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



МОЛОДЕЖЬ В НАУКЕ

Сборник докладов

15-й научно-технической конференции (25–27 октября 2016 г.)

Саров 2017

Авторы-составители: Н. Н. Попова, Е. В. Забавин

Главный научный редактор: д-р физ.-мат. наук В. П. Соловьев

Заместитель главного редактора: канд. физ.-мат. наук И. Е. Пономарев

Редакционный совет: д-р физ.-мат. наук А. Е. Дубинов; д-р техн. наук А. П.Мартынов; д-р физ.- мат. наук В. С. Нефедов; д-р физ.- мат. наук В. А. Раевский; д-р физ.- мат. наук В. А. Разуваев; 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. техн. наук А. И. Коршунов.

Молодежь в науке: сборник докладов 15-й научно-технической конференции. – г. Саров: М 75 ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2017. – 546 с.: ил.

ISBN 978-5-9515-0359-6

Ежегодная конференция позволяет молодежи поддерживать научные связи между предприятиями атомной отрасли.

В сборник вошли доклады молодых ученых и специалистов ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ», ФГУП «ВНИИА им. Н. Л. Духова», ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова», ФГУ «ГХК», ОАО «ОКБМ Африкантов», ВНИИНМ им. А. А. Бочвара, ГНЦ РФ-ФЭИ, ОИВТ РАН, ИПММ С-ПбПУ, ООО «РКК "Энергия"», студентов и аспирантов: НИЯУ МИФИ, Тульского ГУ, Самарского национального исследовательского университета им. С. П. Королева и СарФТИ НИЯУ МИФИ, представленные на секциях «Теоретическая и математическая физика», «Экспериментальная физика», «Инженерные науки», «Информационные системы и технологии».

> УДК 001 ББК 72

Будущее формируется сегодня

«...благодаря вам, кто работает в этой замечательной, чрезвычайно важной для нас сфере деятельности – в науке, преумножается уникальный научный потенциал нашей страны, рождаются прорывные идеи, создаются современные технологии и наукоемкие производства»

> В. В. Путин, 10.02.2015 Вручение премии Президента молодым ученым

«Мы должны знать в десять раз больше, чем нам требуется сегодня»

Академик Ю. Б. Харитон

Пленарные доклады

ВЫСОКОСКОРОСТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ УДАРНИКОВ ИЗ РЕАКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПРЕГРАДОЙ

В. В. Барабин, А. В. Гладцинов, И. В. Занегин, А. П. Калмыков, А. В. Кальманов, А. В. Свидинский

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

Реакционные материалы (PM) – класс веществ, состоящих обычно из невзрывчатых твердых компонентов, инертных в обычных условиях и способных к горению или взрыву при сильном механическом воздействии. PM активно используются за рубежом при разработке боеприпасов повышенного могущества.

Важной особенностью РМ является относительно высокая прочность, сравнимая с конструкционными материалами. Основные преимущества РМ:

 – энерговыделение после проникания обеспечивает мощное запреградное действие;

 срабатывание без взрывателя (увеличение полезного объема в малокалиберных боеприпасах, повышение безопасности боеприпасов ввиду отсутствия чувствительного элемента).

Целью данной работы являлось определение эффективности замены инертных ударников (осколков, фрагментов) на ударники из РМ.

Экспериментальные исследования проводились с использованием пороховой нагружающей установки (ПНУ) калибром 14,5 мм в два этапа. Целью экспериментальных исследований первого этапа являлось определение опытным путем параметров высокоскоростного взаимодействия (внедрение и пробитие преграды, запреградная скорость и свечение в запреградной области) инертных ударников (И) и ударников, выполненных из различных составов РМ, по металлическим преградам. Схема проведения экспериментальных исследований первого этапа представлена на рис. 1. В стволе *1* разгонялся метаемый объект *3*. МО состоит из цилиндрического ударника (ударник из РМ, либо инертный ударник) Ø 9,9 мм и направляющего устройства (полиэтилен) Ø 14,5 мм, рис. 2. Вес ударника составлял \approx 6,5 г, общий вес МО составлял \approx 15 г. После выхода МО из ствола ПНУ направляющее устройство отсекалось, и ударник соударялся с мишенью *10*, рис. 1.

Экспериментальные исследования проводились с тремя составами РМ при скорости соударения ударника с мишенью 600, 900, 1300 и 1800 м/с, угол подхода \approx 90°, угол атаки \approx 0°. В разные составы РМ входили Al, Mg, Ni, Ti, W и фторопласт в разных пропорциях. Во всех экспериментах ударники из РМ сохранили свою механическую прочность при разгоне в стволе ПНУ.

В качестве мишеней 10, рис. 1, использовались стальные листы, гарантировано пробиваемые ударниками. Значения толщин мишеней были выбраны по результатам предварительных расчетов пробивного действия ударника из РМ. В качестве щитасвидетеля 11, рис. 1, также использовались стальные листы (для определения параметров осколочного поля, возникающего после пробития мишени ударником).



Рис. 1. Схема проведения исследований первого этапа с РМ: 1 – стапель; 2 – ствол ПНУ; 3 – МО; 4 – пороховой МЗ; 5 – затвор; 6 – ложемент; 7 – упор; 8 – демпфер; 9 – отсекатель; 10 – мишень 150 × 150 × h мм; 11 – щит-свидетель 500 × 500 × 3 мм; 12 – скоростная видеокамера



Рис. 2. Схемы и внешний вид МО: а – схемы МО разных типоразмеров, б – внешний вид МО с ударниками из РМ разного состава

Для определения состояния, пространственного положения ударников (И) и из (РМ), их скорости движения на траектории свободного полета до момента взаимодействия с преградой, в процессе взаимодействия с преградой, а также для определения

запреградной скорости проводилась видеосъемка с помощью скоростной видеокамеры (20000 кадр/с) 12, рис. 1.

Результаты экспериментальных исследований первого этапа представлены в табл. 1.

Таблица 1

№ эксперимента	Наиме- нование РМ	Тип ударника	Длина ударни- ка, мм	Масса ударника, г	Плотность ударника, г/см ³	Толщина мишени, мм	Скорость движения по видео, м/с	Кинетическая энер гия ударника, кДж	Запреградная скорость ¹⁾ , м/с	Запреградная ско- рость от скорости ударника, %	Время свечения ²⁾ , мс								
5		И				3	636	1,25	430 (o)	67,6	-								
6		PM				5	631	1,29	440 (o)	69,7	5,3								
9		И				4	902	2,52	590 (п)	65,4	-								
10	Состав	PM	80.85	62.65	≈10,5	4	911	2,70	556 (o)	61,0	7,0								
13	Nº 1	И	8,0÷8,3	0,270,3		8	1301	5,25	625 (o)	48,0	-								
14		PM				0	1301	5,50	666 (0)	51,2	10,0								
1		И				10	1753	9,53	910 (o)	51,9	_								
2		PM					10	1773	10,25	_3)	_	5,0							
7		И				3	620	1,21	354 (п)	57,1	-								
8		PM				1		5	636	1,34	385 (п)	60,5	>25						
11		И				4	894	2,48	673 (п)	75,3	-								
12	Состав	PM	12.0-13.5	62-66	,6 ≈6,3		890	2,62	526 (o)	59,1	>1,3								
15	Nº 2	И	12,0.13,5	0,2.0,0		0	1318	5,39	666 (o)	50,5	-								
16		PM					0	1324	5,81	666 (o)	50,3	100							
3		И				10	1781	9,83	_3)	_	-								
4		PM				10	1744	10,08	_3)	_	>10,0								
17		И				2	603	1,18	_4)	-	-								
18	Состав	PM	40.0 - 42.0	65·66 ~22	~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	~? ?	3	581	1,12	_4)	-	-							
19	Nº 3	И	40,0742,0	0,5-0,0	~2,5	4	896	2,60	426 (п)	47,5	_								
20		PM	1											4	919	2,81	445 (o)	48,4	3,6

Результаты экспериментальных исследований первого этапа

¹⁾ - обозначение в скобках: о - крупный осколок соизмеримый с исходным размером ударника; п - мелкие осколки в виде частиц пыли;

²⁾ - свечение в запреградной области между мишенью и щитом-свидетелем после проникания ударника через мишень («-» свечение отсутствует); ³⁾ – не представляется возможным определить по кадрам скоростной видеосъемки;

⁴⁾ – сквозного пробития мишени не произошло.

Характерные фотографии мишени и щитасвидетеля после проведения эксперимента представлены на рис. 3.



Рис. 3. Фотография мишени: а – лицевая сторона, б – тыльная сторона



Рис. 4. Фотография щит-свидетеля: а – лицевая сторона, б – тыльная сторона

На рис. 5 представлено характерное сопоставление кадров видеосъемок двух экспериментов, выполненных в одинаковой постановке, с инертным ударником и ударником из РМ. Свечение в запреградной области между мишенью и щитом-свидетелем после проникания инертного ударника через мишень отсутствует, а после проникания ударника из РМ свечение, связанное с протеканием химической реакции в РМ, присутствует во всех экспериментах.

После анализа результатов экспериментальных исследований первого этапа сделаны следующие выводы:

– в отношении внедрения и пробития преграды, запреградной скорости, а также параметров осколочного поля отличий между ударниками из РМ и инертными ударниками для каждого из трех составов не наблюдается.

– свечение в запреградной области между мишенью и щитом-свидетелем для инертных ударников отсутствует, у ударников из РМ свечение присутствует во всех экспериментах (длительность свечения может достигать 100 мс), что свидетельствует о протекании химической реакции с выделением энергии.

– в отношении внедрения и пробития ударником преграды, а также осколочного поля отличий не наблюдается для составов № 1 и № 2. Состав № 3 в этой характеристике уступает двум другим составам.

 время свечения в запреградной области между мишенью и щитом-свидетелем для состава № 2 наибольшее, а для состава № 3 наименьшее.



Рис. 5. Кадры видеосъемки экспериментов № 7 и № 8 (см. табл. 1): а – эксперимент № 7 с инертным ударником, 620 м/с, б – эксперимент № 8 с ударником из РМ, 636 м/с

Целью экспериментальных исследований второго этапа являлось определение запреградного действия инертных ударников и ударников из PM, а также их сравнение между собой. Оценивался так называемый «термобарический» эффект – повышение давления в ограниченном пространстве за счет химической реакций (горение, взрывчатое превращение), происходящей в PM. Схема проведения исследований представлена на рис. 6.

В начальный момент времени поршень 12 размещался в разгонной горловине замкнутой трубы 10 (объемом ≈ 30 л) так, что его верхняя грань выступала над разгонной горловиной. Ударник после пробития мишени 11 попадал в трубу 10. В результате в трубе создавалось избыточное давление, под действием которого поршень начинал движение. По ускорению поршня на начальном участке можно судить о величине избыточного давления, создаваемого в замкнутом объеме трубы. В экспериментах использовались



Рис. 6. Схема проведения исследований второго этапа с РМ: 1 – стапель; 2 – ствол ПНУ; 3 – МО; 4 – пороховой МЗ; 5 – затвор; 6 – ложементы; 7 – упор; 8 – демпфер; 9 – отсекатель; 10 – труба; 11 – мишень; 12 – поршень; 13 – скоростная видеокамера

Таблица 2

Результаты экспериментальных исследований второго этапа

№ эксперимента	Наимено- вание РМ	Тип ударника	Высота ударника, мм	Масса ударника, г	Плотность ударника, _г /см ³	Толщина мишени, мм	Скорость ударника по видео, м/с	Сквозное пробитие мишени	Средняя скорость поршня ¹ , м/с	Средний импульс поршня ¹ , Н.с	Макс. давление в трубе ² , атм.
1*	Состав № 1	И	75-80	58-64	~10.5	4	886	+	5,5	0,07	0,04
2*		PM	7,5-0,0	5,0.0,4	10,5	· ·	888	+	16,8	0,22	0,35
3*	Coorer Mo 2	И	12.0.12.0	~65	~6.2	0	1307	+	0,23	0,03	0,02
4*	COCTAB JV2 2	PM	12,0-13,0	~0,5	~0,5	0	1362	+	11,7	1,59	3,0
5*	Coores Ma 1	И	75.00	60.65	~10.5	0	1199	+	0,7	0,10	0,03
6*	Coctab Jvº 1	PM	7,5-8,0	0,0-0,5	~10,5	8	1337	+	6,4	0,87	0,45
7*	Cooran Ma 2	И	27.0:40.0	~6.5	~7.2	8	1324	-	_	_	-
8*	COCTAB JV2 5	PM	37,0-40,0	~0,5	~2,5	4	1337	-	-	-	-

¹⁾ – на расстоянии равном одной высоте поршня от верхней грани разгонной горловины трубы;

²⁾ – расчетная оценка по кинетической энергии поршня.

поршни двух типов: алюминиевый массой ≈13 г (опыт № 1* и 2*, см. табл. 2) и стальной массой ≈135 г (опыты № 3*–8*, см. табл. 2).

Результаты экспериментальных исследований второго этапа представлены в табл. 2. Из табл. 2 видно, что использование ударников из РМ дает рост избыточного давления в $\approx 10-100$ раз по сравнению с ударником из инертного материала. Состав № 2 превосходит состав № 1 по этому параметру в $\approx 5-7$ раз.

