позволяет уменьшить коэффициент умножения в девятнадцать раз. Число каскадов выходного умножителя уменьшается до двух удвоителей частоты.

Таблица 1

Частоты образов и коэффициенты n_2 для f_{Φ} = 3 ГГц, $f_{\text{ГОЧ}}$ = 24 МГц

	$f_{\text{обр}}$, МГц; $f_{\text{ГОЧ}}$ = 24 МГц, f_{Φ} = 3 ГГц								n_2, $f_{\text{ГОЧ}}$ = 24 МГц, f_{Φ} = 3 ГГц					
n n_1	10	15	20	25	30	35	40	41	10	15	20	25	30	35
–3	0	1000	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0
–2	428	600	0	1000	0	1500	0	0	7	5	0	3	0	2
–1	176	272	375	428	750	600	750	750	17	11	8	7	6	5
0	60	90	120	150	230	214	230	230	50	33	25	20	17	14
1	300	428	600	750	0	1000	0	0	10	7	5	4	0	3
4	1000	1500	0	0	0	0	0	0	3	2	0	0	1	0

Таблица 2

Частоты образов и коэффициенты n_2 для f_{Φ} = 18 ГГц, $f_{\text{ГОЧ}}$ = 24 МГц

	$f_{\text{обр}}$, МГц; $f_{\text{ГОЧ}}$ = 24 МГц, f_{Φ} = 18 ГГц							n_2, $f_{\text{ГОЧ}}$ = 24 МГц, f_{Φ} = 18 ГГц						
n n_1	10	15	20	25	30	35	40	10	15	20	25	30	35	40
–5	1125	0	2250	0	0	0	4500	16	0	8	0	0	0	4
–4	900	1385	1800	2250	0	0	3600	20	13	10	8	0	0	5
–3	666	1000	1286	1636	2000	2250	2571	27	18	14	11	9	8	7
–2	418	620	857	1059	1286	1500	1636	43	29	21	17	14	12	11
–1	180	268	360	450	545	620	720	100	67	50	40	33	29	25
0	60	90	120	150	180	209	240	300	200	150	120	99	86	75
1	300	450	600	750	900	1059	1200	60	40	30	24	20	17	15
2	545	818	1059	1385	1636	0	2250	33	22	17	13	11	0	8
3	782	1200	0	2000	0	0	0	23	15	0	9	0	0	0
4	1000	1500	2000	2571	3000	3600	0	18	12	9	7	6	5	0

Однако при частотном планировании реального формирователя сигналов требуется учитывать, что значения коэффициентов умножения n_2 выходного умножителя частоты ЦВС должны быть кратны 2, 3 и 5. В остальных случаях в качестве выходного умножителя с коэффициентом n_2 необходимо использовать умножитель на системе ФАПЧ, аналогичный умножителю тактовой частоты, встроенному в интегральный ЦВС на основе системы ФАПЧ. Диапазон значений коэффициента умножения n_1 тактового умножителя определяется диапазоном частот генератора, управляемого напряжением, и частотой ГОЧ.

Результаты исследования фазового шума

Любой источник сигнала имеет определенную нестабильность частоты, проявляющуюся в виде паразитной фазовой модуляции случайного характера, ухудшающие спектральную чистоту данного сигнала. Одним из важнейших критериев оценки стабильности частоты является фазовый шум, в цифровых системах проявляется в виде случайных быстрых (с частотой 10 Гц и более) изменений местоположения фронтов цифрового сигнала во времени, что приводит к нарушению синхронизации, и, как следствие, искажению передаваемой информации. Исследования фазового шума представляют сложную задачу, поскольку спектр фазовых шумов сгенерированного колебания при прохождении через узлы устройства может существенно видоизменяться.

Существует несколько подходов к количественной оценке фазовых шумов, но наиболее широко распространенной мерой, характеризующей их уровень, является СПМ $S\varphi(F)$ в заданной полосе частот, характеризуемой отношением мощности фазовых шумов на частоте F одной боковой полосы в полосе частот 1 Гц к мощности сигнала. В международных стандартах принято указывать не СПМ самих фазовых шумов, а выраженный в децибелах относительный уровень СПМ шумовой части энергетического спектра выходного колебания при отстройках от несущей, равных F по абсолютному значению. Эту величину называют СПМ фазового шума в одной боковой полосе, она указывается в справочных данных и измеряется в дБ/Гц.

Определение СПМ фазовых шумов возможно как с помощью методов математического моделирования, так и экспериментальными методами.

Метод прямого измерения является самым простым и удобным способом быстрой и качественной оценки источников сигналов с относительно высоким уровнем фазовых шумов. Метод основан на том, что сигнал от измеряемого устройства подается на анализатор спектра, который настроен на частоту данного сигнала и выполняет непосредственное измерение относительной СПМ его фазовых шумов.

Методика для измерения фазовых шумов на образах основной частоты идентична методике измерения на основной частоте. Отличие для образов основной частоты заключается в особенности анализатора сигнала, прибор автоматически выбирает самую мощную гармонику и строит фазовые шумы только для нее. Соответственно самая высокая гармоника будет основная частота, а так как нам нужно построить на образах, было принято решение построить полосовой LC фильтр. Этот фильтр должен выделять необходимые гармоники, ненужные побочные составляющие будут подавлены на 20 дБ. Схема фильтра со значениями индуктивностей и емкостей приведена на рис. 3.

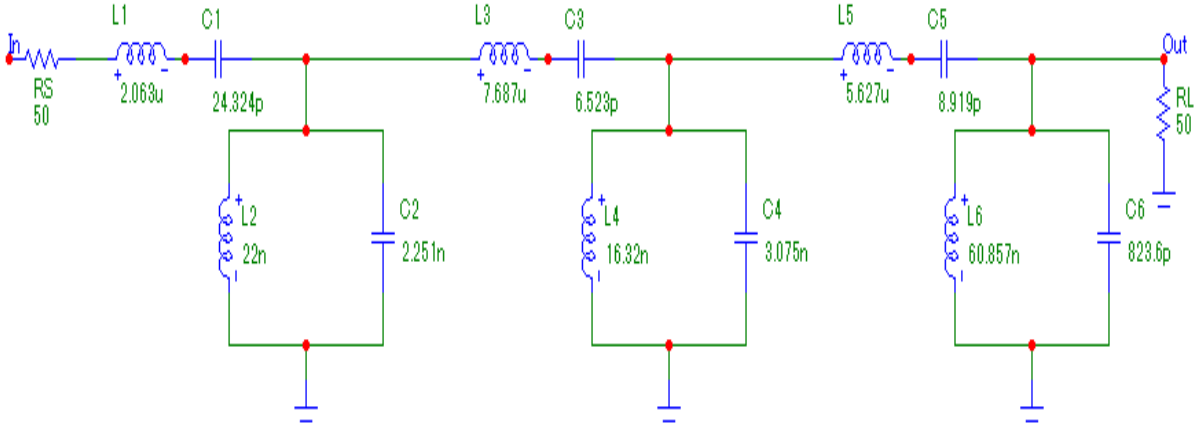


Рис. 3. Схема электрическая принципиальная LC-полосового фильтра

Проведем математическое моделирование СПМ фазовых шумов формирователей сигналов со встроенным умножителем тактовой частоты на системе ФАПЧ в соответствии с формулой (4), [2, 3].

$$S_{\Phi_1}(F) = \left(S_{\text{ФАПЧ}} \left(K_{\text{ЦВС}} + n \right)^2 + S_{\text{ЦВС_обр}} \left(F \right) \right) n_{2_1}^2 + S_{\text{УЧ2}}(F). \quad (4)$$

Сравнение фазовых шумов AD9910 для тактовой частоты 120 МГц при $K_{ЦВС}$= 0,25 для n = 0, –1, –2, –3 приведено на рис. 4 и 5 для n = 0, 1, 2.

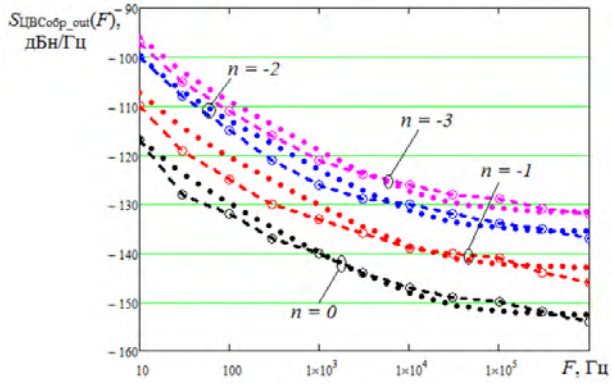


Рис. 4. СПМ фазовых шумов ЦВС AD9910 на образах основной частоты при тактовой частоте 120 МГц, n = 0, –1, –2, –3 (сплошные точки – моделирование, штриховые линии с символом окружности – эксперимент)

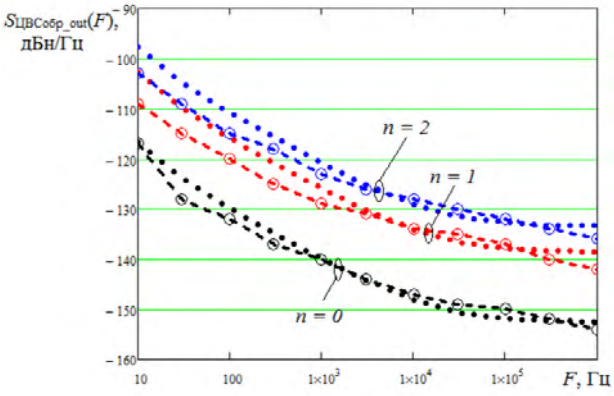


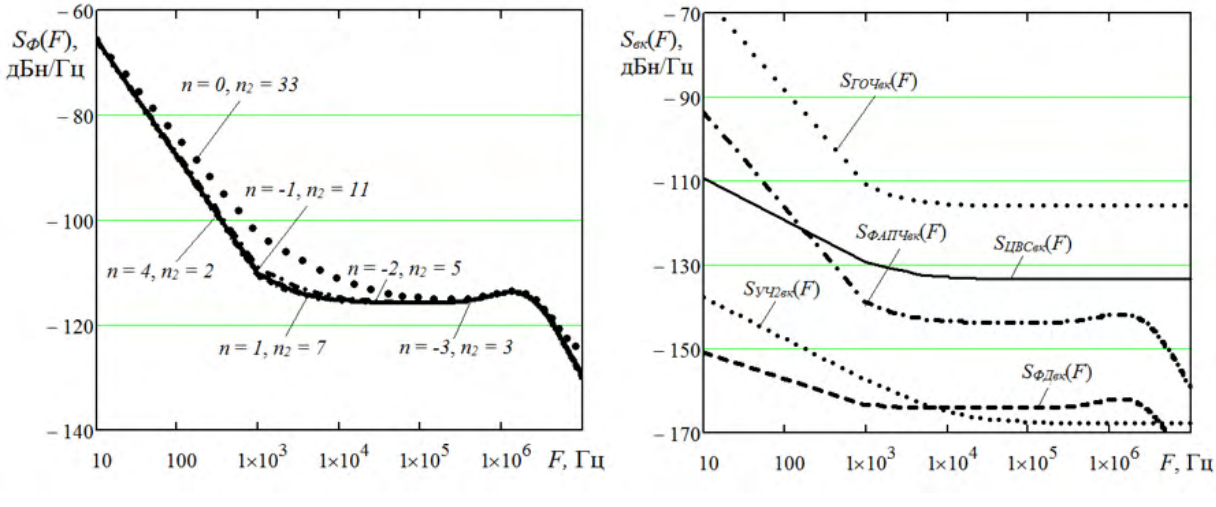
Рис. 5. СПМ фазовых шумов ЦВС AD9910 на образах основной частоты при тактовой частоте 120 МГц, n = 0, 1, 2 (сплошные точки – моделирование, штриховые линии с символом окружности – эксперимент)

В результате анализа полученных зависимостей установлено, что с увеличением номера образа уровень фазовых шумов ЦВС увеличивается как для экспериментальных характеристик, так и для полученных в результате математического моделирования. Кроме того, видно, что для образов основной частоты результаты эксперимента и моделирования совпадают, но имеется небольшая погрешность моделирования, которая на отдельных отстройках частоты максимально достигает 4–5 дБ. Данный факт позволяет сделать вывод о том, что разработанная математическая модель СПМ фазовых шумов ЦВС на образах основной частоты может применяться в практических исследованиях, инженерных и конструкторских расчетах, при выборе оптимальной с точки зрения уровня фазовых шумов структуре формирователя сигналов.

Проведем математическое моделирование шумовых характеристик и вкладов шумов звеньев формирователя сигналов на интегральном ЦВС AD9910 для частоты ГОЧ 24 МГц.

Для нахождения наилучших условий использования образов, проведем математическое моделирование шумовых характеристик и вкладов шумов звеньев формирователя сигналов на интегральном ЦВС AD9910 для частоты ГОЧ 96 МГц.

Анализируя рис. 6–8, можно отметить, что найденные ранее закономерности для шумовых свойств формирователей с транзисторным умножителем тактовой частоты, в целом, проявляются также при использовании в качестве умножителя тактовой частоты системы ФАПЧ. Рост выходной частоты приводит к ухудшению шумовых характеристик формирователей сигналов. Аналогично, наибольший вклад в СПМ фазовых шумов формирователя вносит ГОЧ. Видимо, с увеличением частоты ГОЧ также будет наблюдаться снижение уровня фазовых шумов.