Заключение

Результаты проведенных экспериментальных исследований показывают, что применение ударников из РМ вместо инертных ударников (осколков, фрагментов) перспективно.

Замена инертных ударников на ударники из РМ не сказывается на пробивной способности в диапазоне скоростей 600–1800 м/с. Кадры видеосъемки показывают интенсивное протекание химической реакции (горение, взрывчатое превращение) в РМ после пробития мишени, приводящее к заметному «термобарическому» эффекту.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И СРЕДСТВ ОБУЧЕНИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЮ ИЗДЕЛИЙ ПО НОВОЙ СКВОЗНОЙ 3D-ТЕХНОЛОГИИ НА ЦИФРОВОМ ПРЕДПРИЯТИИ

С. В. Пичугова, А. И. Боровик

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

Введение

В контексте развития политики импортозамещения особую роль играет применение на современных промышленных предприятиях машиностроения и приборостроения комплексных информационных систем управления жизненным циклом изделий. В РФЯЦ-ВНИИЭФ создана система сквозного 3Dпроектирования-подготовки производства, которая базируется на отечественном программном обеспечении (ТИС:PLM). В настоящее время ТИС:PLM тиражируется на предприятия машиностроения и приборостроения.

В связи с этим возникает потребность массовой переподготовки специалистов: конструкторов, технологов, ИТ-специалистов для успешной работы в новой информационной системе и применения технологии сквозного 3D-проектирования – подготовки производства в процессах основной деятельности.

Причем важным критерием обучения является именно не обучение навыкам работы в отдельных программных средах, которое могут предложить и сами разработчики программного обеспечения (ПО). Основное требование к обучению – это максимальное приближение условий и примеров, на которых проводится обучение, к реальным информационным системам, внедряемым на предприятии.

С целью предоставления такого обучения, специалистами создана методика и программа обучения по курсу «Управление данными об изделии». Проведено разворачивание прототипа системы сквозного проектирования на аппаратной платформе учебного класса.

Дисциплина содержит сведения о технологии сквозного проектирования, архитектуре системы сквозного проектирования как основного инструмента управления жизненным циклом изделий. Рассмотрены вопросы применения электронной структуры изделий (ЭСИ), электронных моделей изделий (ЭМИ) в ходе сквозного проектирования, базовые принципы технического электронного документооборота, необходимые квалифицированному инженерному составу при работе на современных высокотехнологичных предприятиях машиностроения и приборостроения. Значительное внимание уделено освоению навыков работы в системе управления данными об изделии, которая является ядром сквозной технологии. Освещены вопросы архитектуры и администрирования системы управления данными. Рассмотрены методики управления потоками работ,

сквозного планирования работ, проектирования изделий на базе ЭСИ, управления конфигурациями и изменениями конструкторско-технологической документации.

Дисциплина «Управление данными об изделии» является углубленными знаниями в области технологии сквозного проектирования. Дисциплина знакомит студентов с основными методами и средствами управления жизненным циклом изделий; особое внимание уделено освоению практических навыков работы с программным инструментарием (PDMсистемой).В ходе практических занятий используются типовые сценарии и методики проектирования и технологической подготовки производства изделий машиностроения и приборостроения. Освоение курса проходит с применением отечественного ПО, адаптированного и сконфигурированного в рамках учебного класса, включающего специально разработанные учебные примеры и сценарии бизнеспроцессов «3D-проектирование – технологическая подготовка производства».

Общее описание сквозной технологии

Под *сквозной технологией* (или сквозным циклом) понимается автоматизируемая деятельность в информационной системе, охватывающая следующие стадии жизненного цикла изделий (ЖЦИ): проектирование, технологическая подготовка производства, изготовление, эксплуатация, ликвидация. В состав сквозной технологии входят как основные, так и вспомогательные процессы ЖЦИ.

Основные процессы:

• разработка технических документов и данных;

• согласование и утверждение документов и данных;

• проведение изменений в документах и данных;

 регистрация и хранение в архиве, выдача и абонентский учет документов;

• обмен данными между системами PDM, EDM, MES, ERP;

• внесение изменений в справочники НСИ.

Вспомогательные процессы:

• администрирование и защита информации;

• техническая поддержка пользователей на этапе эксплуатации и сопровождение ИС на всех этапах ее жизненного цикла.

Сквозная технология включает компоненты: цели предприятия, бизнес-процессы, персонал, продукция, информационные системы, инфраструктуру. Основой технологии сквозного проектирования является комплексная процессная модель (КПМ) предприятия. КПМ содержит формализованные описания предметных областей, связанных с деятельностью предприятия:

•стратегия, ключевые показатели;

- дерево целей;
- •продуктовая линейка;
- •организационная структура;

• процессная модель: процессы управления, процессы развития, основные процессы, процессы безопасности и контроля, поддерживающие процессы;

•каталоги знаний, научно-производственной базы, промышленных технологий, документов, ИС.

Предприятия ОПК, в основном, – это комплексные структуры с иерархической формой организации управления. Такая форма исторически была ориентирована на решение специализированных классов задач. Эту форму организации называют *функциональной иерархией*. Каждая структурная единица занимается, в основном, созданием определенного класса продукции.

Для разработки и внедрения автоматизированных систем управления ЖЦИ и построения технологии сквозного проектирования на предприятии необходимо, прежде всего, формализовать его деятельность. Деятельность функциональных иерархий протекает со включением в процесс разных структурных единиц из разных подразделений. Иерархически эти подразделения могут быть не связаны друг с другом (находятся на одном уровне управления), поэтому движение бизнес-процессов в такой организации затруднено. Фактически сквозной бизнес-процесс разработки изделий существует на предприятии, но его формализация и сбор данных по нему затруднены.

При построении технологии сквозного проектирования на предприятии применяется *процессный nodxod*. Он состоит в том, что работы по созданию продукции разных классов рассматриваются как проекты с установленными сроками, ресурсами и результатом. Поэтому, фактически, в таких проектах имеют место бизнес-процессы, которые реализуются для достижения целей проекта. Каждое изделие рассматривается как совокупность бизнес-процессов по его разработке, изготовлению, поставке и обслуживанию.

Типовой ЖЦИ включает:

• исследование и обоснование разработки;

- разработку;
- производство и поставку;
- надзор в эксплуатации;

• снятие с производства и ликвидацию.

На основе процессного подхода реализуется преобразование бизнес-процессов предприятия в процессы информационных систем. Они сгруппированы по предметным областям и объединены в функциональные блоки.

Таким образом, ЖЦИ – это процессы создания продукции, то *функциональные блоки* – это процессы управления информацией.

В целом на предприятии выделяют два крупных класса информационных систем. Это бизнес-приложения и системы промышленной автоматизации.

Бизнес-приложения автоматизируют процессы управления предприятием.

Информационные системы, автоматизирующие процессы управления ЖЦИ, образуют класс *систем промышленной автоматизации*. Система промышленной автоматизации (или система сквозного проектирования) имеет четырехуровневую архитектуру. Она включает: архитектуру бизнес-процессов, архитектуру приложений, архитектуру данных, архитектуру инфраструктуры.

Система сквозного проектирования – это комплекс взаимодействующих информационных систем (ИС), обрабатывающих информацию согласно типовым бизнес-процессам и функционирующий в рамках АС в защищенном исполнении и решающий задачи: по управлению ЖЦИ; по обеспечению сквозной технологии 3D-проектирования; по защите информации. Система сквозного проектирования включает типовые функциональные блоки, направленные на автоматизацию решения основных задач управления ЖЦИ (рис. 1).

Существует 9 функциональных блоков, автоматизирующих основные, повторяемые процессы деятельности проектанта, разработчика в ИС, выполняемые им на протяжении всего ЖЦИ. Это функциональные блоки:

- конструкторское проектирование;
- схемотехническое проектирование;
- проектирование экспериментальных установок;
- расчетное моделирование;

разработка интерактивных электронных технических руководств (ИЭТР);

- технологическая подготовка производства;
- изготовление;
- экспериментальные исследования;

• сопровождение изготовления, эксплуатации и ликвидации.

Для реализации сквозного цикла в ИС все программные продукты, форматы передаваемых данных, интеграционные взаимосвязи между ними должны быть формализованы и унифицированы. Не допускается применение разнородных программных компонентов, а также расхождения с установленными сценариями работы. Это может привести к потере, дублированию информации, а также к потере времени и финансовых ресурсов на конвертирование форматов и сбор данных из систем, не предназначенных для их общего хранения.

На уровне описания архитектуры системы сквозного проектирования применяется понятие «Функция ИС». Это формальный объект модели представления функционального блока.



Рис. 1. Типовая архитектура системы сквозного проектирования

Сквозной цикл в системе сквозного проектирования реализуется посредством консолидации всех участников процессов ЖЦИ в ходе разработки электронной структуры изделия (ЭСИ). ЭСИ – конструкторский документ, содержащий в электронной форме состав сборочной единицы, комплекса или комплекта и иерархические отношения (связи) между его составными частями и другие данные в зависимости от его назначения.

ЭСИ содержит информацию в зависимости от этапа, который происходит в ЖЦИ в реальном мире. Поэтому наполнение ЭСИ и уровни доступа участников на разных стадиях ЖЦИ различаются. Однако правила формирования ЭСИ, форматы и структуры данных являются стандартизованными, как и процессы создания изделий в ИС.

Основными компонентами ЭСИ являются электронные модели изделий (ЭМИ) и электронные документы (ДЭ).

ЭМИ представляется в виде набора данных, которые вместе определяют геометрию изделия и иные свойства, необходимые для изготовления, контроля, приемки, сборки, эксплуатации, ремонта и утилизации изделия.

В зависимости от стадии ЖЦИ различаются следующие виды ЭСИ: функциональный состав; конструкторский состав; технологический состав; производственный состав; физический состав; эксплуатационный состав; логистический состав.

В ЭСИ применяются общие для всех участников и централизованно управляемые корпоративные справочники.

Для успешной и эффективной реализации технологии сквозного проектирования на предприятии необходимо, чтобы каждый участник процессов ЖЦИ работал в ИС по единым правилам и стандартам. Для этого весь персонал предприятия, задействованный в основных процессах, проходит обучение и последующую аттестацию.

Методика освоения технологии сквозного проектирования включает три уровня обучения:

1) инструментальное обучение – обучение работе с ПО.

2) сценарное обучение – моделирование реальной работы на тестовых примерах.

3) прикладное обучение – применение ПО в реальной производственной деятельности на местах.

Программа и методика обучения

Основными знаниями, полученными в ходе обучения по курсу «Управление данными об изделии», являются:

– понятия отехнологии сквозного проектирования, системе сквозного проектирования, типовом жизненном цикле изделий (ЖЦИ) и информационной поддержке этапов ЖЦИ, об электронной структуреи электронной модели изделияи методах управления ЭСИ и ЭМИ;

 – понятия об архитектуре и функциональных возможностях PDM-системы, о способах ее настройки и администрирования;

 – знания об информационных объектах, объектной модели изделия в сквозном проектировании, дискреционном управлении доступом к информационным объектам, управлении метаданными;

 – знания о механизме планирования и управления потоками работ, об управлении изменениями электронной конструкторско-технологической документации; представление о типовых сценариях сквозного проектирования и технологической подготовки производства изделий машиностроения и приборостроения.

Навыками, полученными в ходе освоения курса, являются:

 – настройка PDM-системы для работы в рамках технологии сквозного проектирования;

 применение ЭСИ, ЭМИ, электронных документов в ходе сквозного проектирования и осуществление управления доступом и метаданными информационных объектов;

 планирование и управление потоками работ, конфигурирование изделий и проведение изменений;

– осуществление импорта-экспорта данных в PDM-системе, синхронизации баз данных;

- овладение принципами управления данными об изделии на основе ЭСИ, ЭМИ, электронной кон-

структорско-технологической документации и на базе типового сквозного ЖЦИ;

 – овладение навыками применения PDMсистемы в технологии сквозного проектирования.

В соответствии с требованиями Федерального государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования по ожидаемым образовательным результатам, обучаемый должен получить комплексную систему знаний по дисциплине «Управление данными об изделии» при изучении взаимосвязанных тем.

Курс «Управление данными об изделии» содержит 14 лекционных и 22 практических занятий.

Структура лекционных и практических занятий представлена в табл. 1.

Таблица 1

Номер и наименование лекции	Номер и наименование практического занятия							
Тема 1. Технология сквозного проектирования. Определение. Общее описание. Архитектура системы сквозного								
проектирования. Сквозной цикл в информационной системе								
Лекция 1. Технология сквозного проекти-								
рования								
Лекция 2. Архитектура системы сквозного								
проектирования.								
Лекция 3. Сквозной цикл в информацион-								
ной системе								
Тема 2. Общие сведения о PDM-с	Тема 2. Общие сведения о PDM-системе. Информационный объект. Архитектура Лоцман.PLM							
Лекция 4. Информационный объект	 Практическое занятие 1. Настройка Лоцман: PLM Практическое занятие 2. Клиентский модуль Лоцман: PLM 							
Лекция 5. Архитектура Лоцман: PLM	• Практическое занятие 3. Модуль администрирования Лоцман: PLM							
Тема 3. Методы и средства управления данными об изделии								
Лекция 6. Методики проектирования	• Практическое занятие 4. Управление данными об изделии							
Пекция 7. Метолики проектирорация	• Практическое занятие 5. Взаимодействие программных компонентов							
лекция 7. методики проектирования	 Практическое занятие 6. Конфигурирование изделий 							
Лекция 8. Методики проектирования	 Практическое занятие 7. Состояния информационных объектов Практическое занятие 8. Модуль Лоцман:Архив 							
Тема 4. Методы и средства управления	я процессом сквозного проектирования. Управление потоками работ.							
Управление	изменениями электронной документации							
Лекция 9. Методики управления ЖЦИ	 Практическое занятие 9. Управление версиями объектов 							
	• Практическое занятие 10. Управление базами данных и метаданными							
	 Практическое занятие 11. Синхронизация баз данных 							
Лекция 10. Методики управления ЖЦИ	• Практическое занятие 12. Управление доступом к объектам							
	• Практическое занятие 13. Импорт-экспорт данных							
	• Практическое занятие 14. Отчеты и шаблоны ввода							
	 Практическое занятие 15. Планирование работ 							
Лекция 11. Управление потоками работ	• Практическое занятие 16. Модуль Лоцман:WorkFlow							
	• Практическое занятие 17. Управление потоками работ							
Лекция 12. Управление изменениями	• Практическое занятие 18. Управление изменениями							
Тема 5. Организация типового процесса сквозного проектирования								
Лекция 13. Организация типового процес- са сквозного проектирования	• Практические занятия 19-20. Конструкторское проектирование							
Лекция 14. Организация типового процес- са сквозного проектирования	• Практические занятия 21–22. Технологическая подготовка производства							

Лекционные и практические занятия

Программно-аппаратная база для обучения

Обучение проводится на базе учебного класса в количестве 20 посадочных мест. Для проведения практических занятий необходим проектор, подключенный к компьютеру преподавателя.

Для реализации процесса обучения на базе ТИС:PLM необходима минимальная аппаратная конфигурация, табл. 2.

Та	блица	2
1 4	, O JI II L u	_

Спецификация	оборудования
Спецификация	ооорудования

№	Наименование	Кол., шт.
	Оборудование рабочих мест	20
1	Процессор не хуже IntelCore i7	
2	Объем ОЗУ не меньше 8 ГБ	
3	Объем Видеопамяти не менее 1 ГБ	
4	Сетевой адаптер со скоростью передачи не менее 1 Гбит	
5	Манипуляторы, клавиатура и мышь	
6	Наушники	
7	Монитор не менее 22"	
	Оборудование серверов	2
1	Процессор серверного типа не хуже 2,2 ГГц	
2	Объем ОЗУ не меньше 8 ГБ	
3	Объем HDD типа SSD не менее 500 ГБ	
4	Сетевой адаптер со скоростью передачи не менее 1 Гбит	
5	Манипуляторы, клавиатура и мышь	
6	Монитор не менее 22"	

Разворачивание учебного класса базируется на применении виртуальных машин заранее подготовленной конфигурации. Применяются следующие виды конфигурации:

- виртуальная машина сервер домена;
- виртуальная машина сервер приложений;
- виртуальная машина сервер СУБД;

виртуальная машина – клиентское рабочее место.

Архитектура учебного класса на базе виртуальных машин является легко масштабируемой, и при необходимости может быть растиражирована на несколько классов, или может быть реализовано изменение количества рабочих мест.

В работе учебного класса применяется программное обеспечение, перечень которого приведен в табл. 3.

Лицензии программных продуктов являются сетевыми и располагаются на сервере лицензий. В качестве сервера лицензий может быть использован любой из серверов учебного класса.

Спецификация программного обеспечения

№	Наименование	Кол., шт.
	Базовое программное обеспечение	
1	Windows 7 Russian Максимальная	20
2	OfficeProfessionalPlus 2013 Russian	21
3	Windows Server Standard 2008R2 Russian	2
4	Microsoft SQL Server 2008 R2 Standard x64 Edition	1
	Специализированное программное обеспечение	
1	КОМПАС-3D V16, система трехмерного моделирования	20
2	Электронный Справочник конструктора, редакция 4	20
3	ЛОЦМАН:PLM 2014	20
4	Справочник Материалы и Сортаменты 2014	20
5	Справочник Материалы и Сортаменты 2014: Интерфейс к САD	20
6	Справочник Стандартные Изделия 2014: Крепеж 2D и 3D	20
7	Справочник Стандартные Изделия 2014: Детали, узлы и конструктивные элементы 2D и 3D	20
8	Справочник Стандартные Изделия 2014: Электрические аппараты и арматура 3D	20
9	Справочник Стандартные Изделия 2014: Интерфейс к САD	20
10	САПР ТП ВЕРТИКАЛЬ 2014, система автоматизированного проектирования технологических процессов	20
11	Справочник технолога 2014	20
12	Нормирование материалов 2014	20
13	Нормирование трудозатрат 2014	20
14	ЛОЦМАН:PLM 2014 Интерфейс к САD	20
15	ЛОЦМАН:PLM 2014, доступ к серверу приложений	1
16	ЛОЦМАН:PLM Архив 2014	20

Типовой сценарий сквозного процесса конструкторско-технологической подготовки производства

Разработан типовой сценарий сквозного процесса конструкторско-технологической подготовки производства, который отражает реальный производственный процесс, проходящий на предприятии. Освоение программных средств в контексте данного процесса дает основные практические навыки, которые затем обучаемый может применять в ходе своей производственной деятельности.

Типовой сценарий содержит описание выполнения в системе Лоцман: PLM действий по созданию электронной структуры изделия (ЭСИ) и управлению информационными объектами ЭСИ:

1) формирование электронной структуры изделия;

2) формирование плана-графика работ в системе управления планированием Лоцман: PLM. Выдача заданий на разработку. Работа с заданиями плана-графика;

3) разработка электронной структуры сборочной единицы вЛоцман: PLM;

4) создание бизнес-процесса в Лоцман Work-Flow. Работа с заданиями бизнес-процесса;

5) проведение нормоконтроля электронной конструкторской документации на базе вторичного представления;

6) перевод объектов электронной структуры изделия в состояния в Лоцман: PLM;

7) помещение информационных объектов в архив;

8) создание и проведение извещений об изменениях;

9) создание технологического процесса в Лоцман: PLM.

Заключение

В результате работы разработана программа обучения по курсу «Управление данными об изделии», являющемуся составной частью курса «Цифровое предприятие».

Разработаны презентационные материалы лекций и методические рекомендации для выполнения практических занятий. Материалы и методика описывают процессы сквозного 3D-проектирования – технологической подготовки производства на базе системы управления данными об изделии.

Подготовлен учебный класс для проведения занятий, представляющий собой модель реальной клиент-серверной архитектуры автоматизированной системы предприятия. Учебная конфигурация является адаптивной и масштабируемой, может быть без дополнительных временных затрат развернута в классах, аудиториях, помещениях, предназначенных для обучения слушателей курса.

Проведено обучение 108 студентов – молодых специалистов ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» на базе ВУЗа СарФТИ НИЯУ МИФИ.

Особое внимание при разработке методики и проведении обучения уделено применению новой сквозной технологии разработки изделий, использованию ЭСИ, ЭМИ, ДЭ в процессах проектирования и подготовки производства.

Обучающие материалы базируются на применении программного обеспечения отечественного производства, что полностью соответствует политике импортозамещения, проводимой на государственном уровне.

Программа и методика обучения может быть применена на ведущих предприятиях машиностроения и приборостроения при внедрении ТИС:PLM.

О СВОБОДНОКОНВЕКТИВНОМ ТЕПЛООБМЕНЕ НАД ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТЬЮ С ЛОКАЛИЗОВАННЫМ НАГРЕВОМ

<u>Е. Ф. Храпунов</u>, Ю. С. Чумаков

Политехнический университет Петра Великого, г. С.-Петербург

Введение

Из всего многообразия свободноконвективных течений можно выделить течения, которые возникают над наклонными нагретыми поверхностями, в частности, над горизонтальной поверхностью. Данному виду течения уделено гораздо меньше внимания по сравнению, например, с течениями в замкнутых объемах или течением у вертикальных нагретых поверхностей. Исследование потока воздуха над горизонтальной поверхностью затруднено по причине неустойчивости течения, отсутствию внешних стабилизирующих факторов (таких как вертикальная стенка), а также крайней чувствительности потока к малым возмущениям.

Начало исследований свободноконвективных потоков положено еще в середине XX века работами, в которых представлены приближенные решения уравнений, описывающих свободную конвекцию [1]. Основным методом решения системы являлось использование интегральных методов [2]. В результате подобного решения получена количественная информация о средних характеристиках потока - температурных и скоростных профилях над источником, линиях тока течения. При подобном методе анализа становится возможным описать средние характеристики потока, однако информация о более тонкой структуре течения, ее особенностях, точно так же, как и информация о переходных процессах, остается вне области рассмотрения. Этот недостаток частично удалось устранить, используя методы визуализации: теневой шлирен-метод, метод интерферометрии, метод фиксирования дыма при испарении стеарина с нагреваемой поверхности [3].

Комплексную информацию о потоке стало возможно получить по мере развития численных методов. Работы, в которых представлены результаты численного моделирования течения похожей конфигурации, так же немногочисленны[4]. Чаще всего они посвящены решению конечно-разностных аналогов уравнений Навье - Стокса с использованием модели Буссинеска. Стоит признать, что с современной точки зрения конечно-разностный подход к редифференциальных уравнений Навье – шению Стокса устарел, в более современных работах, посвященных численному моделированию, используется метод конечных объемов (МКО).Известны работы, с использованием популярных моделей турбулентности k-є [5], k-ω, а также с использованием вихреразрешающих подходов типа LES [6].

Неоспоримым достоинством всех численных методов является возможность получения большого объема данных в обширной области течения. Так же получаемое решение дает представление о сложной структуре потока во всей расчетной области. Однако в настоящее время по-прежнему заметна тенденция недостатка экспериментальных данных, описывающих участок формирования потока. Усложнение моделей расчета обусловлено необходимостью более точно описывать структурные особенности при переходных процессах, процессах пространственного формирования. Недостаток экспериментальных данных затрудняет корректное сравнение результатов физического эксперимента и численного моделирования, а так же дальнейшего усовершенствования расчетных кодов и моделей.

Постановка задачи

Для исследования свободноконвективного теплообмена создан экспериментальный стенд (рис. 1), позволяющий воспроизвести восходящее течение необходимой конфигурации. Основой элемент - нагреваемый круглый алюминиевый диск диаметром 19 см, температура которого поддерживается постоянной в ходе эксперимента, а окружающая диск горизонтальная поверхность охлаждается проточной водой при помощи теплообменника. Область формирования воздушного течения ограждена проницаемой камерой, уменьшающей влияние внешних возмущений. Кроме того, важным является возможность проведения визуализации потока с последующей фото и видео регистрацией процессов. Одна из возможных схем представлена на рис. 2. В этом варианте камера полностью заполняется дымом, который, попадая в плоскость лазерного ножа, регистрируется фотокамерой. В отличии от точечных измерений получение картин течения позволяет более детально разработать модель течения, внести ясность в поведение измеряемой величины.

Для проведения точечных измерений предусмотрено трехкомпонентное координатное устройство, с высокой точностью устанавливающее зонд в задаваемые координаты. В данной работе измерения температуры внутри потока проводились с помощью термометра сопротивления. В ходе измерений датчик с частотой 50 Гц в течении минуты фиксирует сигнал, соответствующий изменению актуальной температуры, после чего вычисляются среднее \overline{T} и пульсаци-

онное $Tu' = \sqrt{\left(T_i - \overline{T}\right)^2}$ значения. Для измерения теп-

лового потока разработана методика, суть которой заключается в следующем. Вблизи поверхности диска предполагается наличие слоя теплопроводности (т. е. слоя с малым влиянием конвективного движения на теплопередачу). Распределение температуры в таком слое описывается линейным законом. При проведении эксперимента измеряется температура воздуха по нормали к диску (координата z) до высоты 4 мм с шагом 0,2 мм, первое измерение проводится на высоте 0,2 мм от поверхности. Частота опроса датчика составляет 50 Гц и подбиралась проведением серии экспериментов. Для получения одной экспериментальной точки измеряемый актуальный сигнал усредняется за 1 минуту. В результате измерений из экспериментальных точек выбирается линейный участок, по которому экстраполяцией вычисляется температура поверхности диска, а так же производная $\partial T/\partial z$.