а б

Рис. 6. Характеристики формирователя на ЦВС AD9910, $f_{ЦВС_обр}$ = 3000 МГц, $f_{ГОЧ}$ = 24 МГц: а – СПМ фазовых шумов на образах основной частоты, n_1 = 16; б – вклады шумов звеньев при n_1 = 16, n = 4

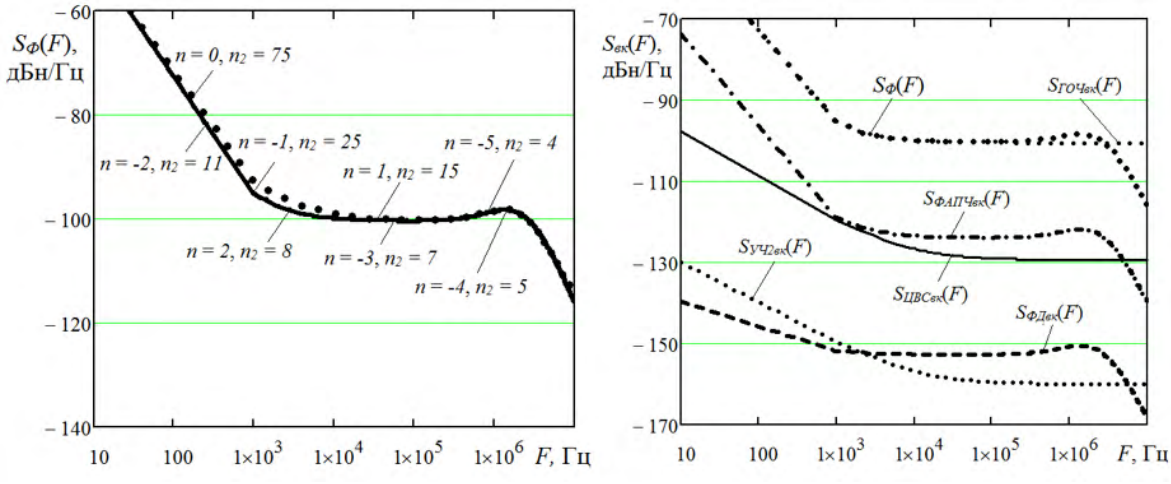


Рис. 7. Характеристики формирователя на ЦВС AD9910, $f_{ЦВС_обр}$ = 18000 МГц, $f_{ГОЧ}$ = 24 МГц: а – СПМ фазовых шумов на образах основной частоты, n_1 = 16; б – вклады шумов звеньев при n_1 = 16, n = –4

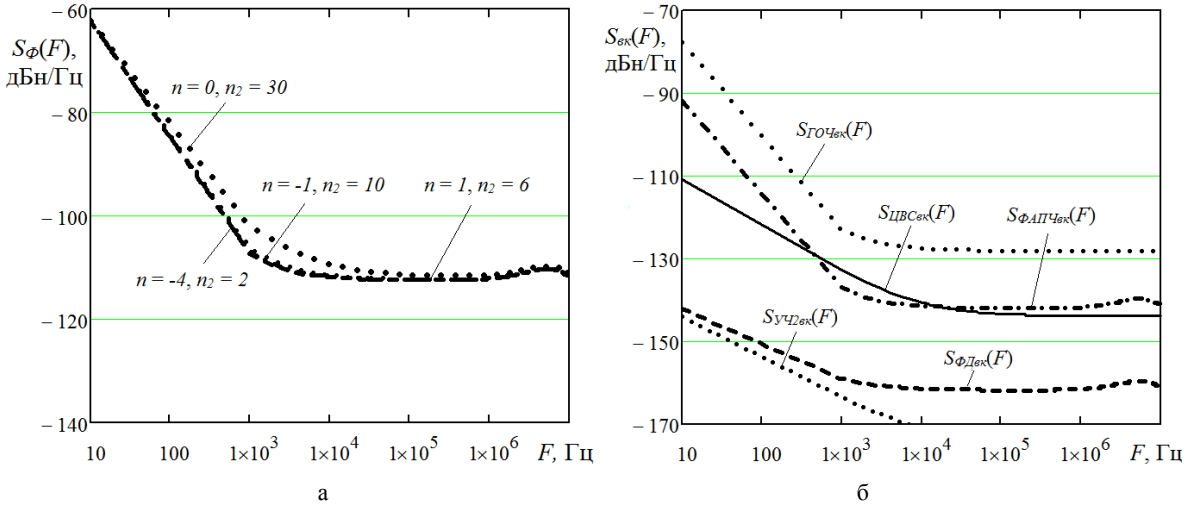


Рис. 8. Характеристики формирователя на ЦВС AD9910, $f_{ЦВС_обр}$ = 3000 МГц, $f_{ГОЧ}$ = 96 МГц: а – СПМ фазовых шумов на образах основной частоты, n_1 = 4; б – вклады шумов звеньев при n_1 = 4, n = 1

Заключение

Использование образов основной частоты ЦВС можно считать новым перспективным методом решения проблемы повышения выходной частоты. Как минимум, данный метод позволяет уменьшать число транзисторных каскадов выходного умножителя частоты при таком же уровне фазовых шумов.

Разработанная обобщенная схема формирователя сигналов, оптимальна для использования образов основной частоты. На основе схемы, алгоритм частотного планирования позволяет выявить соотношения частот, а так же значения коэффициентов умножения для возможных случаев применения образов основной частоты.

Результаты математического моделирования и экспериментальные данные СПМ фазовых шумов формирователей сигналов на ЦВС практически совпадают. Это подтверждает возможность применения метода математического моделирования шумовых характеристик для образов основной частоты выходного сигнала ЦВС.

Наибольший вклад в общий уровень СПМ фазовых шумов формирователя вносит ГОЧ. С ростом частоты выходного сигнала формирователя растет и уровень фазовых шумов.

Применение более высокочастотного ГОЧ снижает СПМ фазовых шумов формирователя, как для основной частоты, так и для ее образов; использование образов совместно с высокочастотным ГОЧ позволяет снизить СПМ фазовых шумов в области малых отстроек. Использование образов основной частоты при малой частоте ГОЧ и высокой тактовой частоте ЦВС малоэффективно.

Литература

1. Ромашов В. В., Храмов К. К. Формирователи сетки опорных частот возбудителя передатчика с использованием образов основной частоты // Методы и устройства передачи и обработки информации. 2011, № 13. С. 45–48.

2. Докторов А. Н., Хазов Д. А. Исследование формирователей высокочастотных сигналов на основе цифровых вычислительных синтезаторов с использованием образов основной частоты / IX Всероссийские научные Зворыкинские чтения «Научный потенциал молодежи – будущее России» // Сборник тезисов. Муром: ИПЦ МИ ВлГУ, 2017. С. 347–349.

3. Ромашов В. В. Экспериментальное исследование шумовых характеристик цифрового вычислительного синтезатора / Ромашов В. В., Докторов А. Н., Хазов Д. А. / 3-я Всероссийская научно-практическая конференция «Радиолокационная техника: устройства, станции, системы РЛС-2015» // Тезисы докладов. Муром: АО «Муромский завод радиоизмерительных приборов», 2015. С. 31–32.

4. Ромашов В. В. Частотное планирование формирователей сигналов радиосистем на основе цифровых вычислительных синтезаторов / Ромашов В. В., Храмов К. К., Докторов А. Н. // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2012. № 4. С. 10–16.

ПОВЫШЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ СИГНАЛ/ШУМ ЦИФРОВОГО ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО СИНТЕЗАТОРА ПУТЕМ ПЕРЕДИСКРЕТИЗАЦИИ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА

В. И. Долгов, А. П. Мартынов, Д. А. Хазов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

В настоящее время для современной радиоэлектроники требуются высококачественные источники сигналов, в качестве которых применяют синтезаторы частоты. Они создают сетку стабильных частот, внутри которой возможно быстрое переключение с одной частоты на другую. Такой принцип лежит в основе многоканальных систем связи, радиолокационной техники, новейших измерительных приборов. Синтезаторы частот могут быть построены с помощью систем фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), с помощью систем на основе прямого цифрового синтеза, путем комбинации данных методов между собой, а также прямым аналоговым синтезом частот.

В составе многих современных систем формирования радиосигналов имеется цифровой вычислительный синтезатор (ЦВС), работа которого основана на методе прямого цифрового синтеза. Он обеспечивает высокое быстродействие, широкий диапазон, малый шаг сетки частот. Наличие цифрового интерфейса позволяет управлять работой ЦВС программным методом. Данный подход позволяет исключить этапы составления уравнений схем и их решения с целью получения аналитических выражений, например, динамических характеристик. Это позволяет сократить время и упростить анализ различных радиоустройств.

Однако данные синтезаторы имеют один важный недостаток – низкую основную частоту выходного сигнала. Это вызвано, прежде всего, тем, что частота синтезируемого сигнала не может быть выше 45% тактовой частоты ЦВС. Преодолевается такое ограничение, с одной стороны, совершенствованием техпроцесса изготовления цифровых интегральных микросхем и ростом тактовой частоты, которая в настоящий момент у лучших ЦВС составляет единицы ГГц. Дальнейшее продвижение по такому пути затруднено физическими пределами, ограничивающими уровень техпроцесса, размеры наименьших элементов цифровых интегральных микросхем. С другой стороны, повысить выходную частоту ЦВС можно, комбинируя способы умножения частоты и использования различных систем ФАПЧ.

Кроме того, для повышения выходной частоты имеется возможность использования высокочастотных дискретных составляющих – образов основной частоты ЦВС [1]. Они появляются в процессе работы цифроаналогового преобразователя, входящего в состав цифрового вычислительного синтезатора. Обычно данное явление никак не используется, и от образов избавляются с помощью фильтра низких частот (ФНЧ). Одной из причин такого подхода является низкая амплитуда образов относительно амплитуды гармоники основной частоты. Поэтому для использования требуемого образа применяют полосовой фильтр и дополнительный усилитель. Но все дополнительные элементы, так или иначе, ухудшают шумовые характеристики создаваемого формирователя частот.

Постановка задачи

Для увеличения амплитуд образов основной частоты ЦВС, и тем самым улучшения отношения сигнал/шум, возможно применить так называемую передискретизацию выходного сигнала [2]. Передискретизация выходного сигнала ЦВС позволяет перераспределить энергию от гармоники основной частоты к гармоникам образов так, что амплитуды некоторых высокочастотных гармоник будут больше, чем до передискретизации. Передискретизация осуществляется с помощью аналогового ключа, интервалы включения и отключения которого задаются сигналом, полученным с помощью преобразования скважности тактового сигнала цифрового вычислительного синтезатора.

В ходе исследования влияния передискретизации выходного сигнала ЦВС на уровни спектральных составляющих необходимо решить следующие задачи:

– разработать структурную схему и схемотехническую модель передискретизатора сигнала ЦВС;

– провести математическое моделирование спектра и огибающей;

– провести экспериментальные исследования выходного сигнала ЦВС, его спектра и огибающей;

– провести анализ влияния передискретизации на амплитуды образов основной частоты при различных скважностях и частотах выходного сигнала ЦВС.

Схема и модель ЦВС с передискретизатором

Структурная схема передискретизатора выходного сигнала ЦВС приведена на рис. 1.

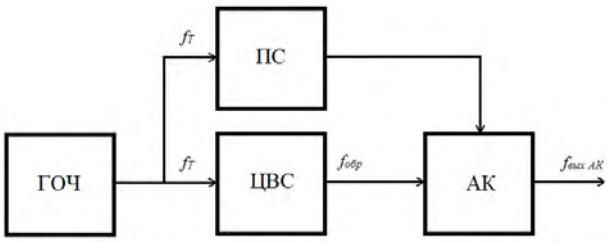


Рис. 1. Структурная схема ЦВС с передискретизацией выходного сигнала: ГОЧ – генератор опорной частоты; ПС – преобразователь скважности; ЦВС – цифровой вычислительный синтезатор; АК – аналоговый ключ

ГОЧ выполнен на высокостабильном кварцевом резонаторе. ПС осуществляет изменение скважности тактовых импульсов от 2 до требуемого значения. На управляющий вход АК подаются импульсы с преобразователя скважности.

В данной структурной схеме частота тактового сигнала ЦВС равна частоте ГОЧ, поэтому преобразователь скважности ПС подключается напрямую. В случаях, когда применяется интегральный ЦВС, в составе которого имеется встроенный умножитель тактовой частоты на основе системы ФАПЧ, тактовый сигнал для преобразователя скважности требуется брать с его выхода непосредственно перед ЦВС. В простейшем случае преобразователь скважности ПС представляет собой логический элемент «И». На один из его входов подается исходный тактовый сигнал, а на другой - тактовый сигнал, прошедший через интегрирующую RC-цепь (для повышения скважности выходного сигнала ПС выше 2) или через дифференцирующую RC-цепь (для понижения скважности ниже 2). В результате на выходе логического элемента создается сигнал в виде последовательности прямоугольных импульсов с требуемой скважностью. Данный сигнал управляет работой аналогового коммутатора, который в определенные интервалы времени пропускает выходной сигнал ЦВС, а в остальное время находится в разомкнутом состоянии. При фильтрации образов необходимо учитывать, что коэффициент деления ЦВС должен находиться в пределах 0,15…0,35 по формуле(1).

$$K_{\text{ЦВС}} = f_{\text{ЦВС}} / f_T \,, \qquad (1)$$

где $f_{\text{ЦВС}}$ – выходная частота ЦВС, f_T – тактовая частота.

Для оценки эффективности предлагаемого решения проведено схемотехническое моделирование исследуемого устройства, показанного на рис. 1. Данная модель, реализованная в программе Micro-CAP представлена на рис. 2.

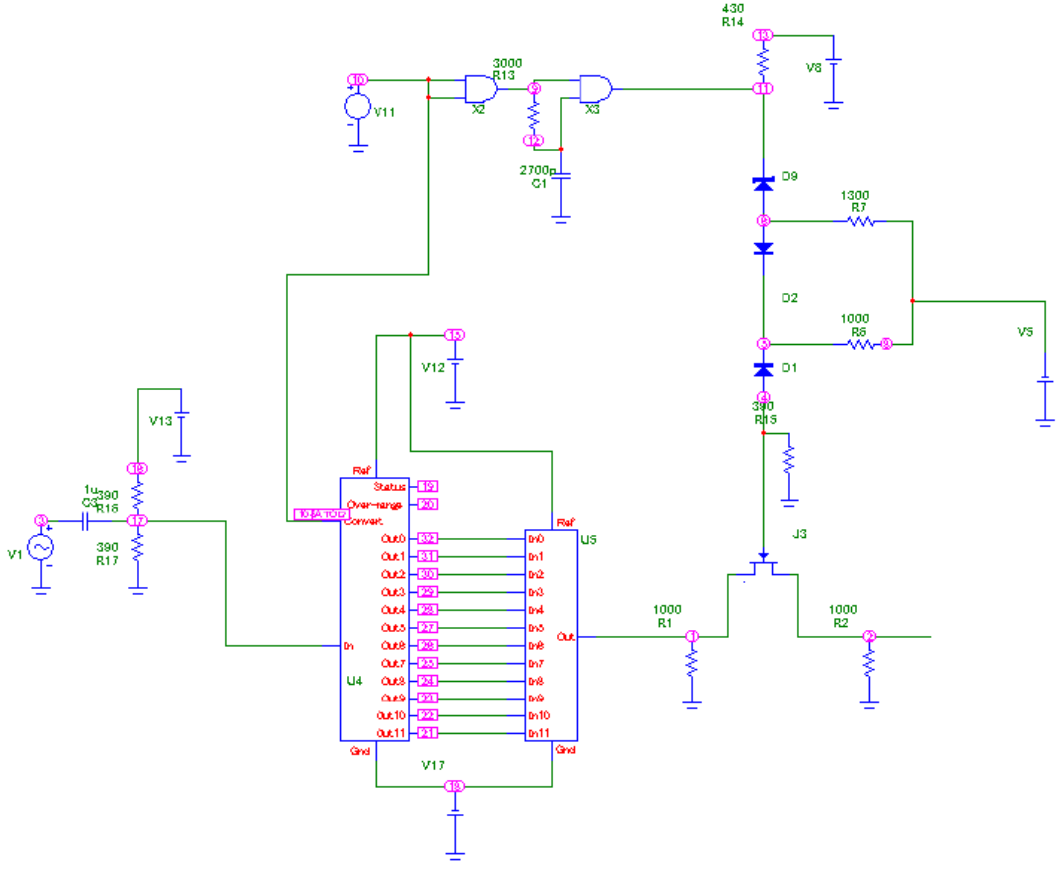


Рис. 2. Схемотехническая модель ЦВС с передискретизацией выходного сигнала

Результаты моделирования и экспериментов

Результаты моделирования работы исследуемого устройства во временной области представлены на рис. 3–4.