Рис. 1. Экспериментальный стенд: 1 – нагреваемый диск, 2 – элемент теплообменника, 3 – защитная сетка, 4 – координатное устройство, 5 – температурный датчик



Рис. 2. Схема визуализации течения: 1 – нагреваемый диск, 2 – изолирующая сетка, 3 – лазер и оптическая система, 4 – плоскость лазерного ножа, 5 – фотокамера

В дальнейшем экспериментальные данные используются для сравнения с результатами численного моделирования, проведенного в коде ANSYS Fluent. В пакете реализовано решение уравнений движения сплошной среды в рамках метода конечных объемов (МКО). В общем виде на расчетной сетке решается следующая система уравнений Навье – Стокса

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \left(\rho \vec{v} \right) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho \vec{v} \right) + \nabla \left(\rho \vec{v} \vec{v} \right) = -\nabla \left(p + \frac{2}{3} \mu \nabla \vec{v} \right) + 2\nabla \left(\mu \overset{\bullet}{S} \right) + \rho \vec{g} , \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho h \right) + \nabla \left(\rho h \right) = \nabla \left(k \nabla T \right)$$

где ρ – плотность [кг/м³], $\vec{v} = (u, v, w)$ – вектор скорости [м/с], p – статическое давление [Па], μ – молекулярная вязкость [кг/м·с], $\rho \vec{g}$ – массовая сила тяжести [Н], E – внутренняя энергия [Дж], k – коэффициент теплопроводности [Вт/м·К], h – энтальния [Дж], c_p – удельная теплоемкость [Дж/(кг·К)].

Система дополняется уравнением состояния, общий вид которого

$$\rho = \frac{p}{R/M_w T} \tag{2}$$

где p – давление [Па], R = 8,31 – универсальная газовая постоянная [Дж/моль·К], M_w – молярная масса среды [кг/моль].

Задача решается в осесимметричной ламинарной постановке. Уравнение состояния упрощается согласно модели гипозвукового течения [9].С точки зрения физики протекающих процессов оптимальными для описания теплообмена между алюминиевым диском и воздухом являются условия сопряженного теплообмена (условия четвертого рода). В рамках этого подхода в расчетную область добавляется твердотельный блок с физическими свойствами алюминия, в котором решается уравнение теплопроводности $\frac{\partial T}{\partial t} = a^2 \Delta T$, где а – коэффициент температуропроводности алюминия [м²/c], $\Delta = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ – оператор Лапла-На границе контакта двух блоков (возca. дух/алюминий) приравниваются температуры и теп- $T_{al}\Big|_{BC\ CD} = T_{air}\Big|_{BC\ CD}$ ловые потоки

$$\lambda_{al} \left. \partial T_{al} \left| \partial n_{al} \right|_{BC,CD} = \lambda_{air} \left. \partial T_{air} \left| \partial n_{airBC,CD} \right| \right.$$
 Подоб-

ная постановка позволяет формирующемуся течению влиять на температуру поверхности, а, следовательно, и на теплообмен.

В качестве критерия, характеризующего формирующееся свободноконвективное течение, по аналогии с работами других авторов, выбрано число Грас-

гофа
$$Gr = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\upsilon^2}$$
. В силу предположения об осе-

симметричности течения в качестве линейного размера выбирается радиус диска L = R = 0,095 м. Значение коэффициента кинематической вязкости определяется

Диапазон исследуемых чисел Грасгофа.

$T_{\rm HCT}$, ^o C	40	60	80	100	120	140	160	180	200	300
$T_{\rm o}, {}^{\rm o}C$						25				
$Gr \cdot 10^6$	2,79	5,09	6,88	8,25	9,28	10,05	10,69	10,99	11,20	11,58

по пленочной температуре. Представляемые результаты соответствуют различным температурам источника, диапазон исследуемых чисел Грасгофа представлен в таблице.

Разработка модели течения основана на обобщении картин визуализации, полей температуры и температурных пульсаций, а так же данных о теплообмене между нагретым диском и окружающим воздухом. Основной интерес представляет область формирования потока, информация о которой немногочисленна и носит отрывочный характер.

Обзор результатов

На рис. 3 и 4 представлены мгновенные картины линий тока вблизи поверхности диска при относительно небольшом числе Грасгофа Gr = $5,09 \cdot 10^6$. Линии тока в пристенной области параллельны и меняют свое направление только вблизи центра источника, восходящее течение присутствует только в центре диска. При удалении от диска линии тока становятся вертикальными, при этом сохраняя свою параллельность друг другу и оси струи. Линии тока эжектируемого течения параллельны горизонтальной поверхности и меняют свое направление лишь вблизи границы потока. Течение характеризуется отсутствием видимого вихревого движения даже в области изменения направления вектора скорости.



Рис. 3. Линии тока вблизи поверхности



Рис. 4. Линии тока над диском

Параллельность линий тока сохраняется до чисел Грасгофа $Gr \approx 6,88 \cdot 10^6$. При увеличении числа Грасгофа (увеличения температуры диска) картина течения качественно меняется: вблизи оси факела происходит отрыв потока, спровоцированный локальным перегревом масс воздуха. Этот механизм можно описать следующим образом. Первоначально дошедшие до центра воздушные массы имеют достаточную температуру для формирования восходящего течения. Однако следующий за оторвавшейся массой воздух имеет недостаточную температуру, чтобы продолжить подъем с той же скоростью, и осевая скорость факела уменьшается. При этом скорость течения в пристенном слое также уменьшается, то есть создаются условия для его интенсивного прогрева. Торможение пристенного слоя позволяет прогреть в нем воздух до критической температуры, при которой выталкивающая сила будет превалировать над радиальным градиентом давления, в результате чего происходит отрыв пограничного слоя в виде всплывающего термика, рис.5, который при движении вверх в конечном итоге сливаться с факелом, резко увеличивая его диаметр. Далее процесс переходит в устойчивое периодическое состояние. Частота подъема термиков, при этом, увеличивается с ростом температуры источника. На рис. 6 представлены фрагменты энергетических спектров актуальных температур на оси факела при различных числах Грасгофа. Четко выделяется характерная частота подъема термиков для каждого из рассмотренных случаев.



Рис. 5. Подъем вихревых термиков над диском

При увеличении числа Грасгофа ($Gr \approx 11, 2 \cdot 10^6$) температурное поле над нагреваемым диском имеет два максимума (рис. 7): один соответствует оси струи, второй – месту подъема термиков. Как видно из соответствующих профилей осредненной температуры (рис. 8), координата образования термика у поверхности составляет примерно половину радиуса, после чего происходит движение всплывающей массы воздуха к факелу – координата локального

максимума приближается к оси симметрии. На некоторой высоте над источником (порядка 15 мм) всплывающие структуры уже не идентифицируются, температура монотонно уменьшается от оси факела до его периферии.



Рис. 6. Изменение характерной частоты при увеличении числа Грасгофа



Рис. 7. Поле средней температуры над диском при Gr = 11,2·10⁶



Рис. 8. Профили средней температуры на различных высотах над диском при Gr = 11,2.106

Отдельное внимание следует уделить изменению энергетического спектра актуальной температуры (рис. 9). При увеличении высоты над нагретой поверхностью спектр становится более «заполненным» высокими частотами. Этот факт указывает на возможное появление и развитие турбулентности в области развитого течения.



Рис. 9. Энергетические спектры на двух высотах над нагреваемым диском при Gr = 11,2.10⁶

На рис. 10 представлены профили пульсаций. Максимум пульсаций соответствует точкам перегиба профилей средней температуры, а в области слияния термиков в непрерывную струю наблюдается образование протяженной зоны с высокой степенью интенсивности пульсаций температуры. Так на высоте 10мм над источником эта область составляет половину от толщины формирующегося факела. Дополнительно отметим, что профили средней температуры в этой зоне становятся монотонными из-за отсутствия в этой области термиков, наличие локальных максимумов для них не характерно.



Рис. 10. Профили пульсации температуры на различных высотах над диском

Одним из основных результатов модели течения над нагретым диском может быть определение параметров теплообмена воздуха с горячей поверхностью диска. В качестве таких параметров могут быть использованы коэффициент теплообмена α и температура поверхности диска. На рис. 11 представлены профили средней температуры по нормали к поверхности при числе Грасгофа Gr = $6,88 \cdot 10^6$. Толщина слоя теплопроводности не постоянна и уменьшается при приближении к оси. На периферии толщину можно оценить как ~2,5 мм, а вблизи оси лишь ~1,5 мм. Связан этот эффект с увеличением влияния конвективного теплопереноса на теплообмен в пристенном слое, нарушающего линейность профиля.



Рис. 11. Профили средней температуры по нормали к нагреваемому диску

На рис. 12 представлен результат измерения теплового потока на поверхности нагреваемого диска. Хорошо видно, что максимум теплового потока соответствует минимальной температуре поверхности, а радиальная координата минимума теплового потока практически совпадает с координатой максимума температуры. Ближе к оси симметрии тепловой поток уменьшается, что соответствует малому градиенту температур.



Рис. 12. Тепловой поток и температура на поверхности диска

Далее представлены результаты сравнения результатов численного и физического моделирования в коде ANSYS Fluent. На рис. 13 приведено изменение во времени избыточной температуры на высоте z = 10 мм над поверхностью диска на оси симметрии, полученного в результате численного и физического экспериментов. Несмотря на количественные различия в значениях температуры, качественный характер зависимостей совпадает.



Рис. 13. Актуальная температура на высоте z = 10 мм на оси струи

Результаты численного моделирования лля $Gr = 11, 2 \cdot 10^6$ (рис. 14, 15) удовлетворительно согласуются с результатами эксперимента на высотах 2 мм и 4 мм. Расхождения при дальнейшем увеличении высоты над поверхностью диска (рис. 16) можно объяснить следующим образом. В физическом эксперимента вихревые структуры при подъеме быстро теряют устойчивость, разрушаются и сливаются с факелом. В свою очередь наличие оси симметрии в численной постановке позволяет увеличить высоту подъема вихревых структур. Таким образом, на некоторой высоте над поверхностью диска в эксперименте наблюдается слияние термика и факела, а в расчете – продолжение подъема идентифицируемого вихря. Вообще говоря, подъем вихревой структуры в осесимметричной постановке означает подъем кольцевого вихря, обладающего большей устойчивостью. При физическом моделировании, разумеется, равномерный подъем вихревого кольца маловероятен, структура начинает терять симметрию на малом расстоянии от стабилизирующей поверхности. По этой причине получено хорошее соответствие в области, которой в физическом эксперименте свойственна осевая симметрия. Дальнейшее развитечения должно корректно предсказываться тие в трехмерной постановке.



Рис. 14. Профили средней избыточной температуры на высоте 2 мм



Рис. 15. Профили средней избыточной температуры на высоте 4 мм



Рис. 16. Профили средней избыточной температуры на высоте 10 мм

Заключение

В работе представлены результаты экспериментального и численного исследования свободноконвективного потока, формирующегося над локализованным источником тепла. Для исследования течения сконструирован экспериментальный стенд, позволяющий воспроизвести поток необходимой конфигурации, а так же провести необходимые измерения. Численное моделирование осуществлено в коммерческом пакете ANSYSFluent. Особое внимание уделено анализу картин течения, полученных с помощью методов визуализации. Проведено исследование влияния числа Грасгофа на формирующееся течение, в ходе которого установлен факт возникновения низкочастотного периодического движения всплывающих термиков, нарушающих непрерывность формирования пристенной струи. При этом частота подъема вихревых структур увеличивается с увеличением числа Грасгофа.

С помощью точечных измерений подробно исследованы температурные поля:

 восходящее периодическое движение термиков приводит к нарушению монотонности (появлению локальных максимумов) зависимости средней температуры от радиальной координаты;

 в тонком приповерхностном слое обнаружена область, теплопроводности, характерная линейной зависимостью средней температуры от координаты по нормали к диску;

 получены данные о распределении локального числа Нуссельта по поверхности диска.

Получены данные о температуре поверхности и тепловом потоке в широком диапазоне чисел Грасгофа. Отмечается неоднородность распределения температуры поверхности и теплового потока к ней.

Литература

1. Гебхарт, Джалурия Й., Свободноконвективные течения, тепло- и массообмен, 1991.

2. Rouse H., YihC. S., Humphreys H. W. Tellus, 4, 201, 1952.

3. Юсеф, Тарасюк Теплоотдача в условиях свободной конвекции от обращенных вверх изотермических горизонтальных поверхностей / Теплоотдача, т. 104, № 3, 1982, С. 85–93.

4. Робинсон, Либурди Расчет свободноконвективной теплоотдачи от горизонтального нагреваемого диска / Теплоотдача, № 3, 1988, С. 104–111.

5. Apichart Chaengbamrung Turbulent plumes generated by a horizontal area source of buoyancy, A thesis submitted in fulfillment of the requirements for the award of the degree PhD of Engineering, 2005.

6. Minh Vuong Pham, Frédéric Plourde, Son Doan Kim Large-eddy simulation of a pure thermal plume under rotating conditions, Physics of Fluids 18, 2006.

СПЕКТРОМЕТРИЯ ИОННОЙ ПОДВИЖНОСТИ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ

Ю. Р. Шалтаева

НИЯУ МИФИ, Москва

Спектрометрия ионной подвижности(СИП)широко используемый метод анализа газовых смесей и жидкостей, который обеспечивает наилучшее соотношение массогабаритных параметров, стоимости, параметров обнаружения, скорости анализа, широкого спектра детектируемых веществ. Повышенная угроза терроризма в последние годы требует усовершенствования досмотрового оборудования, в частности разработки новых приборов на основе спектрометрии ионной подвижности для надежного обнаружения и идентификации следовых количеств запрещенных веществ в режиме реального времени. Спектрометрия ионной подвижности также позволяет решать актуальные аналитические задачи медицины, такие как диагностика различных заболеваний на основе анализа выдыхаемого человеком воздуха. Диагностический метод основан на выделительной функции легких и изменении следовых количеств различных молекул в составе выдыхаемого воздуха в зависимости от патологии. В докладе описываются инженерные решения применения СИП: усовершенствование и автоматизация пробоотбора, исследованиегибридных методов, таких как спектрометрия приращения ионной подвижности – спектрометрияионной подвижности (DMS-IMS), поликапиллярная спектрометрия ионной подвижности (MCC-IMS), спектрометрия ионной подвижности - масс-спектрометрия (IMS-MS).

Введение

Метод спектрометрии ионной подвижности [1], рис. 1, основывается на том, что ионизованная моле-

кула любого вещества обладает вполне определенной подвижностью в слабом электрическом поле (К), определяемой как отношение скорости дрейфа иона (Vd) к напряженности электрического поля (Е). Для приведения результатов измерений подвижности (К) к стандартным значениям температуры и атмосферного давления вводится параметр приведенной подвижности (К₀), рассчитываемый по формуле:

$$K_0 = K \cdot (273/T) \cdot (P/760)$$

где значение температуры (T) задается в градусах Кельвина, а значение давления дрейфового газа (P) в миллиметрах ртутного столба.

СИП, рис. 2, можно использовать:

– для определения качества сырья и готовой продукции в пищевой [2, 3], ликероводочной [4, 5], табачной, парфюмерной [6, 7], лакокрасочной промышленности и в сельском хозяйстве [8],

 – для разработки компактных анализаторов для робототехники [9, 10],

 – для проведения исследований в области биохимии [11, 12],

– в химической промышленности [13, 14],

 – для контроля качества медицинских препаратов [15],

- в области нанотехнологий [16],

 – для анализа паров нефти и газа для поиска и мониторинга месторождений в добывающей промышленности и оценки качества горюче-смазочных материалов [17–18].



Рис. 1. Принцип работы спектрометра ионной подвижности



Рис. 2. Области применения СИП

Исчерпывающий обзор методов и технологий для обнаружения различных веществ, включая обнаружение скрытых взрывчатых и наркотических веществ, приведен в [19].

Диагностика хронической сердечной недостаточности

В структуре смертности населения преобладают сердечно-сосудистые заболевания. Актуальной и практически значимой проблемой является своевременная достоверная ди-агностика хронической сердечной недостаточности (XCH). Ранние стадии болезни поддаются лечению с хорошим прогнозом, при этом 3-4 функциональный класс ХСН трудно контролируем терапевтически, а также приводит к социальной дисадаптации и инвалидизации пациентов. Существующие методы обследования обнаруживают структурные, то есть поздние, изменения. Одним из перспективных направлений неинвазивнойдигностики является анализ выдыхаемого воздуха, что основывается на выделительной функции легких и изменении следового количества различных молекул в составе выдыхаемого воздуха в зависимости от той или иной патологии.

Диагностическая система на основе спектрометрии ионной подвижности (СИП) позволит по анализу выдыхаемого воздуха или других естественных выделений человека диагностировать заболевания сердечно-сосудистой системы, канцерогенез, сахарный диабет, хроническую обструктивную болезнь легких, окислительный стресс, инфицирование патогенными микроорганизмами, а также контролировать состояние больного. Высокая чувствительность метода, широкий диапазон распознаваемых веществ, возможность работы при атмосферном давлении, компактность, относительно низкая стоимость и простота обслуживания прибора, а также накопленный опыт производства в РФ открывают возможность создания не дорогого медицинского спектрометра. В частности прибор ИДД «Кербер», производства ООО «Модус», на основе СИП имеет преимущества перед зарубежными аналогами, поскольку для ионизации вместо радиоактивного излучения применяется источник на основе коронного разряда. Это позволяет существенно расширить спектр использования прибора благодаря снятию ограничений свойственных устройствам с радиоактивным источником ионизации, и уменьшения его стоимости. Таким образом, появилась возможность использовать этот прибор в медицине.

Совместно с кафедрой профилактической и неотложной кардиологии ΦΠΠΟΒ ΠΜΓΜΥ им. И. М. Сеченова и сотрудниками лаборатории газовых примесей атмосферы ФГБУН Института физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН разработано и проведено исследование методом СИП и PTR-MS (proton transfer reaction mass-spectrometry) – протонной масс-спектрометрии для выявления диагностически значимых веществ ХСН методом МСМ и оптимизации характеристик разрабатываемой диагностической системы на основе СИП. Были проанализированы пациенты с подтвержденным диагнозом ХСН и лица, не страдающие сердечной недостаточностью. В исследование включено 35 пациентов: 16 без ХСН и 19 с ХСН 2-3 ФК. Всем пациентам проводился забор пробы воздуха натощак в специальные мешки Tedlar, рис.3, с анализом состава воздуха при помощи протонного СИП спектрометра и масс-спектрометра Compact PTR-MS. Перед анализом содержания ЛОС в воздухе, аппарат МСМ калибровался при помощи генератора нулевого воздуха Sonimix 3057. Далее состав вылыхаемого воздуха анализировался по отклонению содержания тех или иных веществ по отношению к их концентрации в нулевом воздухе. Были проанализированы пробы воздуха, взятые у пациентов, страдающих ХСН 2 и 3 функционального класса согласно классификации NYHA. Данные были сопоставлены с результатом у пациентов без ХСН. Основные характеристики групп сравнивались с использованием t-теста для независимых и связанных выборок для непрерывных переменных правильным распределением с и И-критерия Манна – Уитни для непрерывных переменных с неправильным распределением, а также критерия знаковых рангов Вилкоксона для связанных выборок для непрерывных переменных с неправильным распределением. Корреляции оценивались

по методу Пирсона и Спирмана. Все статистические операции проводились с помощью программного обеспечения IBM SPSS Statistic, версия 22.



Рис. 3. Общий вид пробоотборной системы спектрометра

По результатам анализа у пациентов, страдающих ХСН 2-3 функционального класса, при отсутствии существенных различий по основным характеристикам, иной патологии сердца и сопутствующих заболеваниям, были достоверно повышены концентрации следующих веществ в выдыхаемом воздухе: ацетон, формальдегид, пропилен, уксусная кислота, ксилол и бензоаты. Данные о повышении концентрации ацетона у пациентов с ХСН ожидаемы и имеют под собой патофизиологическое обоснование. Был проведен ROC-анализ. В результате, с чувствительностью 88,2 % и специфичностью 60 % можно ожидать наличие у пациента ХСН при повышении уровня ацетона более 307,32 ppb (AUC = 0,796; 95 % ДИ от 0,637 до 0,955, p = 0,004). Также выявлена достоверная отрицательная корреляция Спирмена между фракцией выброса левого желудочка и концентрацией ацетона (r = -0.563, p = 0.001).

Анализ выдыхаемого воздуха методом СИП и МСМ позволил выделить диагностически значимые летучие органические соединения (ЛОС). Содержание 24 веществ в пробах были достоверно отлично от нулевого показателя. При сравнении проб у пациентов с наличием и при отсутствии ХСН статистически отличались концентрации 5 веществ. Содержание ацетона, формальдегида, пропилена, уксусной кислоты, ксилола и бензоатов было достоверно выше у больных с подтвержденной ХСН 2-го и 3-го функционального класса по NYHA. Пациенты двух групп статистически не различались по возрасту, полу и наличию сопутствующих заболеваний, что могло бы повлиять на содержание указанных веществ в выдыхаемом воздухе. Дальнейший анализ продемонстрировал высокую чувствительность и достаточную специфичность выявления повышенного содержания ацетона в выдыхаемом воздухе в диагностике ХСН. Основываясь на полученных результатах, и, принимая во внимание данные литературы, следует считать оценку концентрации ЛОС в выдыхаемом воздухе диагностически значимым методом в выявлении ХСН.

Обнаружение сверхмалых количеств запрещенных веществ на руках

Пограничная служба предотвращает распространение незаконных веществ при въезде или выезде из страны. Основная проблема в типичной области инспекции и пограничной службы время затратная процедура досмотра пассажиров и багажа. Основной целью досмотра является поиск и распознавание взрывчатых компонентов. Осмотр является селективным, тем временем даже один случай транспортировки взрывчатых веществ через границу на борт может привести к несчастному случаю. Одним из самых распространенных методов досмотра Спектрометрия Ионной Подвижности (СИП). Эта техника способна обнаруживать летучие и мало летучие запрещенные вещества в широком диапазоне концентраций вещества от единиц микрограмм до единиц нанограмм. Таможенник собирает пробы с рук или багажа с помощью салфетки, а затем помещает салфетку в систему СИП. Процедура занимает длительное время порядка десятков секунд. Именно поэтому применяется выборочное обследование по случайной принципу разделения людей на две группы. Проблемы существующего метода контроля: высокие требования к чистоте расходных материалов, долговременная процедура осмотра. Решение: автоматизация выборки, транспортировки и анализа проб, быстрой очистки и нескольких повторных использований собирающей поверхности частиц. В случае тесного контакта с взрывчатыми соединениями, следовые количества взрывчатых веществ будут оставаться на поверхности кожи в течение нескольких сотен касаний даже в случае мытья рук. Способ включает в себя следующие процедуры:

1) исследование механики отпечатка;

2) статистический анализ характеристик отпечатка пальца;

 изучение следов (профиль) распределение отпечатков пальцев.

Структурная схема устройства пробоотбора приведена на рис. 4.

Общий вид системы отбора пробы, присоединенной к спектрометру ионной подвижности, представлен на рис. 5.

Устройство работает с веществом в течении 3-х секунд. В ходе проведения экспериментов выявлена способность спектрометра ионной подвижности с присоединенным разработанным устройством пробоотбора обнаруживать следовые количества взрывчатых веществ (ВВ) в сверхмалых концентрациях. В ходе испытаний на территории ЗАО «РНТ» исследования проводились на пробах наиболее распространенных взрывчатых веществ: ТNT (тринитротолуол), ТЭН (тетранитропентаэритрит), гексоген. Результаты испытаний в виде спектрограмм показаны ниже.

Типичная методика получения сверхмалых концентраций веществ связана с растворением исследуемого вещества в жидкой среде. Исходя из объема и плотности исследуемого вещества подбирается



Рис. 4. Структурная схема устройства пробоотбора с импульсным радиационным разогревом исследуемой поверхности для обнаружения запрещенных веществ на отпечатках пальцев и документах

определенное соотношение растворимого вещества и растворителя. Данный метод позволяет получить раствор с требуемой концентрацией. В процессе растворения могут быть достигнуты сверхмалые концентрации взрывчатых веществ в растворе – порядка 1 нг/см³.



Рис. 5. Устройство для анализа отпечатков пальцев и документов методом спектрометрии ионной подвижности

Далее производится отбор части раствора с помощью микрошприца и нанесение его на поверхность. При выборе максимально быстролетучего растворителя через определенное время на поверхности остается исследуемое вещество в следовых количествах. После этой процедуры оказываются созданы все условия для проведения экспериментов по обнаружению следовых количеств веществ на поверхности материалов.



Рис. 6. Спектрограмма регистрации вещества ТНТ

На рис. 6 представлен спектр, возникающий при регистрации вещества ТНТ. Тротил (тринитротолуол) является одним из самых распространенных ВВ класса однородных химических нитросоединений.

Выводы

Показана возможность использования метода спектрометрии ионной подвижности для решения различных исследовательских задач. В частности для создания портативной диагностической системы для неинвазивной диагностики ранних стадий хронической сердечной недостаточности по регистрации повышенной концентрации биомаркеров в выдохе человека. Проведенные экспериментальные исследования веществ с использованием разработанной портативной спектрометрической ячейки по анализу выдыхаемого воздуха показали возможность эффективного обнаружения сверхмалых концентраций ацетона – биомаркера сердечнососудистых заболеваний и сахарного диабета, искусственно созданных на уровне 1 мл/м³ воздуха. Проведены предварительные исследования в Клинике кардиологии Первого МГМУ им. И. М. Сеченова. Осуществлено присоединение к спектрометру ионной подвижности хроматографической колонки для решения проблемы разделения аналитически значимой для метода СИП от влагосодержащей части пробы выдыхаемого воздуха. Метод позволил выявить диагностически-значимые вещества по спектру выдоха у пациентов без признаков сердечной недостаточности и с подтвержденным диагнозом. Также метод спектрометрии ионной подвижности успешно применяется для обнаружения следовых концентраций взрывчатых и наркотических веществ на отпечатках пальцев и документах, что подтверждается внедрением ряда систем в систему обеспечения безопасности на особо охраняемых объектах и массовых мероприятиях. Автор рекомендует расширять сферу применения спектрометрии ионной подвижности, т. к. эта техника позволяет эффективно решать социально-значимые задачи.

Литература

1. Borsdorf H., Eiceman G.A., Ion Mobility Spectrometry: Principles and Applications // Taylor & Francis. – 2006. El Barbri N., Mirhisse J., Ionescu R., El Bari N., Correig X., Bouchikhi B., Llobet E., An electronic nose system based on a micro-machined gas sensor array to assess the freshness of sardines // Sensors and Actuators B: Chemical. 2009. Vol. 141. Issue 2. P. 538–543.