В данной модели в качестве ЦВС используется последовательное соединение источника идеального синусоидального сигнала, аналого-цифрового и цифро-аналогового преобразователей, тактовым сигналом для которых служил выходной сигнал ГОЧ. В качестве ГОЧ принят идеальный источник прямоугольных импульсов с периодом повторения 1 мкс и скважностью 2. Синтезируемая частота ЦВС в такой модели ЦВС задается частотой источника идеального синусоидального сигнала. В качестве АК использован идеальный аналоговый ключ, управляемым напряжением импульсной последовательности со скважностью 5 или 1,25. Основная частота выходного сигнала ЦВС, составляет 150 кГц, либо 250 кГц. Тактовая частота соответствует значению в 1 МГц.

На рис. 5 представлены результаты моделирования выходного сигнала ЦВС в частотной области до и после передискретизации для различных скважностей и частот выходного сигнала ЦВС.

Полученные спектры содержат гармоники основной частоты ЦВС ($f_{\text{ЦВС}} = 150$ кГц на рис. 6 и $f_{\text{ЦВС}} = 250$ кГц на рис. 7), их образы с частотами $f_{\text{обр}} = \left| nf_T + f_{\text{ЦВС}} \right|$, тактовую частоту f_T и ее гармоники, а также дискретные и шумовые побочные спектральные составляющие.

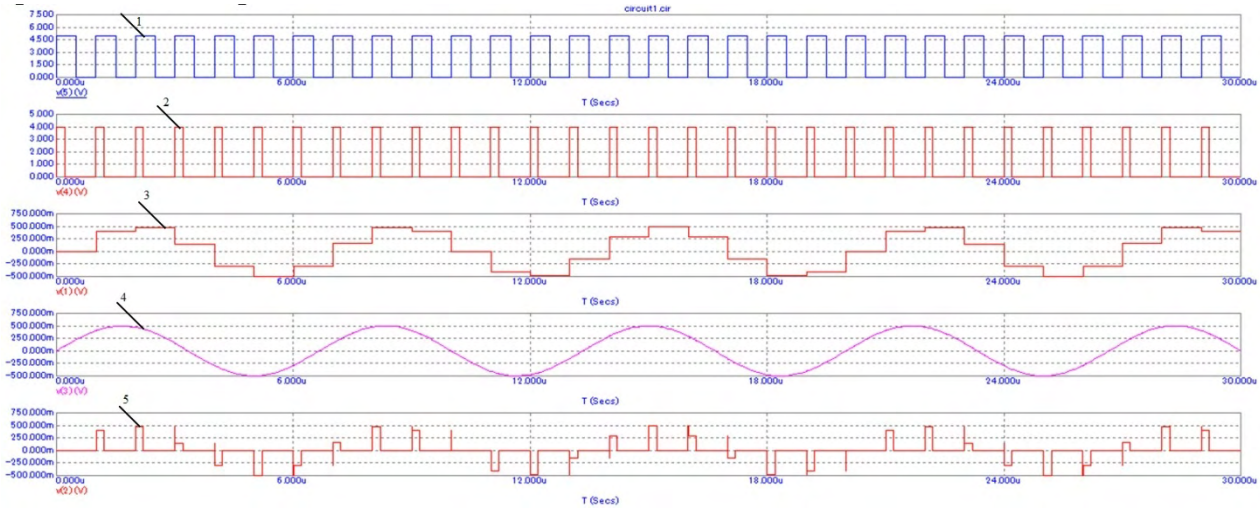


Рис. 3. Осциллограммы сигналов устройства с передискретизацией выходного сигнала ЦВС при q = 5 и $K_{\text{ЦВС}}$ = 0,15: 1 – тактового сигнала, 2 – сигнала с преобразованной скважностью, 3 – выходного сигнала АЦП, 4 – выходного сигнала ЦАП, 5 – передискретизированного сигнала

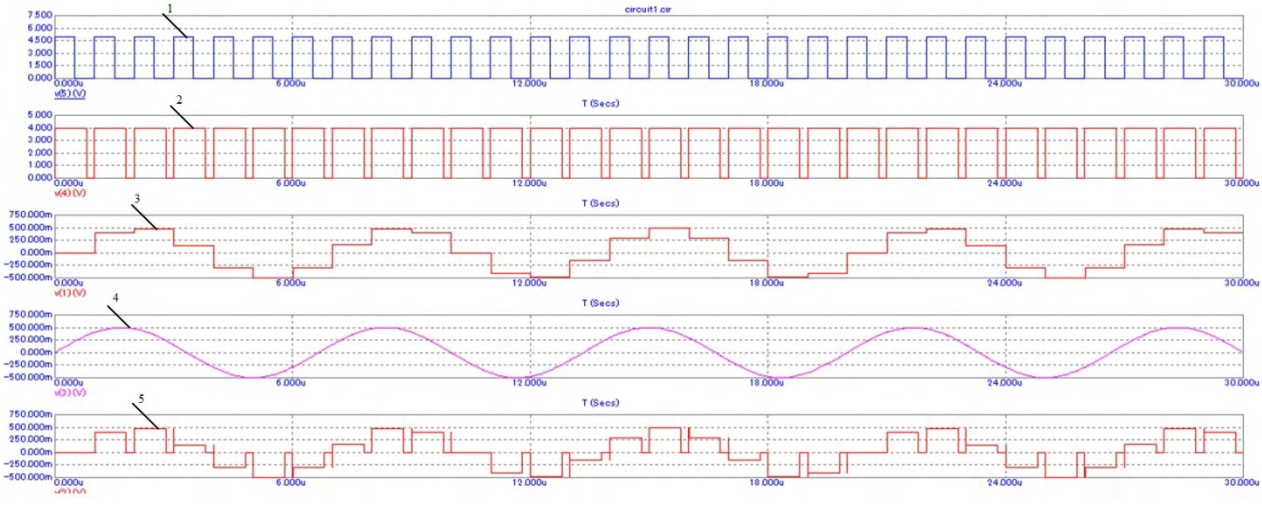


Рис. 4. Осциллограммы сигналов устройства с передискретизацией выходного сигнала ЦВС при q = 1,25 и $K_{\text{ЦВС}}$ = 0,15: 1 – тактового сигнала, 2 – сигнала с преобразованной скважностью, 3 – выходного сигнала АЦП, 4 – выходного сигнала ЦАП, 5 – передискретизированного сигнала

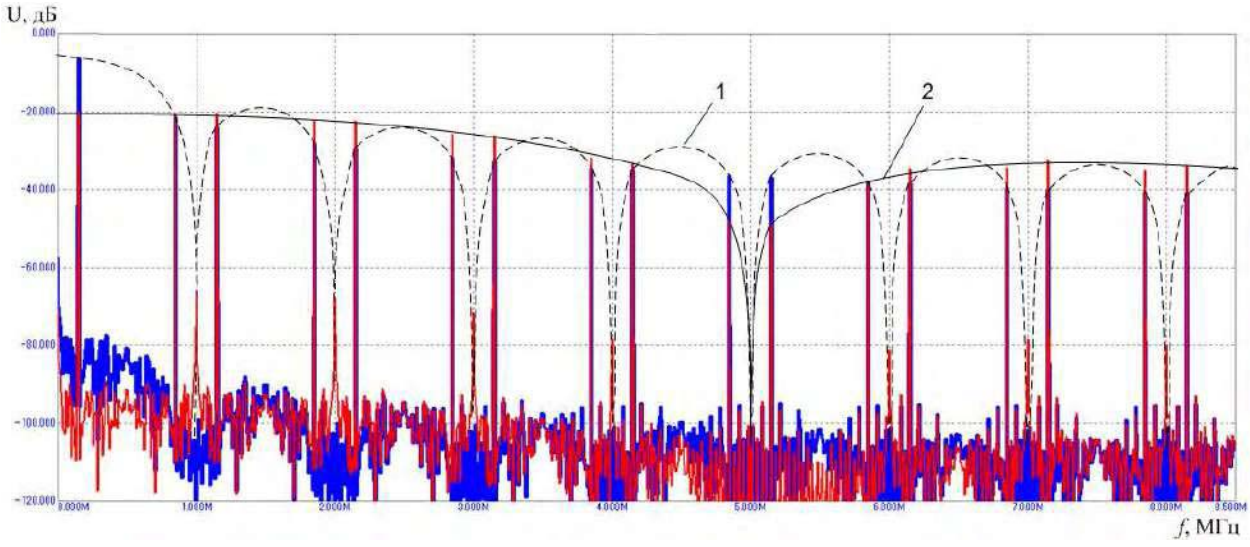


Рис. 5. Спектр выходного сигнала ЦВС при $q = 5$ и $K_{ЦВС} = 0{,}15$: 1 – до передискретизации, 2 – после передискретизации

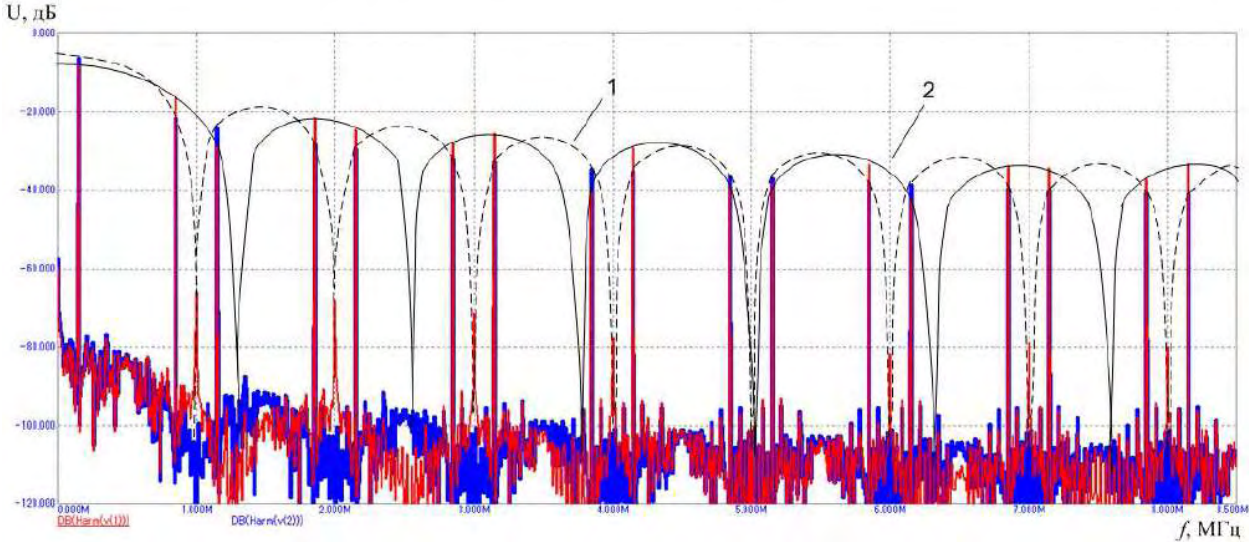


Рис. 6. Спектр выходного сигнала ЦВС при $q = 1{,}25$ и $K_{ЦВС} = 0{,}15$: 1 – до передискретизации, 2 – после передискретизации

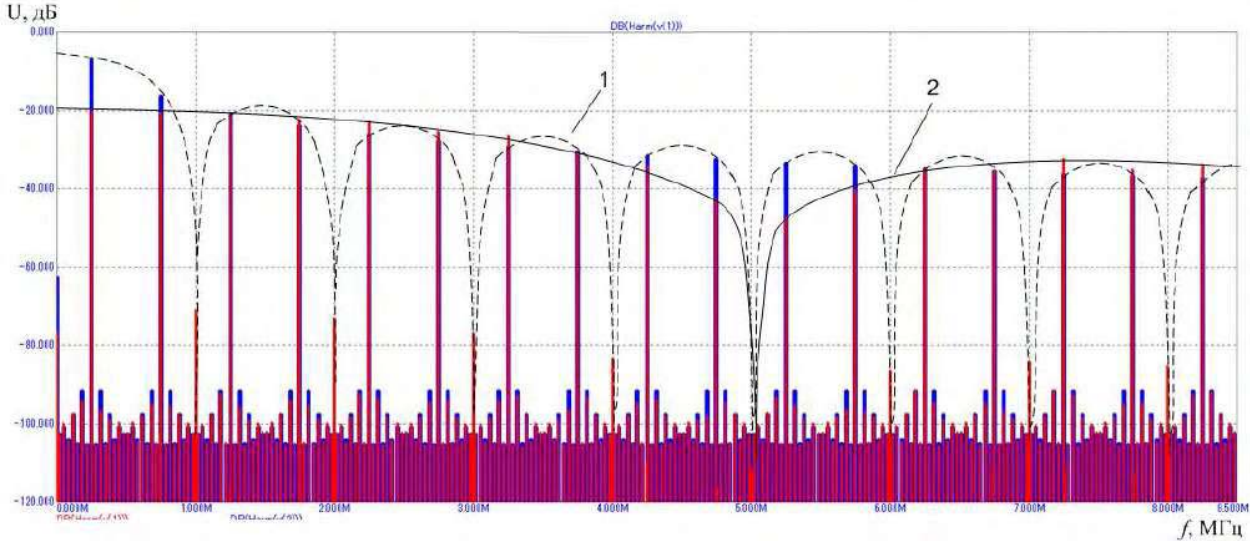


Рис. 7. Спектр выходного сигнала ЦВС при $q = 5$ и $K_{ЦВС} = 0{,}25$: 1 – до передискретизации, 2 – после передискретизации