2. Rebecca N. Bleibaum, Herbert Stone, Tsung Tan, Said Labreche, Emmanuelle Saint-Martin, Sandrine Isz, Comparison of sensory and consumer results with electronic nose and tongue sensors for apple juices // Food Quality and Preference. 2002. Vol. 13. Issue 6. P. 409–422.

3. Corrado Di Natale, Fabrizio A. M. Davide, Arnaldo D'Amico, Paolo Nelli, Silvio Groppelli, Giorgio Sberveglieri, An electronic nose for the recognition of the vineyard of a red wine // Sensors and Actuators B: Chemical. 1996. Vol. 33. Issues 1–3. P.83–88.

4. Pilar Martır M., Jorge Pino, RicardBoquer, Olga Busto, Josep Guasch, Determination of ageing time of spirits in oak barrels using a headspace–mass spectrometry (HS-MS) electronic nose system and multivariate calibration // Anal Bioanal Chem. 2005. P. 440–443.

5. Jérôme Poprawski, Pascal Boilot, Florence Tetelin, Counterfeiting and quantification using an electronic nose in the perfumed cleaner industry // Sensors and Actuators B: Chemical. 2006. Vol. 116. Issues 1–2. P. 156–160.

6. Negri R. M., Electronic Noses in Perfume Analysis // Analysis of Cosmetic Products. 2007. Chapter 6. P. 276-290. 7. Leilei Pan Simon, X. Yang Environ, A new intelligent electronic nose system for measuring and analysing livestock and poultry farm odours // Monit Assess. 2007. P. 399–408.

8. TiinaRajamaki T., Arnold M., Venelampi O., Vikman M., Rasanen J., Itavaara M., An electronic nose and indicator volatiles for monitoring of the composting progress // Water, Air, and Soil Pollution. 2005. P. 71–87.

9. Lino Marques, Anibal T. de Almeida, Application of Odor Sensors in Mobile Robotics // Autonomous Robotic Systems. 1998. Vol. 236. P. 82–95.

10.Loutfi A., Coradeschi S., Smell, think and act: A cognitive robot discriminating odours // Auton Robot. 2006. P. 239–249.

11. RitabanDutta, Aruneema Das, Nigel G. Stocks, David Morgan, Stochastic resonance-based electronic nose: A novel way to classify bacteria // Sensors and Actuators B: Chemical. 2006. Vol. 115. Issue 1. P.17–27.

12. Michael P. Caulfield, Shuguang Li, Gloria Lee, Patricia J. Blanche, Wael A. Salameh, W. Henry Benner, Richard E. Reitz, Ronald M. Krauss, Direct Determination of Lipoprotein Particle Sizes and Concentrations by Ion Mobility Analysis // Clinical Chemistry. 2008. № 54. P. 1307–1316.

13. Magalí Lovino, M. Fernanda Cardinal, Diana B.V. Zubiri, Delia L. Bernik, Electronic nose screening of ethanol release during sol-gel encapsulation: A novel non-invasive method to test silica polymerization // Biosensors and Bioelectronics. 2005. Vol. 21. Issue 6. P. 857–862.

14. HE Liu, LIANG Gui-Zhao, LI Zhi-Liang, Molecular Structural Characterization and Quantitative Prediction of Reduced Ion Mobility Constants for Diversified Organic Compounds // Chinese J. Struct. Chem. 2008. Vol. 27. № 10. P. 1187–1194.

15. Shinji Ohmori, YasuoOhno, Tadashi Makino, Toshio Kashihara, Application of an electronic nose system for evaluation of unpleasant odor in coated tablets // European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics. 2005. Vol. 59. Issue 2. P. 289–297.

16. Lei Zhou, AshishRai, Nicholas Piekiel, Xiaofei Ma, Michael R. Zachariah, Ion-Mobility Spectrometry of Nickel Nanoparticle Oxidation Kinetics: Application to Energetic Materials // J. Phys. Chem. C. 2008. P. 16209–16218.

17. Brudzewski K., Osowski S., Markiewicz T., Ulaczyk J., Classification of gasoline with supplement of bio-products by means of an electronic nose and SVM neural network // Sensors and Actuators B: Chemical. 2006. Vol. 113. Issue 1. P. 135–141.

18. Sobański T., Szczurek A., Nitsch K., Licznerski B. W., Radwan W., Electronic nose applied to automotive fuel qualification // Sensors and Actuators B: Chemical. 2006. Vol. 116. Issues 1–2. P. 207–212.

19. Yinon J., Zitrin S., Modern Methods and Applications in Analysis of Explosives // John Wiley & Sons. 1993. Chichester. – England.

СЕКЦИЯ 1

Теоретическая и математическая физика

Председатели секции:

д-р физмат. наук	В. А. Жмайло
д-р физмат. наук	К. Г. Гайнуллин
канд. физмат. наук	А. Ю. Артемьев

ГЕНЕРАЦИЯ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ В ПЛАЗМЕННОЙ КИЛЬВАТЕРНОЙ ВОЛНЕ, ВОЗБУЖДЕННОЙ МОЩНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИМПУЛЬСОМ

<u>Н. А. Андреюк</u>, А. И. Голубев, Н. П. Пятаков, Б. П. Якутов

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

Введение

Развитие ускорительной техники привело к созданию все более масштабных комплексов, длиною в десятки километров, с целью достижения большей энергии ускоряемых частиц. Напряженность электрического поля таких установок обычно не превышает значений 10⁴-10⁵ В/см, чтобы не допустить электрического пробоя среды, вызванного эмиссией электронов с металлических стенок ускорителя. В связи с этим ограничением в последнее время все больший интерес вызывают альтернативные методы ускорения частиц в лазерных полях и в полях разделения зарядов в плазме, лишенных ограничений, связанных с пробоем среды [1]. Напряженность ускоряющего поля, создаваемого в плазменных ускорителях, достигает значений порядка 10⁹-10¹⁰ В/см при длине ускорения от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров. Рекордной на настоящий момент является энергия 4,2 ГэВ у электронов, ускоренных в плазме на длине 9 см лазерным излучением мощностью 300 ТВт [2]. При таком способе ускорения мощный короткий лазерный импульс, распространяясь в плазме докритической плотности, возбуждает волну колебаний электронной плотности, идущую вслед за ним. В результате в плазме генерируются продольные электрические поля, ускоряющие электроны. Так как процесс возбуждения электронной плазменной волны лазерным импульсом в чем-то аналогичен возбуждению кораблем волн на поверхности воды, то подобные волны принято называть кильватерными.

В настоящей работе при помощи разработанного во ВНИИЭФ параллельного релятивистского кода PLASMA-2P (2D3V), основанного на методе «частиц-в-ячейке», в двумерной постановке проведено численное моделирование ускорения электронов в кильватерной волне, возбужденной в плазме гелия лазерным импульсом. Целью расчетов было изучение зависимости максимальной энергии электронов от толщины и плотности плазмы, а также интенсивности лазерного излучения. Другой целью расчетов было моделирование различных режимов ускорения электронов в кильватерной волне.

1. Возбуждение плазменной кильватерной волны лазерным импульсом

Идея использовать лазерный импульс для возбуждения электронной плазменной волны с целью ускорения электронов, впервые была предложена в работе [3]. Лазерный импульс, распространяясь в плазме докритической плотности, вытесняет электроны из области поля за счет действия пондеромоторной силы. Положительно заряженные ионы остаются при этом практически неподвижны. Позади лазерного импульса образуется область с избыточным положительным зарядом, которая в свою очередь, начинает притягивать электроны обратно. Таким образом, в плазме возбуждаются колебания плотности электронов, следующие за лазерным импульсом. Плазменная волна плотности заряда распространяется с фазовой скоростью, равной групповой скорости лазерного импульса и совершает колебания с плазменной частотой $\omega_{\rm pl} = (4\pi n_e e^2/m_e)^{1/2}, n_e$ – начальная плотность электронов плазмы, е – заряд, m_e – масса электрона. Электроны плазмы, попав в область избыточного положительного заряда, захватываются подобной волной и ускоряются до энергий от сотен до тысячи МэВ. Величину ускоряющего поля в кильватерной волне можно оценить по формуле [3]:

$$E_m [B/cm] \approx mc\omega_{\rm pl}/e = (0.924 \cdot n_e [cm^{-3}])^{1/2}.$$
 (1)

где *с* – скорость света. При такой напряженности поля, скорость электрона в плазменной волне, вычисленная наивно, нерелятивистски, достигает скорости света. Например, для плотности электронов плазмы $n_e = 0^{19}$ см⁻³, напряженность электрического поля в плазменной волне составит величину $E_m \approx 3 \cdot 10^9$ В/см, на несколько порядков большую величины электрического поля (~10⁵ В/см) в современных ускорителях.

Как показано в [3], кильватерная волна в плазме возбуждается наиболее эффективно, если пространственная длина лазерного импульса $L_{\tau} = c\tau_{\rm L}$ меньше, либо равна половине плазменной длины волны $\lambda_{\rm pl}/2 = \pi c/\omega_{\rm pl}$, где τ_L –длительность лазерного импульса, $\omega_{\rm pl}$ – плазменная частота, c – скорость света. В расчетах, представленных в настоящей работе, $L_{\tau} = 10,5$ мкм, а отношение $\lambda_{\rm pl}/L_{\tau}$ менялось в пределах от 0,5 до 2 в зависимости от начальной плотности электронов плазмы.

2. Постановка задачи и метод расчета

Для моделирования процесса ускорения электронов кильватерной волной чаще всего используют РІС-коды (Particle-In-Cell) – математические программы, моделирующие взаимодействие лазерного излучения с бесстолкновительной плазмой путем решения системы уравнений Максвелла-Власова методом «частиц-в-ячейке». Подробное описание основных положений этого метода содержится в книге [4]. В настоящей работе для численного моделирования лазерно-плазменного ускорения электронов использовался разработанный во ВНИИЭФ релятивистский параллельный РІС-код PLASMA-2P [5]. Расчеты проводились в двумерной постановке. Расчетная область, плазменная мишень и система координат, принятая при моделировании, схематически показаны на рис. 1.



Рис. 1. Расчетная область для численного моделирования лазерно-плазменного ускорения электронов

Лазерный импульс, имеющий линейную поляризацию, длину волны 0.911 мкм, прямоугольный профиль по времени и гауссов по пространству $I(y) = I_o \cdot \exp[-(y/y_o)^2]$, где $y_o = 8,5$ мкм, $I_o -$ интенсивность, изменялась от $1 \cdot 10^{18}$ до $5 \cdot 10^{19}$ Вт/см², запускался с правой границы расчетной области и распространялся в отрицательном направлении оси *X*. Длительность импульса была равна 35 фс.

Расчетная область представляла собой вытянутый прямоугольник с размерами 0,215 мм по оси *Y* и от 0,5 до 2,2 мм вдоль оси *X* в зависимости от задачи. Шаг сетки в обоих направлениях составлял $\Delta X = \Delta Y \approx 0,04$ мкм. Мишень моделировалась как двукратно ионизованная плазма гелия. Толщина плазмы вдоль оси *Y* равнялась 0,095 мм. Длина плазмы вдоль оси *X* изменялась от 0,215 мм до 2 мм. Начальная плотность электронов была ниже критической и варьировалась от 2,5 \cdot 10¹⁸ до 4 \cdot 10¹⁹ см⁻³. При максимальном размере плазмы расчетная сетка состояла из \approx 300 миллионов ячеек, а для моделирования плазмы использовалось \approx 2 миллиарда 200 миллионов квазичастиц. Расчет такой задачи производился на 768 вычислительных ядрах суперЭВМ.

3. Генерация ускоряющего поля в лазерноплазменной волне. Длина дефазировки

Электроны набирают энергию в плазменной кильватерной волне за счет ускорения в поле разделения зарядов, возбуждаемом лазерным импульсом. Длина одного периода поля равна плазменной длине волны $\lambda_{\rm pl} = 2\pi c/\omega_{\rm pl}$, причем только половина каждого периода плазменной волны является для электронов ускоряющей, на другой половине напряженность поля направлена в противоположную сторону. На рис. 2 представлена картина продольного поля разделения зарядов, полученная при расчете кильватерной волны с плотностью электронов $n_e = 2,5 \cdot 10^{18} \, {\rm см}^{-3}$ и интенсивностью $I = 2 \cdot 10^{18} \, {\rm BT/cm}^2$. На этом рисунке показано поле в первом периоде плазменной волны и силы, действующие на сгусток электронов.



Рис. 2. Продольное электрическое поле в кильватерной волне, ускоряющее электроны

На рис. 2 показаны направления вектора напряженности поля по оси $X - E_x$ и направление силы F_e – действующей на электроны со стороны поля E_x . Распределение поля получено при численном моделировании возбуждения кильватерной волны в плазме с $n_e = 2,5 \cdot 10^{18}$ см⁻³ лазерным импульсом с I = $2 \cdot 10^{18}$ Вт/см². Направление распространения лазерного импульса – справа налево.