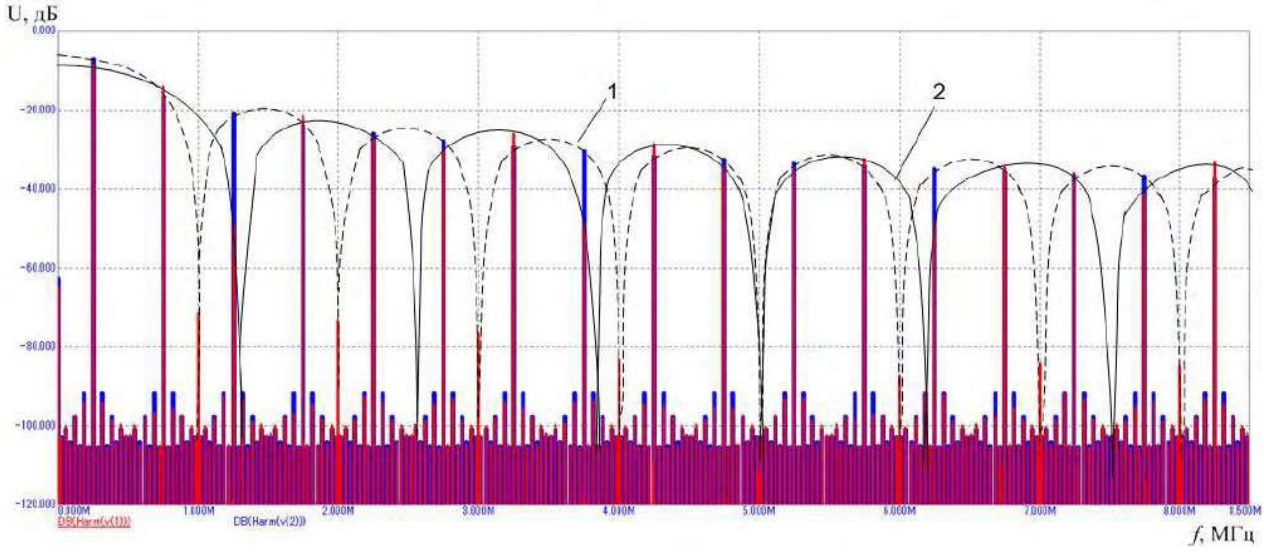


Рис. 8. Спектр выходного сигнала ЦВС при $q = 1{,}25$ и $K_{ЦВС} = 0{,}25$: 1 – до передискретизации, 2 – после передискретизации

Анализ результатов

Из представленных спектров видно, что изменение скважности тактового сигнала и передискретизация выходного сигнала ЦВС приводят к изменению амплитуд гармоник основной частоты и их образов. В результате, если исходная огибающая спектра выходного сигнала ЦВС представляет собой вид функции синус Котельникова, принимающей нулевые значения на частотах, кратных тактовой частоте ЦВС, то при передискретизации наблюдается смешение нулевых точек огибающей спектра так, что происходит перераспределение энергии гармоник. При этом увеличение или ослабление амплитуд требуемых спектральных составляющих осуществляется подбором скважности импульсов передискретизации. Можно отметить, что коэффициент передачи ЦВС также влияет на изменение амплитуд гармоник в процессе передискретизации. При низком $K_{ЦВС}$ увеличение уровней амплитуды гармоник больше, чем при большом значении $K_{ЦВС}$.

Сравним изменение уровней различных спектральных составляющих до и после их передискретизации. Представление результатов моделирования в графическом виде позволит подробно оценить изменения амплитуд данных составляющих и, соответственно, огибающей спектра выходного сигнала ЦВС. На рис. 9 представлена зависимость амплитуд гармоник основной частоты ЦВС от номеров образов до и после передискретизации при тактовой частоте устройства 1 МГц для значений основной частоты выходного сигнала ЦВС = 150 кГц и = 250 кГц.

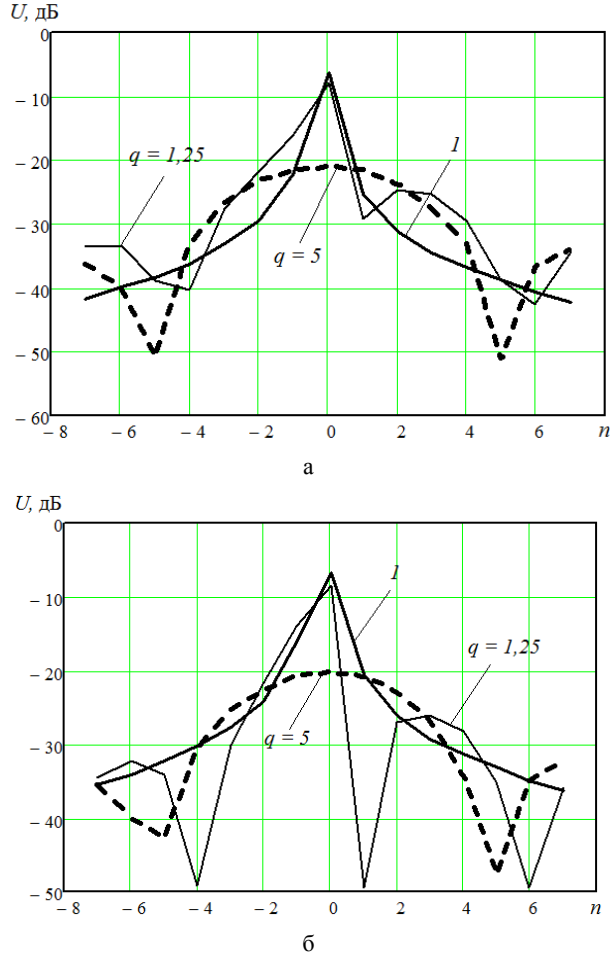


Рис. 9. Зависимость амплитуд гармоник основной частоты ЦВС ($q = 5$, $q = 1{,}25$) от номеров образов при: а – 150 кГц, б – 250 кГц; 1 – до передискретизации, 2 – после передискретизации

Заключение

Из представленных зависимостей видно, что передискретизация выходного сигнала ЦВС уменьшает энергию гармоники основной частоты, перераспределяя ее на более высокочастотные компоненты спектра. Так, на частоте 150 кГц, передискретизация импульсами со скважностью 5 повышает амплитуду гармоник образов n = +– (2..4) от 2 до 8 дБ. При этом наблюдается уменьшение амплитуды основной гармоники на 15 дБ. Использование импульсов с малой скважностью $1 < q < 2$ приводит к тому, что амплитуды отрицательных образов увеличиваются, а положительных – уменьшаются. Например, по рис. 9б видно, что амплитуда первого положительного образа вследствие передискретизации уменьшилась с –21 до –49 дБ, при скважности q = 1,25.

Для того, чтобы амплитуда требуемого образа после передискретизации имела максимальное значение, требуется, чтобы данная гармоника попадала в максимум огибающей. Поэтому для практического использования передискретизации с целью увеличения амплитуды гармоник образов требуется оперативно вычислять оптимальное для данных условий значение скважности импульсов передискретизации по исходным значениям тактовой и основной частоты, и номеру выбранного образа. Первый минимум огибающей спектра передискретизированного сигнала можно найти, если на оси частот спектра образов, нормированной к n, отложить значение скважности. Например, при q = 5 первый минимум огибающей спектра передискретизированного сигнала будет находиться в окрестности $|n|$ = 5, амплитуды пятого отрицательного и положительного образов, также, как и амплитуда гармоники основной частоты станут ниже на 10–15 дБ. Соответственно, в таком случае больше всего увеличатся амплитуды второго и третьего, отрицательных и положительных образов. Теоретически, максимальное увеличение амплитуд образов с помощью эффекта передискретизации идеальными импульсами составляет 10–12 дБ, что подтверждает возможность использования данного явления для увеличения амплитуд высокочастотных гармоник, и соответственно, отношения сигнал/шум устройства при использовании образов основной частоты ЦВС. Это позволит снизить требуемый коэффициент усиления, и, в некоторых случаях, отказаться от дополнительного усилителя.

Литература

1. Ромашов В. В., Храмов К. К., Докторов А. Н. Модель цифрового вычислительного синтезатора, работающего на образах основной частоты // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2012. № 2 (6). С. 13–17.

2. Докторов А. Н. Исследование влияния передискретизации выходного сигнала цифрового вычислительного синтезатора на уровень дискретных составляющих / Докторов А. Н., Хазов Д. А. // Методы и устройства передачи и обработки информации. 2016. № 17. С. 4–11.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ СЕРВЕР С ВЫСОКОПЛОТНОЙ КОМПОНОВКОЙ

М. А. Чернов, Э. Г. Байков, С. А. Левкин, Е. В. Меньшиков, А. О. Гришин, Д. С. Максимов, А. К. Лабутин, С. А. Царев

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Вычислительная техника развивается во всем мире очень быстро. Цифровые инновации, такие как супер-вычисления являются необходимой частью современной науки. В настоящее время остаётся потребность в больших вычислительных мощностях для моделирования, воспроизведения и решения сложных научно-исследовательских задач.

Одним из способов получения более высокой производительности и эффективности вычислений – использование более плотного размещения и увеличение количества вычислительных узлов.

Цель работы по созданию сервера – более плотное размещение вычислительных модулей, чем у серийно выпускаемых серверов.

Существующие на данный момент компоновки вычислительных серверов, которые можно было бы использовать для создания мультипроцессорных комплексов, приводят к проблеме – низкая плотность размещения вычислительного оборудования. Необходимы дополнительные стойки и увеличение площадей вычислительны залов.

Для достижения поставленной цели было принято решение – разработать вычислительной сервер с максимальным возможным размещением модулей. Проектирование проводилось с учётом требования промышленного стандарта 19-дюймов для вычислительных стоек. Были рассмотрены варианты, обеспечивающие максимальную плотность оборудования на единицу высоты.

По итогам проделанной работы решение реализовано в разработке новой компоновки вычислительных модулей. Благодаря вертикальному размещению их в плоскости удалось повысить их плотность размещения. Высота 4U. Сервер несёт в себе 16 модулей – по восемь в каждой зоне (спереди и сзади). Вычислительные узлы расположены друг за другом. С фронтальной стороны расположена панель управления с индикацией и кнопками включения. С тыльной стороны блоки питания.

Работы по созданию сервера с плотной компоновкой заключались в проектировании конструктива сервера, электрических принципиальных схем обеспечивающих питание и охлаждение. Выполнена разработка конструкторской документации на конструктивные элементы и печатные платы сервера. В ходе работы была проведена сборка макета сервера с плотной компоновкой и его экспериментальные исследования. Произведен выбор оптимальных компонентов системы электропитания сервера с заданными габаритами и выходной мощностью произведен выбор компонентов охлаждения сервера для обеспечения требуемого температурного режима. Произведен выбор электронных компонент и разъемов печатных плат.

Состав сервера с плотной компоновкой

В настоящее время существует большой класс задач, требующих высокой концентрации вычислительных средств. Мощность вычислительного центра можно сделать больше, увеличив количество и плотность размещения вычислительных модулей.

На рис. 1 показан внешний вид сервера видно, что он рассчитан на установку в 19” стойку, имеет глубину 1040 мм, по высоте занимает 4U (177 мм). На боковых сторонах корпуса расположены направляющие для установки в шкаф. [1] С двух сторон (спереди и сзади) сервера установлено по восемь вычислительных узлов. Узлы сервера построены на базе материнской платы K1SPi (см. рис. 2).

Рис. 1. Внешний вид сервера с плотной компоновкой

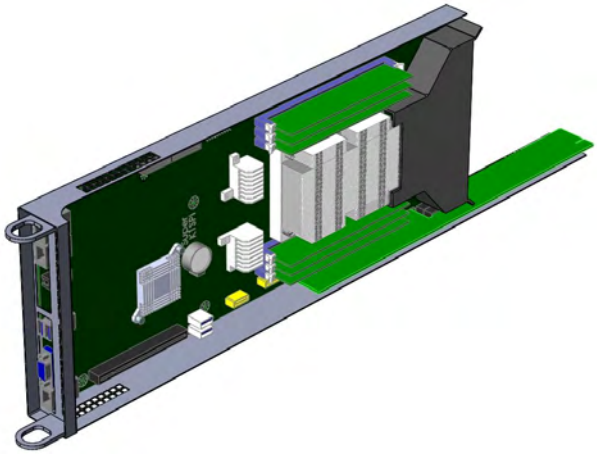


Рис. 2. Вычислительный узел на базе материнской платы K1Spi

Каждый узел имеет один процессор Intel Xeon Phi с максимальной потребляемой мощностью 230 Вт, со встроенной MSDRAM – памятью объемом 16 ГБ, базирующийся на сокете LGA 3647 [2]. В каждом узле возможна установка до шести модулей памяти RDIMM DDR4-2400 ECC. Все вычислительные узлы сервера имеют встроенные порты LAN1 и LAN2 Gigabit Ethernet.

Технические характеристики вычислительных модулей, реализованных на сервере с плотной компоновкой, представлены в табл. 1.

Intel Xeon Phi x200 – загрузочный хост-процессор, который поддерживает массовый параллелизм и векторизацию самых ресурсоемких высокопроизводительных вычислительных приложений. Интегрированная энергоэффективная архитектура предлагает значительно более высокую вычислительную мощность на единицу потребленной энергии по сравнению с аналогичными платформами.

На рис. 3 показан внутренний состав сервера. Для наглядности внешний корпус показан прозрачным. Для большей наглядности не показана группа из четырех правых вычислительных узлов. Из рисунка также видно, что для электропитания компонент сервера используются четыре блока питания, а для охлаждения восемь вентиляторов. Блоки питания через разъемы соединены с платами распределения питания. Узлы соединяются между собой и управляются через две, вертикально стоящие платы объединения питания.

Таблица 1

Технические характеристики одного вычислительного модуля

Техническая характеристика (материнская плата)	Значение
Количество процессоров: – 1, шт.	1
Чипсет:	Intel PCH C612
Процессор: – частота, ГГц – количество ядер, шт.	Intel Xeon Phi x200 до 2,6 до 72
Оперативная память: – объем на сервер, Гбайт	RDIMM DDR4-2400 ECC До 384 Гб
Интерфейсы	2 PCI-Express 3.0 x16
Графический контроллер:	ASpeed 2400 BMC VGA/2D
Потребляемая мощность не более, Вт	300

В состав сервера с плотной компоновкой входят следующие компоненты, которые представлены в табл. 2.

Таблица 2

Состав сервера с плотной компоновкой

Наименование	Количество
Корпус сервера	1
Вычислительный узел	16
Блок питания	4
Плата питания объединительная	2
Плата соединительная	16
Вентилятор охлаждения	8

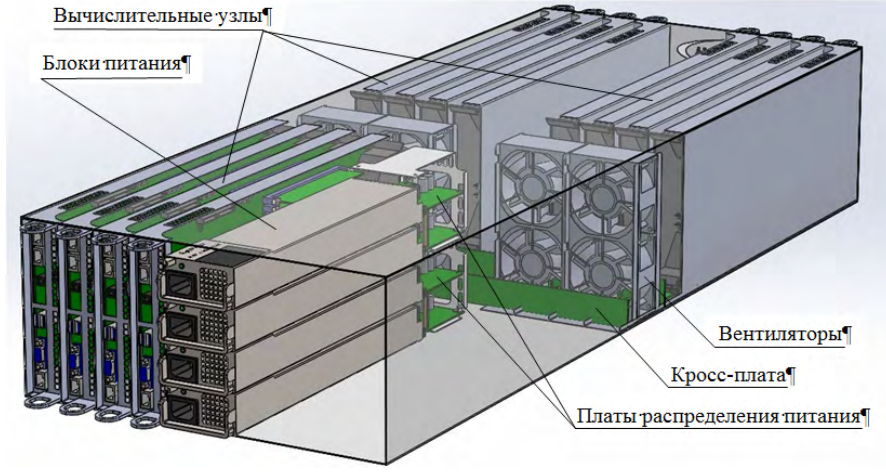


Рис. 3. Внутренний состав сервера с плотной компоновкой

Комплект спроектированных и изготовленных плат

Печатная плата СПК-1-ВР выполнена в соответствии со спецификацией, сборочным чертежом и схемой электрической принципиальной. Общий вид платы питания объединительной представлен на рис. 4.

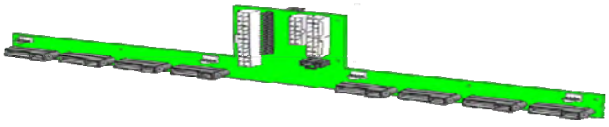


Рис. 4. Плата питания объединительная СПК-1-ВР

Плата питания объединительная обеспечивает распределение питания (12 В, 200А) на вычислительные модули сервера и вентиляторы системы охлаждения, передает управляющие сигналы на плату управления, разработана и интегрирована собственная система управления работой вентиляторов на основе микроконтроллера. Для управления режимами работы вентиляторов используются сигналы с частотой 25 кГц и максимальной амплитудой – 12 В, вырабатываемые контроллером ATmega8535.

Для непосредственного соединения материнской платы вычислительного модуля с платной питания объединительной была спроектирована и изготовлена соединительная плата СПК-1-СН. Внешний вид платы изображен на рис. 5. Конструктив корпуса сервера сделан таким образом, что соединительная плата устанавливается в разъемы XS1-XS8 по направляющим, что обеспечивает горячую замену вычислительного узла в составе сервера, для текущего ремонта вычислительного узла нет необходимости полного выключения блейд-сервера.

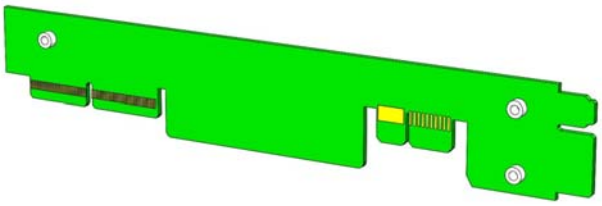


Рис. 5. Плата соединительная

Блок индикации и управлением включением реализован на отдельной печатной плате изображенной на рис. 6, которая расположен на фронтальной стороне сервера и имеет кнопки включения вычислительных узлов и индикаторы их работы.

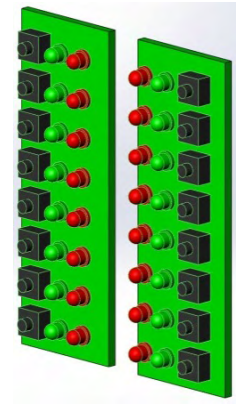


Рис. 6. Блок индикации и управления включением

Тестирования сервера плотной компоновкой

Эксперимент проводился на шестнадцати узлах сервера. На данных узлах был запущен тест Intel Optimized LINPACK Benchmark [3], который приводит к большой счётной нагрузке, а следовательно и нагреву компонент материнской платы. Для загрузки операционной системы и запуска теста была организована сеть с использованием коммутаторов Ethernet и МП/Со. Измерения температуры окружающего воздуха и воздушного потока на входе и выходе из сервера проводились при помощи метеометра МЭС-200А.

Зоны измерения температуры по отношению к серверу показаны на рис. 7 и 8 (это участки очерчены красной линией), также на этих рисунках обозначена нумерация вычислительных узлов. Выбор зоны измерения температуры на выходе обусловлен наиболее интенсивным и нагретым воздушным потоком.

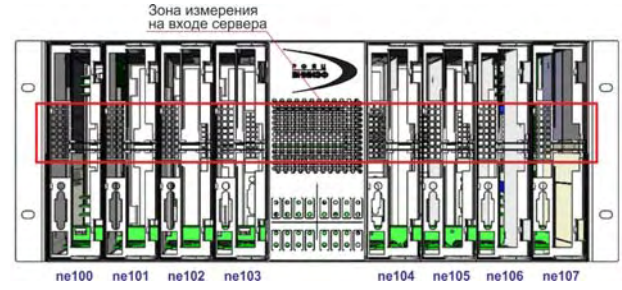


Рис. 7. Зона измерения температуры воздушного потока на входе в сервер

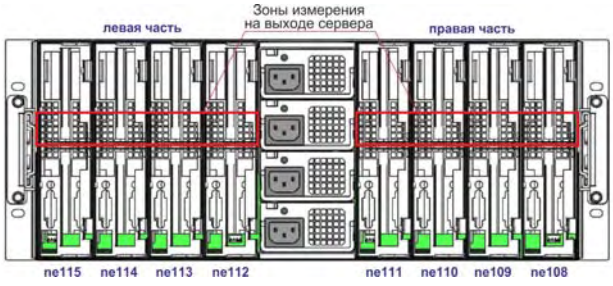


Рис. 8. Зоны измерения температуры воздушного потока на выходе из сервера

Средняя скорость воздушного потока на выходе из сервера составила 8,3 м/с

Результаты тестирования представлены в табл. 3 и 4.

Таблица 3

Результаты второго тестирования

Время теста, М:С	$t_{\text{на выходе из сервера}}$ °C	
	Левая часть сервера	Правая часть сервера
0:14	23,2	27,2
0:21	29,5	30
1:04	31,9	33,5
1:22	33,8	36,6
1:38	34,9	37,5
2:11	36	37,5
2:26	36,7	38
3:04	37,6	38,2
3:31	38	38,6
4:07	38,5	37,1
4:22	38,7	37,1
4:50	38,8	36,5
5:05	39,1	35,7
5:17	40	36,1
6:02	39,8	35,2
6:20	39,2	34
6:37	39,1	32,9

Таблица 4

Максимальная температура на процессорах

Процессор	max. t°	Процессор	max. t°
ne100	60	ne108	63
ne101	55	ne109	57
ne102	56	ne110	69
ne103	62	ne111	63
ne104	69	ne112	76
ne105	66	ne113	67
ne106	63	ne114	62
ne107	64	ne115	68

Заключение

Представлены результаты разработки вычислительного сервера с высокоплотной компоновкой и описаны его технические характеристики. В работе приводится описание конструктивных элементов, разработанных печатных плат, основных компонент системы электропитания, охлаждения и управления сервера с высокоплотной компоновкой разработанных с использованием численного моделирования воздушных потоков системы охлаждения сервера. Выполнена оценка пиковой производительности тестового образца сервера в сравнение с аналогами. Представлен обзор изготовленного тестового образца сервера высокоплотной компоновкой.

Литература

1. Телекоммуникационная стойка [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://en.wikipedia.com/wiki/Rack_unit.html

2. Материнская плата K1Spi [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.supermicro.com/products/motherboard/Xeon_Phi/K1SPi.cfm.

3. Intel® Optimized LINPACK Benchmark for Linux* OS [Electronic resource] Mode of Режим доступа: https://software.intel.com/sites/products/documentation/hpc/mkl/.

ИНТЕГРАЦИЯ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ КАНАЛА ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ МЕТОДАМИ КВАНТОВОЙ КРИПТОГРАФИИ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ СТРАТЕГИЧЕСКОГО ЗНАЧЕНИЯ

С. А. Якунина, К. В. Леванов, Н. Н. Вовк, Е. А. Жуненко, А. Н. Гаврилин, Р. В. Ефремов, И. В. Понеделко, А. С. Егоров, М. С. Сазанов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Технология квантовой криптографии опирается на принципиальную неопределенность поведения квантовой системы – невозможно одновременно получить координаты и импульс частицы, невозможно измерить один параметр фотона, не исказив другой.

Идея использования квантовых состояний была предложена еще в 1970 году студентом Колумбийского университета Стивеном Визнером. Он подал статью по теории кодирования в журнал IEEE Information Theory. Которая не была опубликована, так как изложенные в ней предположения показались фантастическими, а не научными. Стивен Визнер предложил использовать квантовые состояния для защиты денежных банкнот. Для этого было предложено встроить в каждую банкноту 20 световых ловушек, а затем поместить в каждую из них по одному фотону, поляризованному в строго определенном состоянии. После чего банкноты маркировались специальным серийным номером, который включал информацию о положении поляризационного фотонного фильтра. В результате этого, при применении отличного от заданного фильтра, комбинация поляризованных фотонов стиралась. Тогда развитие технологий еще не позволяло рассуждать о таких возможностях. Но в 1983 году работа Стивена Визнера «Сопряженное кодирование», все-таки была опубликована в SIGACT News и высоко оценена в научных кругах. В последствии опираясь на принципы, описанные в этой работе, ученые Чарльз Беннет и Жиль Брассард создали способ кодирования и передачи сообщений. Они подготовили доклад на тему «Квантовая криптография: Распределение ключа и подбрасывание монет». Протокол, который был описан в работе, в дальнейшем был признан первым базовым протоколом квантовой криптографии, и назван в честь его создателей BB84. Носителями информации в протоколе BB84 выступают фотоны, поляризованные под углами 0, 45, 90, 135 градусов. Суть метода квантовой криптографии заключается в наблюдении за квантовыми состояниями фотонов, которые задает отправитель информации, а получатель их регистрирует. Используется квантовый принцип неопределенности Гейзенберга, когда две квантовые величины нельзя изменить одновременно с необходимой точностью. В случае, если отправитель и получатель не договорятся, какой вид поляризации квантов будет взят за основу, получатель может разрушить посланный отправителем сигнал и не получит полезной информации. Практическая реализация квантовой криптографии показана на рис. 1. Передающая сторона находится слева, а принимающая – справа. Ячейки Покеля необходимы для импульсной вариации поляризации потока квантов передатчиком и для анализа импульсов поляризации приемником. Передатчик может формировать одно из четырех состояний поляризации. Передаваемые данные поступают в виде управляющих сигналов на эти ячейки. В качестве канала передачи данных может быть использовано оптоволокно. В качестве первичного источника света можно использовать лазер.

На принимающей стороне после ячейки Покеля установлена кальцитовая призма, которая расщепляет пучок на два фотодетектора (ФЭУ), измеряющие две ортогональные составляющие поляризации. При формировании передаваемых импульсов квантов возникает проблема их интенсивности, которую необходимо решать. Если квантов в импульсе 1000, есть вероятность, что 100 квантов по пути будет отведено злоумышленником на свой приемник. В последующем, анализируя открытые переговоры между передающей и принимающей стороной, он может получить нужную ему информацию. Поэтому в идеале число квантов в импульсе должно быть около одного.

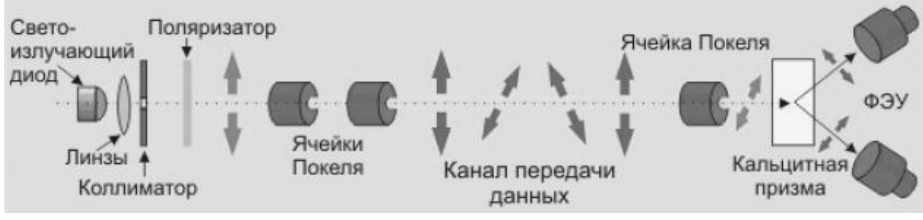


Рис. 1. Схема практической реализации квантовой криптографии

В этом случае любая попытка отвода части квантов злоумышленником приведет к существенному изменению всей системы в целом и, как следствие, росту числа ошибок у принимающей стороны. В подобной ситуации принятые данные должны быть отброшены, а попытка передачи повторена. Но, делая канал более устойчивым к перехвату, специалисты сталкиваются с проблемой "темнового" шума (получение сигнала, который не был отправлен передающей стороной, принимающей стороной) приемника, чувствительность которого повышена до максимума. Для того, чтобы обеспечить надежную передачу данных, логическому нулю и единице могут соответствовать определенные последовательности состояний, допускающие коррекцию одинарных и даже кратных ошибок.

Что такое квантовая криптография и ее отличие от обычной криптографии

Классическая криптография решает фактически только две задачи: защиту передаваемых сообщений от прочтения и от модификации сторонними лицами. Она базируется на использовании симметричных алгоритмов шифрования, в которых зашифровывание и расшифрование различаются лишь порядком исполнения и направлением некоторых простых шагов. Эти методы используют один и тот же скрытый элемент (ключ), и второе действие (расшифрование) является простым обращением первого (зашифрования). Поэтому любой из участников обмена может как зашифровать, так и расшифровать сообщение. По причине большой избыточности естественных языков непосредственно в зашифрованное сообщение очень тяжело внести осмысленное изменение, поэтому классическая криптография гарантирует также защиту от навязывания ложных данных. Если же естественной избыточности оказывается недостаточно для надежной защиты сообщения от модификации, она может быть искусственно увеличена методом добавления к нему особой контрольной комбинации. Если кратко, то защищенность классической криптографии строится на уверенности в том, что злоумышленник не успеет за разумное время «взломать» шифр ввиду сложности используемых алгоритмов.