Из рис. 2 видно, что амплитуда ускоряющего поля составляет ~7 $\cdot 10^8$ В/см. При более высоких значениях интенсивности излучения и плотности плазмы амплитуда поля возрастает. Максимальное значение амплитуды поля, наблюдаемое в расчетах, составляет примерно 1,5 $\cdot 10^{10}$ В/см при плотности электронов $n_e = 2 \cdot 10^{19}$ см⁻³ и интенсивности $I = 5 \cdot 10^{19}$ Вт/см². Под действием таких сильных электрических полей электрон за несколько фемтосекунд достигает скорости порядка скорости света. Групповая скорость лазерного импульса с увеличением плотности плазмы, наоборот, уменьшается. Фазовая скорость кильватерной волны равна групповой скорости лазерного импульса и определяется выражением:

$$\upsilon_{ph} = \upsilon_g = \left(c \sqrt{1 - \frac{\omega_{pl}^2}{\omega_0^2}} \right) \tag{2}$$

где ω_0 – частота лазерного импульса. Таким образом, при достаточной длине плазмы, ускоряемый сгусток электронов может выйти из участка ускоряющего поля и перейти в область тормозящего поля. 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 [6]:

$$l_d = \frac{\lambda_{pl}}{2(c - \upsilon_{ph})} c \approx \frac{\omega_0^2}{\omega_{pl}^2} \lambda_{pl}$$
(3)

Согласно этому выражению, длина дефазировки для длины волны лазерного импульса $\lambda_0 = 0.911$ мкм и плотности плазмы $2.5 \cdot 10^{18}$, $5 \cdot 10^{18}$, $1 \cdot 10^{19}$, $2 \cdot 10^{19}$ и $4 \cdot 10^{19}$ см⁻³ составляет 11,3; 4; 1,4; 0,5 и 0,18 мм соответственно. Формула (3) дает приближенную оценку длины дефазировки; в действительности, эта длина может быть еще меньше.

4. Линейный и нелинейный режимы генерации кильватерной волны

Bubble – режим ускорения

Для характеристики интенсивности лазерного импульса обычно используют безразмерную амплитуду лазерного поля, вычисляемую по формуле

$$a = eE_0 / (m\omega_0 c) \approx 0.85 \cdot \lambda_0 \cdot \left(I_0 / 10^{18} \right)^{1/2}, \qquad (4)$$

где E_{0x} – амплитуда напряженности электрического поля лазерного импульса, ω_0 , λ_0 – частота, c^{-1} и дли-

на волны лазерного излучения, мкм, I_0 – интенсивность лазерного импульса, Вт/см². Используя эту характеристику лазерного импульса, в литературе принято различать линейный и нелинейный режимы генерации кильватерной волны. Считается, что при $a^2 < 1$ кильватерная волна является линейной, при $a^2 >> 1$ – сильно нелинейной [7]. На рис. 3 показано полученное при численном моделировании при помощи PIC-кода PLASMA-2P пространственное распределение напряженности продольного ускоряющего электрического поля E_x в линейной и нелинейной плазменной волне, бегущей за лазерным импульсом:

На рис. За показана картина поля в линейном режиме ускорения: $I_0 = 2 \cdot 10^{18}$ Вт/см², $a^2 = 1,2$; на рис. Зб – в нелинейном: $I_0 = 1 \cdot 10^{19}$ Вт/см², $a^2 = 6,1$, и на рис. Зв – в сильно нелинейном режиме ускорения, называемом режимом «пузыря» или bubble-режимом: $I_0 = 5 \cdot 10^{19}$ Вт/см², $a^2 = 30,3$.

Из рис. З видно, что в линейном режиме продольное ускоряющее электрическое поле имеет синусоидальную форму, и позади лазерного импульса обмного периодов плазменной разуется волны с одинаковой амплитудой $E_X \approx 7 \cdot 10^8$ В/см. В нелинейном режиме ускоряющее поле имеет пилообразный характер с максимальной амплитудой $E_X \approx 3 \cdot 10^9$ В/см и быстро затухает. В режиме «пузыря» или bubble-режиме в плазменной волне остается только один-два периода колебаний с максимальной амплитудой $E_X \approx 6 \cdot 10^9$ В/см.





Рис. 3. Продольное ускоряющее поле E_X в плазменной кильватерной волне при различных режимах ускорения, $n_e = 2,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, L = 230 мкм: а – линейный режим, $I_0 = 2 \cdot 10^{18} \text{ Вт/см}^2$; б – нелинейный режим, $I_0 = 1 \cdot 10^{19} \text{ Вт/см}^2$; в – bubble–режим ускорения, $I_0 = 5 \cdot 10^{19} \text{ Вт/см}^2$; 1 – поле E_Y лазерного импульса

Распределения плотности электронов в кильватерных волнах, соответствующих трем режимам ускорения, обсуждавшимся выше, показаны на рис. 4.



Рис. 4. Распределение плотности электронов в плазменной кильватерной волне: а – линейный режим, б – нелинейный режим, в – bubble–режим

На рис. 4 хорошо видны области разрежения (более светлые) и сгущения (более темные) электронной плотности. На рис. 4в приведен bubble-режим ускорения. Численное моделирование этого режима было впервые проведено в работе [7] в 2002 г. Очень скоро независимо, тремя группами ученых bubble-режим был экспериментально подтвержден [8–10].

5. Энергетические спектры ускоренных электронов

Полученные при численном моделировании спектры ускоренных электронов сравнивались с результатами, имеющимися в литературе. В работе [11] струя гелия облучалась лазерным импульсом длительностью 35 фс и интенсивностью $I_0 = 5 \cdot 10^{18} \, \text{Вт/см}^2$. Плотность гелиевой плазмы – $n_e = 2 \cdot 10^{19} \, \text{см}^{-3}$. На рис.5 сравнивается экспериментальный [11] и расчетный спектр, полученный для плазмы толщиной 0,43 мм при $I_0 = 1 \cdot 10^{19} \, \text{Вт/см}^2$



Рис. 5. Спектр электронов, ускоренных в кильватерной волне, возбужденной лазерным импульсом длительностью

35 фс в плазме с $n_e = 2 \cdot 10^{19}$ см⁻³: 1 – эксперимент [11], 2 – расчет РІС-код PLASMA-2P, $I_0 = 1 \cdot 10^{19}$ Вт/см²

Из рис. 5 видно, что у обоих спектров есть ярко выраженный максимум и резкий спад в сторону больших энергий. В расчете спектр получился шире и его максимум приходится на энергию 170 МэВ вместо 150 МэВ. В целом, однако, можно признать неплохое соответствие экспериментального и расчетного спектров.

На рис. 6 приведен энергетический спектр сгустка электронов, в котором находились электроны, ускоренные до рекордной энергии 850 МэВ. Эти электроны были ускорены в bubble-режиме, при этом $n_e = 2.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $I_0 = 5 \cdot 10^{19} \text{ Вт/см}^2$ и длина плазмы 2 мм.



Рис. 6. Энергетический спектр сгустка электронов, ускоренных в bubble-режиме: $n_e = 2,5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $I_0 = 5 \cdot 10^{19} \text{ BT/cm}^2$ и длина плазмы 2 мм

Из рис. 6 видно, что спектр имеет ясно выраженный максимум при энергии 400 МэВ, а его ширина составляет ≈300 МэВ. Характерный пространственный размер данного пучка электронов в момент вылета из плазмы составляет ~15,6 мкм.

Пространственная картина плотности электронов, демонстрирующая вылет из плазмы сгустка электронов с энергией 850 МэВ, представлена на рис. 7. Лазерный импульс и кильватерная волна распространяются справа налево. Сгусток электронов отмечен стрелкой.



Рис. 7. Распределение плотности электронов в плазме: а – до вылета, б – после вылета из плазмы сгустка электро-

нов, ускоренных в «пузыре». Сгусток обозначен стрелкой. $n_e=2,5\cdot 10^{18}~\text{см}^{-3},~I_0=5\cdot 10^{19}~\text{Вт/см}^2$ и длина плазмы 2 мм

6. Представление результатов расчетов при помощи параметров подобия

При анализе расчетов, моделирующих ускорение электронов в кильватерной волне, были найдены параметры подобия. При помощи этих параметров полученные в разных расчетах величины, характеризующие кильватерное ускорение, удалось представить в виде единых обобщающих зависимостей. Из всех характеристик кильватерной волны наибольший интерес вызывает напряженность продольного электрического поля, ускоряющего электроны, а также максимальная энергия, которую приобретают в этой волне электроны.

На рис. 8 нанесена максимальная напряженность ускоряющего поля, полученная в расчетах при различной плотности плазмы и интенсивности лазерного излучения, как функция параметра $n_e^{1/2} \cdot a^{3/2}$, где n_e – плотность электронов, a – безразмерная амплитуда лазерного поля.



Рис. 8. Зависимость амплитуды продольного ускоряющего поля от параметра подобия $n_e^{1/2} \cdot a^{3/2}$

Из рис. 8 видно, что результаты расчетов хорошо ложатся на прямую линию, описываемую уравнением:

$$E_{max}[B/cM] = 0.4 \cdot n_e^{1/2} \cdot a^{3/2}$$
(5)

Используя выражение для параметра силы волны, амплитуду напряженности ускоряющего поля в кильватерной волне можно записать в виде:

$$E_{max} \sim n_e^{-1/2} \cdot \lambda_0^{-3/2} \cdot I^{3/4}$$
 (6)

Напряженность поля зависит, как и следовало ожидать, от плотности электронов плазмы (согласно формуле (1)) и интенсивности лазерного излучения. Зависимость $E_{max} \sim \lambda_0^{3/2}$ от длины волны лазерного излучения в наших расчетах не была проверена.

На рис. 9 приведены результаты многочисленных расчетов максимальной энергии электронов, ускоренных в кильватерной волне при различных значениях плотности плазмы, интенсивности лазерного излучения и длины участка ускорения:

Из рис.9 видно, что результаты расчетов хорошо ложатся на прямую линию, которая описывается выражением:

$$\varepsilon_{\max}[\text{MeV}] = 1.6 \cdot 10^{-6} \cdot (a^{3/2} \cdot n_e^{1/2} \cdot L)^{0.9}, \qquad (7)$$

где n_e и а определены выше, L – длина участка ускорения в плазме.

Расхождение результатов некоторых расчетов с величиной максимальной энергии, оцененной по формуле (6) связано, по-видимому, с эффектом дефазировки.

Подставляя в формулу (7) выражение (4), получим зависимость максимальной энергии электронов от параметров плазмы и лазерного импульса:

$$\varepsilon_{\rm max} \sim (n_e^{-1/2} \cdot \lambda_0^{-3/2} \cdot I^{-3/4} \cdot L)^{0,9}$$
 (8)

Полученные при анализе результатов расчетов зависимости (5) и (7) позволяют с удовлетворительной точностью оценивать напряженность ускоряющего поля и максимальную энергию ускоренных кильватерной волной электронов при произвольных значениях интенсивности лазерного излучения, плотности и длине плазмы.



Рис. 9. Максимальная энергия электронов, полученная при численном моделировании, как функция параметра подобия $a^{3/2} \cdot n_e^{1/2} \cdot L$ для I₀ в диапазоне от $2 \cdot 10^{18}$ до $5 \cdot 10^{19}$ Bt/cm²

Заключение

При помощи разработанного во ВНИИЭФ параллельного полностью релятивистского кода PLASMA-2P (2D3V), основанного на методе «частиц-в-ячейке», проведено численное моделирование ускорения электронов в линейном и нелинейном режимах в кильватерной волне, возбужденной в плазме гелия лазерным импульсом длительностью 35 фс и интенсивностью I_0 от $1 \cdot 10^{18}$ до $5 \cdot 10^{19}$ Вт/см². Начальная плотность электронов плазмы n_e принимала значения от $2,5 \cdot 10^{18}$ до $4 \cdot 10^{19}$ см⁻³, а длина плазмы изменялась от 0.2 до 2 мм.

Получены энергетические спектры ускоренных электронов, которые согласуются с экспериментальными результатами.

Установлено, что максимальная энергия электронов достигается при нелинейном «bubble»-режиме ускорения. Показано, что в этом режиме пучок электронов на длине 2 мм ускоряется до энергии 850 МэВ кильватерной волной, возбужденной в плазме гелия с $n_e=2.5{\times}10^{18}~{\rm cm}^{-3}$ лазерным импульсом с $I_0=5\cdot10^{19}~{\rm Br/cm}^2.$

Результаты численного моделирования ускорения электронов в кильватерной волне, удалось обобщить, используя в качестве определяющих параметров плотность плазмы и интенсивность лазерного излучения. Напряженность продольного электрического поля, ускоряющего электроны, можно оценить по формуле $E_{max}[\text{B/cM}] = 0.4 \cdot n_e^{-1/2} \cdot a^{3/2}$, а максимальную энергию электронов вычислить при помощи выражения $\varepsilon_{max}[\text{MeV}] = 1.6 \cdot 10^{-6} \cdot (a^{3/2} \cdot n_e^{-1/2} \cdot L)^{0.9}$, где $a = 0.85 \cdot \lambda \cdot (I/10^{18})^{1/2}$ – безразмерная амплитуда напряженности лазерного поля, n_e – плотность электронов плазмы, см⁻³, I – интенсивность лазерного излучения, Вт/см², L – длина участка ускорения в плазме, см, λ – длина волны лазерного излучения, мкм. Получен-

ные при анализе результатов расчетов зависимости позволяют с удовлетворительной точностью оценивать напряженность ускоряющего поля и максимальную энергию ускоренных кильватерной волной электронов при произвольных значениях интенсивности лазерного излучения, плотности и длине плазмы.