Квантовая криптография – способ защиты коммуникаций, основанный на определенных явлениях квантовой физики. В отличие от традиционной криптографии, которая использует математические способы, чтобы обеспечить секретность информации, квантовая криптография сконцентрирована на физике, изучая случаи, когда информация переносится с помощью объектов квантовой механики. Процесс отправки и приема информации постоянно выполняется физическими средствами, например, при помощи электронов в электрическом токе, или фотонов в линиях волоконно-оптической связи. А подслушивание может рассматриваться, как измерение определенных параметров физических объектов – в нашем случае, переносчиков информации. Обобщенно можно сказать, что защищенность квантовой криптографии выстраивается на утверждении о том, что никто не сможет «взломать» шифр, так как это противоречит физическим законам природы.

Преимущества квантовой криптографии

К преимуществам квантовой криптографии можно отнести:

– обнаружение пассивного перехватчика – атака злоумышленника вносит значительно больше ошибок, чем их возникает в квантовом канале в результате естественного шума;

– теоретико-информационная стойкость распределения ключей – ключи, распределенные с помощью квантовых протоколов с теоретико-информационной стойкостью, используется для дальнейшего шифрования с использованием известных классических симметричных алгоритмов. Поэтому общий уровень стойкости криптосистемы повышается;

– защищенность основана на фундаментальных физических законах и принципах.

Использование методов квантового шифрования в организации сетей специального назначения

Квантовая связь (КС) – это некая система методов и средств передачи квантовой информации, т. е. данных, закодированных в квантовых состояниях, из одной пространственной точки или пользователя в другую. Носителями квантовой информации являются сами квантовые системы, которые могут существовать в различных квантовых состояниях. Существует несколько возможных способов осуществления этих принципов, разные подходы, которые, конечно, вносят свои перспективы по росту скорости и дальности передачи данных. Системы квантовой криптографии давно производятся коммерческими компаниями в исследовательских и научно-практических целях. Квантовые сигналы выносятся на боковые частоты, что позволяет сильно расширить характеристики по скорости и расстоянию и снять явные ограничения по дальности, присущие уже существующим схемам. Чтобы увидеть основное отличие упомянутого способа, рассмотрим сначала принципы работы классических, стандартизированных схем. Обычно при проектировании и построении системы квантовой связи генерируют ослабленный импульс, приблизительно равный или близкий к энергии одиночного фотона, после чего отправляют импульс по линии связи. Для кодировки в импульсе квантовых данных проводят модуляцию сигнала – изменяют поляризацию или фазовое состояние. В качестве основной модели электромагнитного излучения для физического кодирования квантовых данных с помощью выбора векторов поляризации монохроматического когерентного излучения приняты основные уравнения Максвелла:

$$\nabla E = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$ – закон Гаусса,

где E – вектор электрической напряженности; ρ – плотность тока смещения; ε – диэлектрическая проницаемость вакуума; ∇B = 0 – закон Гаусса для магнитного поля; $\nabla E = -\frac{\partial B}{\partial t}$ - связь электрического и магнитного полей;

$$\nabla B = j\mu_0 + \frac{1}{c^2}\frac{\partial E}{\partial t}$$ - циркуляция магнитного поля,

где B – вектор магнитной индукции; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума.

Численные решения данных уравнений методом конечных разностей показывают правильность выбранных моделей и возможность практического применения поляризационного кодирования. Строго говоря, фаза фотона – это некое нарушение классической физики элементарных частиц, которое придумали экспериментаторы из этой же области с целью упрощения работы с полученными данными. Фотон – это частица, у нее нет фазы, однако сама по себе она является частью волны. А фаза волны – это характеристика, которая показывает некоторое положение состояния поля этой электромагнитной волны. Если попытаться изобразить волну как синусоиду на плоскости, то сдвиги ее положения относительно начала этой плоскости соответствуют некоторым состояниям фазы. Для сохранения и преобразования в импульсе квантовой информации должно использоваться модулирующее устройство, которое сдвигает волну, а для измерения этого сдвига мы чисто графически или математически складываем эту волну с такой же волной и проверяем, что получится. Если волны находятся в противофазе, то две величины аннигилируют свои значения и гасятся друг о друга, на выходе получаем практически чистый нуль. Если же мы угадали, то синусоиды накладываются, поле растет и конечный сигнал получается высоким. Обмен пользовательской информацией между конечными потребителями, разнесенными на некоторое расстояние, осуществляется с учетом типа квантовых состояний, которые могут быть неортогональными и сцепленными (перепутанными), в отличие от классических состояний. Запись (или кодирование) стандартной, классической информации в неортогональной КС позволяет сопровождать каждое отправленное сообщение новым, уникальным, собственным ключом, т. е. решить одну из главных тем и задач классической криптографии – абсолютно секретное распределение ключей шифрования. Свойство перепутанности квантовых состояний дает возможность осуществить доставку двух идентичных последовательностей информационных битов двум пользователям, разнесенным на конечное расстояние, с гарантией полной недоступности чтения содержащихся в них данных третьим лицам. Как в первом, так и во втором случае полная секретность обмена данных осуществляется не вычислительными и техническими возможностями пользователей, их оборудования и потенциального перехватчика, а законами природы, основанными на линейности и унитарности квантовых преобразований, а также на соотношениях неопределенностей.

Необходимо рассмотреть такое явление, как коллапс волновой функции, то есть мгновенное изменение волновой функции исследуемого объекта при попытке измерить его. Пусть M_i – состояние системы до текущего измерения; i – полученный результат; M_i' – измененное состояние системы; ρ – матрица плотности; ρ_i' – измененная матрица плотности; *TrMi* – след матрицы до проведения измерения.

Тогда с помощью преобразования оператора плотности исходное состояние в результате измерений будет преобразовано в $\rho' = \frac{\sqrt{M_i}}{TrM_i\rho}\rho\sqrt{M_i'}$.

Отсюда можно сделать вывод о том, что попытки измерить состояние системы приводят к возникновению помех в ней, а значит и к возникновению ошибок на стороне приемника. Наиболее подходящими квантовыми системами, используемыми в КС для передачи информации на большие расстояния, являются фотоны. Они распространяются со скоростью света, позволяют кодировать информацию в частотных, фазовых, амплитудных, поляризационных и временных переменных. К тому же использование фотонов как носителей информации позволяет применять ряд технологических достижений в области классических телекоммуникаций – оптические волоконные линии связи, всевозможные модуляторы и преобразователи оптических сигналов.

Любая подобная система квантовой связи состоит из источника или генератора квантовых состояний. Непосредственно из среды, в которой осуществляются и реализуются эти состояния (канала связи), а также детекторов, измеряющих сами состояния. Для генерации квантовых состояний на конечных отдельных фотонах обычно используют весьма сильно ослабленные импульсы, создаваемые лазерной установкой. Основными источниками одиночных фотонов являются полупроводниковые лазеры. Из большого спектра полупроводниковых лазеров обычно используют инжекционные лазеры на основе гетероструктур с высоким коэффициентом инжекции, рис. 2 и 3. Среди множества приемных устройств одиночных фотонов лавинные фотодиоды считаются наиболее перспективными. В приемниках данного типа лавинный пробой возникает, в результате ударной ионизации нейтральных атомов в *p-n*-переходе быстрыми электронами или дырками. В результате генерируются новые пары носителей заряда, которые, двигаясь в электрическом поле перехода, вновь при столкновении с атомами образуют новые пары носителей и т. д., т. е. носители в переходе лавинообразно размножаются. На рис. 4 приведена конструкция лавинного фотодиода на основе кремния. Гетеростуктура была получена методом молекулярнопучковой эпитаксии.

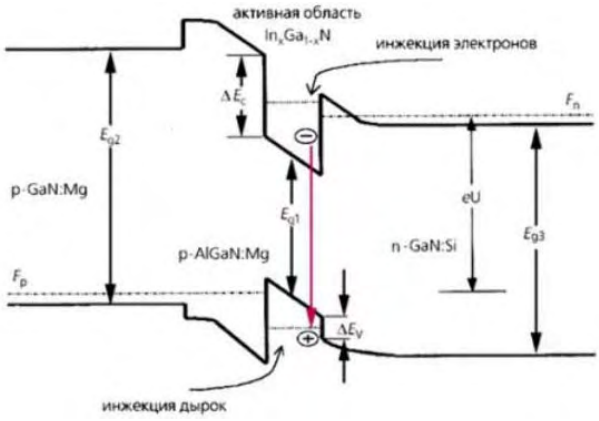


Рис. 2. Зонная диаграма энергетического спектра носителей заряда гетероструктуры с квантовыми ямами

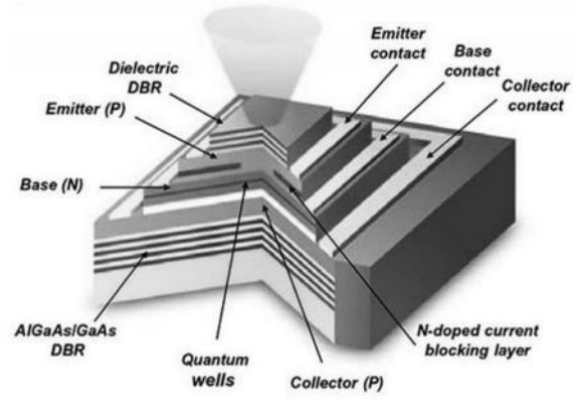
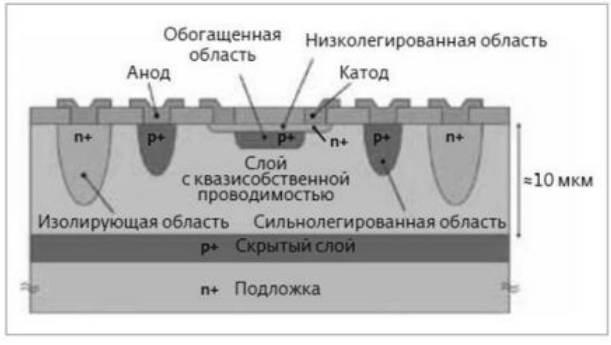


Рис. 3. Конструкция полупроводникового лазера с квантовыми ямами



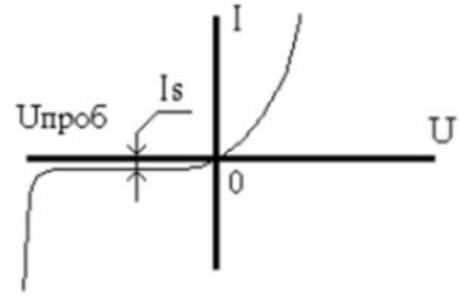


Рис. 4. Конструкция чипа лавинного фотодиода и его вольт-амперная характеристика

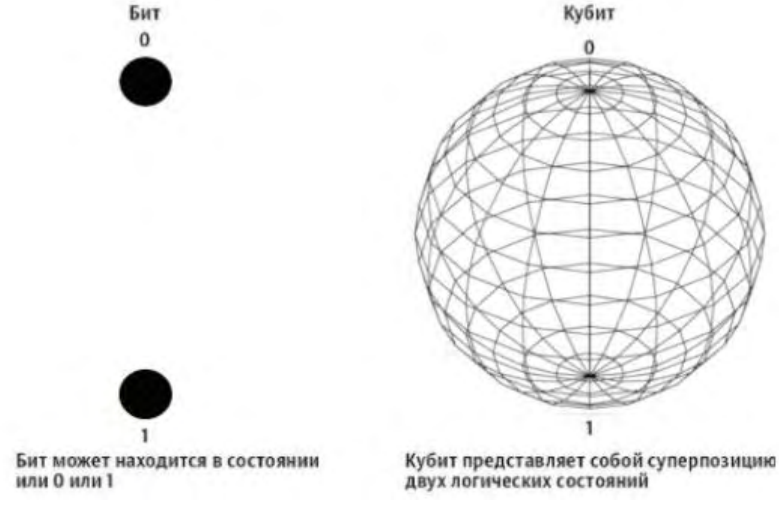


Рис. 5. Кубит квантовой информации

Квантовая механика позволяет корреспондентам на узлах связи A и B получить одинаковые квантовые состояния несущих частиц, обмениваясь кубитами по каналу связи. Кубит – квантовый бит информации (*q*-бит, qubit, от английского quantum bit). Кубиты имеют большое количество всевозможных состояний. Эти состояния можно показать как некую стрелку, указывающую на вполне конкретную и определенную точку внутри сферы. Северный полюс такой сферы эквивалентен нулю, а южный – единице. Другие положения соответствуют квантовым суперпозициям нуля и единицы. Протоколы квантовой связи, основанные на использовании кубитов, рис. 5 (под протоколами понимают алгоритм или некую последовательность действий, приводящих к решению той или иной задачи), являются наиболее разработанными и, как следствие, распространенными и простыми в реализации на нынешний момент. Ниже описана процедура обмена информацией, предложенная Ч. Беннеттом и Дж. Брассардом в 1984 году.

1. Эта процедура называется протокол передачи квантовой информации ББ84. В протоколе ВВ84 используются 4 квантовых состояния фотонов, например, направление вектора поляризации, одно из которых корреспондент на узле связи А (далее просто А) выбирает в зависимости от передаваемого бита: 90° или 135° для «1», 45° или 0° для «0».А случайным образом выбирает один из базисов. Затем внутри базиса случайно выбирает одно из состояний, соответствующее 0 или 1 и посылает фотоны, рис.6.

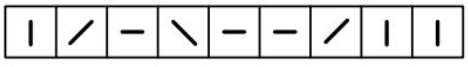


Рис. 6. Фотоны с различной поляризацией

2. Корреспондент на узле связи В (далее просто В) случайно и независимо от А выбирает для каждого поступающего фотона: прямолинейный (+) или диагональный (х) базис, рис. 7:

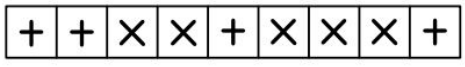


Рис. 7. Выбранный тип измерений

Затем В сохраняет результаты измерений, рис. 8:

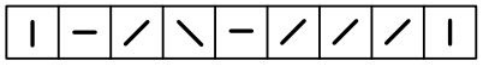


Рис. 8. Результаты измерений

3. В по открытому общедоступному каналу связи сообщает, какой тип измерений был использован для каждого фотона, то есть какой был выбран базис, но результаты измерений остаются в секрете;

4. А сообщает В по открытому общедоступному каналу связи, какие измерения были выбраны в соответствии с исходным базисом А, рис. 9.

Рис. 9. Случаи правильных замеров

5. Далее оставляют только те случаи, в которых выбранные базисы совпали. Эти случаи переводят в биты (0 и 1), и получают, таким образом, ключ, рис. 10:

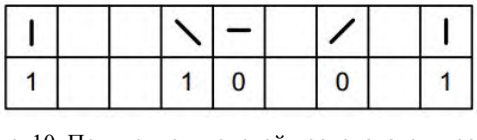


Рис. 10. Получение ключевой последовательности по результатам правильных замеров

Число случаев, в которых выбранные базисы совпали, будет составлять в среднем половину длины исходной последовательности, т. е. $n = 1/2$.

Пример определения количества фотонов, принятых В, показан в таблице.

Формирование квантового ключа по протоколу ВВ84

Двоичный сигнал Алисы	0	1	0	1
Поляризационный код Алисы	↔	↕	⤡	⤢
Детектирование Бобом	✣	✣	✣	✣
Двоичный сигнал Боба	0	1	?	?

Таким образом, в результате передачи ключа Бобом в случае отсутствия помех и искажений будут правильно зарегистрированы в среднем 50 % фотонов. Однако идеальных каналов связи не существует и для формирования секретного ключа необходимо провести дополнительные процедуры поиска ошибок и усиления секретности. При этом для части последовательности бит пользователей, в которых базисы совпали, через открытый общедоступный канал связи случайным образом раскрываются и сравниваются значения бит. Далее раскрытые биты отбрасываются. В идеальном квантовом канале (без шума) достаточно выявить несоответствие в одной раскрытой позиции для обнаружения злоумышленника. В реальной ситуации невозможно различить ошибки, произошедшие из-за шума и из-за воздействия злоумышленника. Известно, что если процент ошибок ≤ 11 %, то пользователи из нераскрытой последовательности, после коррекции ошибок через открытый общедоступный канал связи и усиления секретности, могут извлечь секретный ключ, который будет у них одинаковым и не будет известен злоумышленнику. Ключ, полученный до дополнительных операций с последовательностью, называется "сырым" ключом. При коррекции ошибок эффективным способом для согласования последовательностей А и В является их «перемешивание» для более равномерного распределения ошибок и разбиение на блоки размером k, при котором вероятность появления блоков с более чем одной ошибкой пренебрежимо мала. Для каждого такого блока стороны производят проверку четности. Блоки с совпадающей четностью признаются правильными, а оставшиеся делятся на несколько более мелких блоков, и проверка четности производится над каждым таким блоком, до тех пор, пока ошибка не будет найдена и исправлена. Процедура может быть повторена с блоками более подходящего размера. Наиболее мелкие блоки отбрасываются при наличии в них ошибки. Когда в каком-либо блоке количество ошибок окажется четным, то даже с оптимальным размером блока некоторые из них могут быть не выявлены. Для их исключения производят перемешивание последовательности бит, разбиение ее на блоки и сравнение их четности производится еще несколько раз, каждый раз с уменьшением размера блоков, до тех пор, пока А и В не придут к выводу, что вероятность ошибки в полученной последовательности пренебрежимо мала. В результате всех этих действий А и В получают идентичные последовательности бит. Эти биты и являются ключом, с помощью которого пользователи получают возможность кодировать и декодировать секретную ин-

формацию и обмениваться ей по незащищенному от съема информации каналу связи.

Таким образом, можно всецело заявить об обеспечении надежной передачи данных при помощи квантового шифрования между узлами связи, нуждающимися в обеспечении повышенной информационной безопасности, охраняемой непосредственно законами квантовой механики и не имеющей возможности раскрытия этих данных. Перспективно возможно рассмотрение использования сетей квантовой связи, работающих преимущественно в симплексном режиме между двумя и более абонентами. Аналогично можно провести параллели между использованием сетей квантовой связи воздушно-наземной ориентировки, воздушно-воздушной и, строго говоря, только космической.

Рассматривая перспективы развития воздушного канала связи, можно с должной уверенностью заявить о возможности дальнейшего создания государственных или военных каналов связи, нацеленных преимущественно на оповещение должностных лиц в пределах междугороднего канала связи (срочное оповещение), учрежденческого канала связи в силовых структурах (например, проведение срочных операций).

Экспериментальная реализация

5 июня 2019 года « Ростелеком » представил опытную сеть передачи данных с квантовым шифрованием. Она впервые использует оборудование и решения разных производителей с организацией их корректного взаимодействия на всем пути передачи данных. Также впервые в стране такая сеть имеет несколько узлов с технической возможностью подключения множества пользователей, независимо от места расположения их офисов и используемого криптографического оборудования с КРК (технология квантового распределения ключей).

Опытная сеть в Петербурге включает узлы в лаборатории «Ростелекома» на Синопской набережной, в инжиниринговом центре «СэйфНэт» на Аптекарском проспекте, а также в музее связи на Почтамтском переулке. Все они связаны между собою высокоскоростными волоконно-оптическими линиями передачи данных «Ростелекома».

Для организации защиты передачи информации с использованием КРК задействовано только отечественное оборудование и решения – Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО), «Российского квантового центра», Т8, «С-Терра».

Представленная в Санкт-Петербурге многоузловая сеть за 1 секунду вырабатывает более 2000 бит секретной ключевой информации.

Перспективы развития

Квантовая криптография еще не вышла на уровень практического использования, но приблизилась к нему. В мире существует несколько организаций, где ведутся активные исследования в области квантовой криптографии. Среди них IBM , GAP-Optique, Mitsubishi, Toshiba , Национальная лаборатория в Лос-Аламосе, Калифорнийский технологический институт (Caltech), а также молодая компания MagiQ и холдинг QinetiQ, поддерживаемый британским министерством обороны. Диапазон участников охватывает как крупнейшие мировые институты, так и небольшие начинающие компании, что позволяет говорить о начальном периоде в формировании рыночного сегмента, когда в нем на равных могут участвовать и те, и другие.

Конечно же, квантовое направление криптографической защиты информации очень перспективно, так как квантовые законы позволяют вывести методы защиты информации на качественно новый уровень. На сегодняшний день уже существует опыт по созданию и апробированию компьютерной сети, защищенной квантово-криптографичекими методами – единственной в мире сети, которую невозможно взломать.

Литература

1. Нильсен М., Чанг И. Квантовые вычисления и квантовая информация. Мир, 2006. С. 824.

2. Хренников А. Ю. Введение в квантовую теорию информации. М.: Физматлит, 2008.С. 284.

3. Альбов А. С. Квантовая криптография. М.: Страта, 2016. С. 248.

4. Рябцев И. И., Третьяков Д. Б., Коляко А. В., Плешков А. С., Энтин В. М., Латышев А. В., Асеев А. Л. Элементная база квантовой информатики II: Квантовые коммуникации с одиночными фотонами // Микроэлектроника. 2017. Т. 46. С. 131–141.

5. Молотков С. Н. Об интегрировании квантовых систем засекреченной связи (квантовой криптографии) в оптоволоконные телекоммуникационные системы // Письма в ЖЭТФ. 2009. Т. 79. Вып. 11.

СОДЕРЖАНИЕ

Пленарные доклады

Безрукова Т. В. Влияние цифровой трансформации на форму лицензионного договора 4

Десятникова М. А. Программное средство «Resource». Моделирование процессов пластического деформирования и накопления усталостных повреждений при сложных режимах малоциклового нагружения 11

Шлячков Н. А., Волгутов В. Ю., Дягель А. Р., Юнин Д. А., Жилкина О. А., Беспалова Е. Н., Пикулев А. А. Разработка и испытания макета системы каталитической утилизации радиолитического газа, образующегося в топливном растворе исследовательских ядерных реакторов 21

Секция 1. Теоретическая и математическая физика

Андреюк Н. А., Пятаков Н. П., Якутов Б. П. Численное моделирование ускорения электронов при воздействии сверхкороткого лазерного импульса на плазму водорода 28

Барабанова Д. С., Колобянина Н. В., Мжачих С. В., Алексеев А. В. Методика и программа расчета групповых констант для вторичных частиц, образующихся в многочастичных реакциях. Модель фазово-пространственного распределения 33

Буркацкий А. С., Кудасов Ю. Б., Маслов Д. А., Павлов В. Н., Сурдин О. М. Микроскопическое моделирование строения фронта ударной волны 38

Воеводин А. В., Мицура М. Н. Реализация искусственной вязкости тензорного вида в методике МИМОЗА 45

Гаврилова А. А., Резчиков В. Ю. Автоматическое перестроение интервалов разбиения спектра рентгеновского излучения в процессе счета в методике САТУРН 53

Григорьева Т. Б., Седов С. Ю. Учет влияния пористости ВВ на основе октогена на механические свойства в рамках вязкоупругой модели Максвелла – Вихерта с разрушениями 59

Десятникова М. А., Дудник Ю. Е., Иванова Г. Г. Решение задач оптимизации по методике УП с использованием библиотеки DAKOTA и метода BOX 66

Забавичев И. Ю., Насеткин К. А., Потехии А. А., Пузанов А. С. Особенности расчета подвижности носителей заряда в кремниевых полупроводниковых структурах при воздействии проникающих излучений 74

Кащеев Ю. Н., Новиков И. Г., Пушкарев А. А. Алгоритмы геометрическо-топологической декомпозиции неструктурированной сетки для случая распределенного представления данных, реализованные в методике ТИМ 79

Крутякова О. Л., Курулин В. В., Денисова О. В., Мелешкин Н. В., Сизова М. А. Валидация методов моделирования течений с низкими числами Прандтля 85

Ларионова А. А., Меньшикова А. К., Глазунов В. А. Модуль ЛОГОС-ТЕПЛО. Расчет теплообмена излучением в симметричных областях 93

Мокеев А. С., Рогачев В. Г., Кудряшов Е. А., Ямщиков В. М. Моделирование движения сферической детонационной волны из точки начального воспламенения газа 101

Осколкова О. О., Аксенов С. В. Корчажкин Д. А., Пузан А. Ю. Моделирование в пакете программ «ЛОГОС» течения струй двигательных установок ракет-носителей 108

Потехин А. А., Забавичев И. Ю., Насеткин К. А., Пузанов А. С. Перенос носителей заряда через формирующийся кластер радиационных дефектов в субмикронных полупроводниковых структурах ... 113

Синельникова А. А., Замалиев Э. И. Применение метода локальных итераций для решения уравнений диффузии в трехмерной модели турбулентного перемешивания Никифорова – Козлова в рамках методики МИМОЗА 120

Столмакова Е. С., Долженков И. В. Трехмерная методика расчета генерации и распространения сверхширокополосного электромагнитного импульса в эллиптическом излучателе 126

Стручков А. В., Жучков Р. Н. Численное моделирование задач аэродинамики со статической адаптацией сетки под особенности решения 132

Трунова З. Д., Косарим С. С., Юносова В. А. Пакет программ ЛОГОС-Прочность. Верификация модуля решения задач модального анализа 139

Тятюшкина Е. С., Козелков А. С., Курулин В. В., Крутякова О. Л., Уткин Д. А., Плыгунова К. С. Чухманов Н. В., Смолкина Д. Н., Герасимов В. Ю. Особенности моделирования всех стадий цунами оползневого происхождения в рамках единой математической модели 144

Хлебников А. А., Волков М. В. Нестационарная волновая модель лазера-генератора с многоуровневой кинетикой населенностей 151

Секция 2. Экспериментальная физика

Аблясова О. С., Пойдашев Д. Г., Компанец В. О., Чекалин С. В., Рябов Е. А. Динамика фотохимических процессов, индуцированных фемтосекундным излучением в смешанных молекулярных кластерах 160

Балабанов А. С., Валиева Г. Р., Маляров Д. В., Пукита Д. А., Рыбин Д. А. Проектирование и отработка взрывных метающих устройств, формирующих компактные элементы со скоростью полета от 1,5 до 4,5 км/с 163

Бобков А. А., Зыков Л. И., Смышляев С. П., Сюндюков А. Ю. Регистрация космических объектов на фоне ночного неба видеокамерами с низким порогом чувствительности 167

Борисков А. С., Поляков Л. Е., Брехова А. А. Численное моделирование динамики протонного пучка в ускоряющих структурах с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой 175

Брехова А. А., Поляков Л. Е. Расчет электродинамических характеристик резонатора линейного ускорителя протонов с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой на энергию до 2 МэВ 181

Вершинин И. С., Кулик В. В., Гаганов В. В., Долгополов А. В., Теменков В. С. Стенд для исследования световыхода сцинтиляционных детекторов: результаты эксперимента с источником гамма-квантов 187

Демьянов А. В., Пикулев А. А., Майорников В. С., Некрасов М. В., Филатов П. Н., Авдеев А. Д., Царёва Т. Н. Дистанционное загрузочное устройство центрального экспериментального канала ИЯР ВИР-2М 194

Захарова С. А., Грунин А. В. Влияние импульсов давления на динамику неравновесных носителей заряда в треках, образуемых тяжелыми заряженными частицами в кремниевых структурах микроэлектроники 197

Здарьев А. Е., Лазарев С. А. Моделирование однократных и множественных сбоев в микросхеме памяти с использованием библиотеки GEANT4 202

Катыков А. Н., Артемчук Е. В., Васильев А. М., Занегин И. В., Зотов Д. Е., Калинин М. П., Шиберин И. В. Новое поколение взрывных режущих устройств для демонтажа оснований морских нефтегазовых сооружений 206

Козлов А. А. Особенности образования проводящей среды искрового и дугового разрядов в вакуумном разряднике 210

Краев Е. В., Макогон И. С. Влияние ионного ассистирования на оптические характеристики диэлектрических покрытий 215

Кузьмин И. В., Зималин Б. Г., Савкин А. В., Рукавишников А. Н., Костюнин Р. Ю., Мишина И. В. Задающий генератор с управляемыми пространственно-временными и энергетическими параметрами лазерного импульса установки «Луч» 220

Липенкова К. А., Брехова А. А., Поляков Л. Е., Сметанин М. Л. Термодинамический расчет ускоряющего резонатора начальной части линейного ускорителя протонов 227

Липенкова Л. И., Батьков М. Ю., Мильченко Д. В., Пятойкина А. И. О возможности предварительной оценки детонационной способности ВВ-ТТ по анализу снимков микроструктуры 231

Зималин Б. Г., Кошечкин С. В., Кузьмин И. В, Макаров С. А., Мочкаев С. В., Островкий В. А., Савкин А. В. Создание стенда и отработка методики тестирования активных дисковых элементов на наличие металлических микровключений 235

Макогон И. С., Краев Е. В. Влияние методов очистки поверхности подложки перед нанесением оптического покрытия на лучевую прочность изделия 243

Мартыненко С. П., Горбунов А. А., Иванов В. В., Лопатин П. Ю., Гаранин Р. В., Кострикин А. В., Пугачева В. Н, Белов И. А., Рукавишников А. Н., Никольский И. В. Исследование эффективности конверсии лазерного излучения в энергию плазмы, отраженного света и рентгена 246

Зималин Б. Г., Савкин А. В., Мочкаев С. В., Кошечкин С. В., Кузьмин И. В., Макаров С. А., Островский В. А. Отработка методик измерения порога разрушения оптических элементов под действием лазерного излучения на стенде контроля лучевой прочности 251

Савкин С. В., Кошечкин С. В., Ладейщикова В. В., Лесков В. И., Мальцева Н. С., Свиридов В. В. Повышение энергетических характеристик и качества пучка лазерного излучения на выходе силового усилителя установки «Луч» 258

Санжаревский Д. А., Труфанов А. Н., Кабальнов Ю. А., Оболенский С. В. Радиационно стойкие фотодиоды для работы в фотовольтаическом режиме 264

Невмержицкий Н. В., Сотсков Е. А., Сеньковский Е. Д., Бодров Е. В., Фролов С. В., Анисифоров К. В., Кривонос О. Л., Гавриш А. Р., Соколова А. С. Результаты отработки метода трассерной визуализации для измерений пульсаций скорости в зоне турбулентного перемешивания жидких и газовых сред 269

Соколов А. Ю., Спахов А. В., Коновалов П. И. Моделирование процесса ионной бомбардировки фотокатода хронографических электронно-оптических преобразователей 275

Спирин И. А., Пронин Д. А., Митин Е. С., Симаков В. Г., Брагунец В. А., Цветков А. В., Шестаков Е. Е., Сустаева Ю. М., Шевлягин О. В., Вахмистров С. А. О механизме детонации взрывчатых смесей тэна с гидрокарбонатом натрия 280

Аристова Е. Ю., Белов И. А., Воронин А. Ю., Деркач В. Н., Золотовский А. В., Краюхин А. А., Кузин М. Г., Мазанов В. А., Мальцева Н. С., Рогачёв В. Г., Сиренко А. В., Скорочкин Ю. В., Стародубцев П. В., Стёпушкин С. Н., Суслов С. Н. Лазерное моделирование разрушительного воздействия ядерных взрывов на различные астероиды 287

Тарасов Ф. И., Смирнов Е. Б., Николаев А. Ю., Канунников Р. Н., Малёв В. В., Лобачёв А. С., Мухин Д. В. Модификация индикаторного метода определения скорости звука в ударно-сжатых материалах 293

Телегина В. Ю., Зималин Б. Г., Кузин М. Г, Маринин А. А. Задающий генератор с управляемой временной формой импульса для облучения различных конструкций мишеней на установке «Луч» …. 299

Тепаев Д. А., Казаков С. А., Агапов А. А., Власов Ю. В., Демидов В. А., Володченков С. И. Влияние конструкции взрывного размыкателя тока на эффективность его работы 305

Цветков А. В., Токарев В. А., Борисенок В. А., Брагунец В. А., Баклашов Д. И, Симаков В. Г., Крюков А. В., Седов А. А., Родионов А. В., Шестаков Е. Е. Регистрация перегрузок с использованием микроволновой диагностики на лабораторном комплексе для испытания элементов электроники 308

Шуркаев А. В., Авдеев А. Д., Дягель А. Р., Котков С. П., Табаков С. О., Юнин Д. А. Метод расчета числа делений в водном импульсном реакторе по выходу продуктов деления 313

Ямщиков В. М., Тимаев Д. С., Качалин Г. Н., Кудряшов Е. А., Рогачев В. Г. Расчетно-экспериментальное исследование нагрева диэлектрических зеркал непрерывным лазерным излучением 318

Секция 3. Инженерные науки

Анашкин А. С., Гутников А. И., Пискунов Р. М., Краевский А. С., Леушев В. П., Леушева Т. А. Многоканальное устройство гальванической развязки для измерения сигналов в двухпроводных линиях связи 324

Блинов А. С., Доценко В. В., Никульшин М. В., Путилин О. С., Титов В. В., Чечеткин И. Н. Обоснование прочности макета ручного пневматического миномета при статическом и динамическом нагружении 327

Васильев А. В., Антонов А. С., Поносова Л. В., Лавронович А. Н. Разработка и внедрение технологических решений при изготовлении моделей изделий для аэродинамических испытаний 331

Горохов С. В., Негин А. В., Сергеев В. Е. Совершенствование технологии изготовления магниторезистивных преобразователей 335

Дивак А. А. Новые научные разработки в области применения электронного луча и их использование на комбинате «Электрохимприбор» 340

Дорохов С. П., Салов А. С. ПАВ-радиометка на основе многополоскового ответвителя со сниженным уровнем паразитных сигналов 344

Закирова И. Р., Коршунова Г. Х., Пасечник М. П., Силяева С. Н., Дорофеев А. А. Разработка технологии ремонта антиадгезионного покрытия 350

Батарев С. В., Гришин А. В., Застылов А. А., Пещенко А. В., Хорошко А. Н. Методика определения момента времени встречи изделия с преградой по результатам измерения параметров воздушных волн …..... 355

Гусакова Т. А., Ильин Р. А., Колесников В. Г. Камера взаимодействия лазерной установки нового поколения 361

Каменева Н. А., Каменев В. Г. Моделирование в среде ZEMAX и экспериментальная отработка четырехканальной телецентрической системы для регистрации цифровых голограмм 368

Царев М. В., Мокрушин В. В., Царева И. А., Забродина О. Ю., Коршунов К. В., Канунов А. Е., Кашафдинов И. Ф., Малков И. Л. Изучение свойств порошков стали 316L и сплава Inconel 718, применяемых в аддитивных технологиях, с помощью методов исследования поверхности 374

Китаева Е. С., Некрасов М. В., Барсукова М. Ю. Аппаратно-программный комплекс управления температурами печей капролонового участка .....

Коянкина Е. П. Параметрический и функциональный контроль современных быстродействующих микросхем с применением тестера FORMULA HF3 390

Куликов В. Е., Поляков В. В., Стигунов В. И. Применение ПЛИС в защищенных системах связи и контроля физических объектов 392

Лонин К. А., Панов В. А., Патрушев В. Л., Савчук Д. В., Соловьев С. А., Шишулин Д. Н. Методы расчетного прогнозирования длительных механических свойств конструкционных материалов механических систем реакторной установки 396

Михалицын Е. А., Седаков А. Ю. Особенности проектирования микрополосковых симметрирующих трансформаторов Маршанда с развязывающими цепями 400

Мухачева С. Б., Леушев В. П., Иванов А. В. Внедрение технологии 3D-печати многослойных печатных плат 408

Насеткин К. А., Пузанов А. С., Потехин А. А., Забавичев И. Ю., Насеткин И. А. Прогнозирование реакции субмикронных структур «кремний на изоляторе» на воздействие низкоинтенсивных проникающих излучений с учетом разброса их электрофизических характеристик 413

Баринов А. А., Костин С. А., Осокин А. П., Погребской А. А. Бортовой высокоинформативный блок преобразования и передачи информации 418

Рякин А. А., Койнов О. В., Никульшин М. В. Расчетные исследования тепломассообмена экспериментальных установок БМ-ЛР и БМ-П для исследований рекомбинаторов 421

Сарпова Т. Е. Разработка технологии изготовления коммутационных плат на алюминиевых основаниях для приборов силовой электроники 426

Сырвачев С. А. Вакуумное напыление прецизионных покрытий из легкоплавких металлов, получение кадмиевого покрытия с контролируемым распределением толщины на внутренней поверхности детали симметричной формы 429

Ухов А. Н., Баранова О. В., Кононов С. В. Создание технологии изготовления кремниевых радиационно стойких чувствительных элементов микроакселерометра для перспективной системы телеметрии 431

Долбищев С. Ф., Бондарев А. В., Чесноков Е. В. Транспортный упаковочный комплект для транспортирования жидкого отработавшего ядерного топлива 436

Проскурин А. В., Шлишевский А. В. Расчетно-экспериментальное определение значений собственных частот колебаний корпуса и параметров корпуса, определяющих эти значения 439

Секция 4. Информационные системы и технологии

Алешкин В. А. Система централизованного управления компьютерной сетью «Aramid-DS» 448

Афонина Г. В., Семёнов Г. А., Дроздов И. Ю., Иошкина М. А. Программное обеспечение для обработки и хранения данных, получаемых при проведении облучательных экспериментов на импульсных реакторах и критстендах 453

Баринов Н. А., Ежов Д. В., Собанин Д. С. Разработка программного модуля для моделирования движения строем с интеграцией в платформу «ОптИМУС» 460

Бутенко Е. А., Тростин С. А. База данных «Учет несчастных случаев в РФЯЦ-ВНИИЭФ» 466

Васильева Е. А., Огородников А. В., Крючков И. А. Стохастическо-аналитическая модель поражения для систем мультиагентного моделирования 472

Горелова С. С., Ведерников В. Л., Горбатенко Н. В., Дунькович В. В., Чераева О. А. Исследование библиотеки инфраструктуры информационных технологий (ITIL) 479

Дмитриева Е. В., Серова Т. Ю., Зверьков Ю. В., Захаров М. М., Бондарь И. Л. Использование ПО Secret Net для автоматизации контроля целостности файлов проверкой их контрольных сумм 486

Дубровин Р. Ю., Аннин Д. Г., Афонин А. П., Жорин В. В., Логинов А. А., Нуштаев И. А. Автоматизированное рабочее место пользователя для работы в автоматизированных системах различного класса защищенности 490

Евланов Д. В., Коваленко О. В., Огородников А. В. Расширение функциональных возможностей программного комплекса CONTINOUS RISK ASSESSMENT 492

Емельянова С. С., Ильченко Е. А. Поиск оптимальной конфигурации сетевой файловой системы на многопроцессорной вычислительной системе КБ-2 501

Ескова Е. А., Надуев А. Г., Кожаев Д. А. Графические средства ЛОГОС МИП для подготовки задач связанного расчета 509

Зверьков Ю. В., Корнилов Ю. И., Дмитриева Е. В., Захаров М. М., Бондарь И. Л. Реализация механизма обмена почтовыми сообщениями пользователей защищенной автоматизированной системы и пользователей сети «ИНТЕРНЕТ» 512

Киселев Е. Н., Иванов К. В., Гордеев А. В., Мустаева Н. А, Колпаков Н. И. Технология интеграции в ЛОГОС.ПреПост модулей препроцессинга для счетных программ сторонних разработчиков 515

Кондратьев А. Б., Коваленко О. В., Крючков И. А., Ежов Д. В., Огородников А. В. Реализация метаэвристических алгоритмов в ВИП «ОптИМУС» 522

Мяндин Д. А. Разработка и реализация информационной системы поддержки принятия конструкторских решений при автоматизированном проектировании электронных модулей систем автоматики 528

Носков В. О., Аннин Д. Г., Афонин А. П. Автоматизированное рабочее место пользователя для переноса информации между автоматизированными системами, обрабатывающими информацию различного уровня конфиденциальности 532

Павлин А. Ю., Акимов Н. Н., Жулин А. В. Аспекты обеспечения кибербезопасности автоматизированных систем управления технологическими процессами атомных электростанций 534

Панкова Т. А. ,Исаев В. Д, Лотов В. Н. Программный комплекс управления системой диагностики параметров лазерного излучения многоканальной лазерной установки 537

Собанин Д. С., Коваленко О. В., Ерошкина И. В., Крючков И. А., Хочкин Н. И., Варгина Е. Ф., Тихомиров Ю. В. Возможности программного обеспечения для оценки эффективности систем физической защиты «ОБЗОР» 544

Тараканов А. А., Безгодов Е. В., Давлетчин Ю. Ф., Мошкин Д. Л., Никифоров М. В., Пасюков С. Д, Попов И. А. Системы регистрации и измерительные методики экспериментальных стендов для выполнения исследований в интересах водородной безопасности атомных электростанций с водо-водяными энергетическими реакторами 548

Ярулина А. А., Дьяков А. В., Козлов Д. О., Надуев А. Г., Тишкин Д. А., Тюхтина П. А., Шемякин А. В. Клиент-серверная система контроля лицензий ЛОГОС 552

Трусова Ю. О., Вовк Н. Н., Анисимов Ю. А., Овсов А. В., Царев М. А., Мулин Н. Н., Копылов С. Н. Влияние контроля мощности на атмосферные оптические линии связи во время снегопада и дождя 558

Тюндина А. А., Побуринная Н. А., Кожаев Д. А. Механизм пользовательских функций модульной интеграционной платформы ЛОГОС 562

Долгов В. И., Мартынов А. П., Хазов Д. А. Исследование спектральных характеристик формирователей сигналов на базе цифровых вычислительных синтезаторов 566

Долгов В. И., Мартынов А. П., Хазов Д. А. Повышение отношения сигнал/шум цифрового вычислительного синтезатора путем передискретизации выходного сигнала 573

Чернов М. А., Байков Э. Г., Левкин С. А., Меньшиков Е. В., Гришин А. О., Максимов Д. С., Лабутин А. К., Царев С. А. Вычислительный сервер с высокоплотной компоновкой 579

Якунина С. А., Леванов К. В., Вовк Н. Н., Жуненко Е. А., Гаврилин А. Н., Ефремов Р. В., Понеделко И. В., Егоров А. С., Сазанов М. С. Интеграция системы защиты канала передачи информации методами квантовой криптографии на предприятиях стратегического значения 583

Научное издание

Молодежь в науке

Сборник докладов
восемнадцатой научно-технической конференции
(29–31 октября 2019 г.)

Компьютерная подготовка оригинала-макета:
Мишкина Н. В., Моисеева Е. В.

Печатается с оригинальных текстов авторов

Подписано в печать 14.10.2020 Формат 60×84/8
Печать офсетная Усл. печ. л. ~68 Уч.-изд. л. ~82
Тираж 150 экз. Зак. тип. 1195-2020

Отпечатано в ИПЦ ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»

607188, г. Саров Нижегородской обл., ул. Силкина, 23