Литература

1. Костюков И. Ю., Пухов А. М. Плазменные методы ускорения электронов: современное состояние и перспективы // УФН. 2015 г. Т. 185, № 1. С. 89–96.

2. Leemans W. P. et al. Multi-GeV Electron Beams from Capillary-Guided Subpetawatt Laser Pulses in the Self-Trapping Regime // Phys. Rev. Lett., 2014. Vol. 113, 245002.

3. Tajima T., Dawson J. M. Laser Electron Accelerator // Phys. Rev. Lett. 1979. Vol. 43, No 4. P. 267–270.

 Березин Ю. А, Вшивков В. А. Метод частиц в динамике разреженной плазмы. – Новосибирск: Наука, 1980.

5. Голубев А. И., Сысоева Т. Г., Якутов Б. П. Генерация ионов в тонких мишенях лазерными импульсами круговой поляризации. // Проблемы физики высоких плотностей энергии. Труды международной конференции XII Харитоновские тематические научные чтения// Россия, Саров, 19–23 апреля 2010 г. С. 369–374.

 6. Андреев Н. Е., Горбунов Л. М. // Лазерноплазменное ускорение электронов // УФН. 1999 г. Т. 169, № 1. С. 53–58.

7. Pukhov A., Meyer-ter-Vehn J. Laser wake field acceleration: the highly non-linear broken-wave regime // Appl. Phys. 2002. Vol. 74, P. 355.

 Faure J., Glinec Y., Pukhov A. et. al. A laserplasma accelerator producing monoenergetic electron beams. // Nature. 2004. Vol. 431, P. 541.

9. Geddes C. G. R. et. al. High quality electon beams from a laser wakefield accelerator using plasmachannel guiding. // Nature. 2004. Vol. 431. P. 538.

 Mangles S. P. D., Murphy C. D. Monoenergetic beams of relativistic electrons from intense laser plasma interactions // Nature. 2004. Vol. 431. P. 535.

11. Mangles S. P. D. et. al. Laser-Wakefield Accelerator of Monoenergetic Electron Beams in the First Plasma-Wave Period // Phys. Rev. Lett. 2006. Vol. 96. P. 215001.

ВЫЧИСЛЕНИЕ КРИВИЗНЫ ДИСКРЕТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В ГЕНЕРАТОРЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ТРИАНГУЛЯЦИОННЫХ СЕТОК ЛОГОС.ПРЕПОСТ

<u>А. И. Белова,</u> А. Н. Лукичев, О. Н. Борисенко

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

Введение

ЛОГОС.ПреПост является программным продуктом для задания начальных данных и генерации сеток в задачах инженерного анализа. Программный продукт обеспечивает единую графическую среду, предоставляющую следующие возможности:

 загрузка и исправление математической модели исходной конструкции, заданной во внешней САD-системе;

 задание граничных условий и начальных данных и их расчет;

 задание параметров сеток и построение сеточных моделей;

 подготовка и запуск инженерных счетных кодов для получения решения;

визуальный анализ полученных результатов.

Одной из возможностей данного продукта является построение поверхностной триангуляционной сетки для геометрий, заданных в фасеточном представлении. Основная проблема, связанная с фасеточным способом описания поверхностей, заключается в том, что при таком представлении теряется большая часть информации о поверхности: значения производных в каждой точке поверхности, значения кривизны и другие метрики.

В данной работе рассмотрены различные алгоритмы вычисления кривизны дискретных поверхностей и их модификации, используемые в генераторе поверхностных сеток ЛОГОС.ПреПост. Приведены результаты применения рассматриваемых алгоритмов и результаты построения поверхностных сеток с их использованием.

Описание проблемы

При построении поверхностной сетки поверхностным генератором ЛОГОС.ПреПост вычисляются размеры элементов, на основе которых происходит перестроение исходной сетки. Далее эти размеры будем называть метриками. Принцип работы поверхностного генератора таков, что при построении сетки размер треугольников в окрестностях элемента, в котором задана метрика (элементом может быть вершина сетки, ребро, грань), стремится к значению метрики.

Первоначально в поверхностном генераторе ЛОГОС.ПреПост метрики вычислялись на основе размера, заданного пользователем. Для того чтобы получить хорошую сетку, нужно разбить исходную геометрию на части – патчи, и на каждом патче задать свой размер. Для больших геометрий это трудоемко, так как для некоторых из них придется задавать метрику на каждом элементе. Если задать маленький размер на всей геометрии, то поверхностный генератор выдаст чрезмерно подробную сетку. Если размеры задать достаточно большими, то поверхностная сетка может неточно описывать исходную геометрию в местах ее искривления.

На рис. 1 изображена геометрия cubit: исходная геометрия (рис. 1а) и желаемая поверхностная сетка (рис. 1б).



Рис. 1. Геометрия cubit: а – исходная геометрия, б – желаемая поверхностная сетка

На рис. 2 приведены результаты построения поверхностной сетки поверхностным генератором ЛОГОС.ПреПост с разными пользовательскими размерами.

Исходная геометрия не разбита на части (рис. 1а), пользовательские данные заданы для всей геометрии (рис. 2a,б).



Рис. 2. Результаты построения поверхностной сетки геометрии cubit с разными пользовательскими размерами: а – с размером 0,005; б – с размером 0,003

Из рис. 2,6 видно, что, если задан большой размер, теряются основные особенности исходной геометрии в местах ее искривления. Для решения этой проблемы в генератор поверхностных сеток ЛОГОС.ПреПост добавлено вычисление метрик в узлах сетки на основе кривизны. Считается метрика по следующей формуле:

$$s = \frac{1}{k} \sqrt{2 - 2 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{N}\right)},$$

где s — значение метрики, k — вычисленное значение кривизны в точке, N — параметр разбиения окружности на N равных частей.

Для того чтобы размер треугольников на плоских частях был большим, а на искривленных маленьким, кривизна должна удовлетворять следующим требованиям:

1) значение кривизны на плоскости должно быть нулевым;

2) значения кривизны в точках пересечения плоскостей должны быть нулевыми;

 значения кривизны на сферической, цилиндрической поверхности должны быть одинаковы;

 значения кривизны на стыке искривленных поверхностей и плоскости должны быть близки к значению кривизны в ближайших точках искривленной поверхности;

5) не должно быть сильных перепадов значений кривизны в соседних точках.

В следующих разделах приведены алгоритмы вычисления кривизны на дискретных поверхностях, которые были опробованы в поверхностном триангуляционном генераторе ЛОГОС.ПреПост для решения описанной проблемы. Эти алгоритмы могут быть использованы в любом другом генераторе сеток.

Алгоритм Gauss – Bonnet

Алгоритм состоит из двух логических частей: нахождение гауссовой кривизны и нахождение средней кривизны. Для каждой вершины сетки осуществляется обход по первому кольцу треугольников (рис. 3). В первое кольцо входят треугольники, инцидентные вершине *v*.

Гауссова кривизна находится по формуле:

$$K = \frac{2\pi - \sum_{i=0}^{n-1} \alpha_i}{\frac{1}{3}A}$$

где $\alpha_i = \angle (v_i, v, v_{(i+1) \mod n}), 0 \le i \le n-1$ – угол между двумя ребрами треугольника, которые инцидентны

вершине v, A – площадь треугольников первого кольца. Нахождение средней кривизны осуществляется

по формуле:

$$H = \frac{\frac{1}{4} \sum_{i=0}^{n-1} ||e_i|| \beta_i}{\frac{1}{3}A},$$

где $\|e_i\|$ – длина ребра e_i , $\beta_i = \angle \left(\overrightarrow{N}_i^v, \overrightarrow{N}_{(i+1) \mod n}^v \right)$.



Рис. 3. Первое кольцо треугольников

Угол β_{сиг} считается по формуле:

$$\beta_{cur} = \arccos\left(\frac{\overline{N_{cur}} \cdot \overline{N_{next}}}{\left|\overline{N_{cur}} \left| \cdot \left| \overline{N_{next}} \right|\right|}\right),$$

где $\overline{N_{cur}}$ и $\overline{N_{next}}$ нормали текущего и следующего треугольников в обходе треугольников первого кольца соответственно. Нормаль к треугольнику находится по определению векторного произведения двух векторов, принадлежащих плоскости треугольника.

На рис. 4 и 5 показано распределение значений гауссовой кривизны и средней кривизны соответственно, найденых по алгоритму Gauss – Bonnet.



Рис. 4. Распределение значений гауссовой кривизны, полученных в результате работы алгоритма Gauss – Bonnet

На рис. 4 и 5 в выделенных окружностью местах наблюдается сильное изменение значений кривизны. Также в некоторых точках пересечения плоскостей наблюдались ненулевые значения.



Рис. 5. Распределение значений средней кривизны, полученных в результате работы алгоритма Gauss – Bonnet

Алгоритм Watanabe K., Belyaev A. G.

Для каждой вершины сетки осуществляется обход по первому кольцу треугольников (рис. 3). На каждом шаге обхода требуются два смежных треугольника, назовем их текущий – сиг и предыдущий – prev; индексы, соответствующие рассматриваемым треугольникам, обозначим i и (i-1) соответственно.

Для каждой точки сетки нормаль находится по формуле:

$$\overline{N_{\nu}} = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} N_i^{\nu} A_i}{\left\|\sum_{i=0}^{n-1} N_i^{\nu} A_i\right\|},$$

где $\overline{N_i^{\nu}}$ – нормаль треугольника, A_i – площадь треугольника.

Для каждого треугольника вычисляются значения ϕ_i и k_n по следующим формулам:

$$\varphi_i = \arccos\left(\frac{\overline{a} \cdot \overline{b}}{\|\overline{a}\| \cdot \|\overline{b}\|}\right),$$

где *а* и *b* – вектора соответствующие двум ребрам треугольника, которые образуют угол φ .

$$k_n = \frac{2\overline{N_v} \cdot \overline{vv_i}}{\left\| \overline{vv_i} \right\|^2},$$

где $\overrightarrow{N_v}$ – нормаль в рассматриваемой вершине *v*, $\overrightarrow{vv_i}$ - вектор, направленный из рассматриваемой вершины, соответствующий общему ребру текущего и предыдущего треугольника.

По окончании обхода вычисляется средняя и гауссова кривизна в рассматриваемой точке сетки.

Подсчет средней кривизны в вершине сетки осуществляется по формуле:

$$H \approx \left(\sum_{i=0}^{n-1} k_n^i \left(\frac{\varphi_i + \varphi_{(i-1) \bmod n}}{2}\right)\right) / 2\pi.$$

Подсчет гауссовой кривизны в вершине сетки происходит по формуле, полученной элементарными алгебраическими преобразованиями из формулы:

$$K \approx 3H^2 - \left(\sum_{i=0}^{n-1} k_n^i \left(\frac{\varphi_i + \varphi_{(i-1) \mod n}}{2}\right)\right) / \pi$$

На рис. 6 и 7 показано распределение значений гауссовой кривизны и средней кривизны, соответственно, найденых по алгоритму Watanabe K., Belyaev A. G.



Рис. 6. Распределение значений гауссовой кривизны, полученных в результате работы алгоритма Watanabe K., Belyaev A. G.



Рис. 7. Распределение значений средней кривизны, полученных в результате работы алгоритма Watanabe K., Belyaev A. G.

На рис. 6 и 7 можно заметить, что в углах куба получены ненулевые значения кривизны. Также на стыке сферы и плоскости можно наблюдать разброс значений кривизны, эти значения отличаются от значений на сферической поверхности.

Практическое применение алгоритмов Watanabe K., Belyaev A. G и Gauss – Bonnet

Результаты вычисления значений кривизны представленных алгоритмов зависят от площади первого кольца, а это значит, что значения кривизны в одной и той же точке геометрической модели при различной тесселяции исходной геометрической модели могут отличаться друг от друга. Значения кривизны
в граничных точках завышаются, так как чаще всего в этих точках не достигается нужная степень гладкости.

Главная максимальная кривизна при вычислении метрик является более приоритетной величиной по сравнению с гауссовой кривизной или средней кривизной. В алгоритмах Gauss – Bonnet и Watanabe K., Belyaev A. G вычисление главных кривизн требует использования дополнительных арифметических операций, которые могут увеличить погрешность вычисления.

Алгоритм Cohen-Steiner D., Morvan J.-М.

На рис. 8 и 9 представлены геометрии cubit и skoba, с выделенными особенностями соответственно, и результаты работы алгоритма Cohen-Steiner D., Morvan J.-M.

Введем следующие понятия:

 - характерная кривая – набор ребер исходной геометрии (рис. 8а и 9а), которые нельзя перестраивать. Такие кривые обычно выделяют топологические особенности геометрии;

 вершину будем называть *граничной*, если она лежит на характерной кривой, вершина, не лежащая на характерной кривой, является *внутренней* (рис. 8а и 9а).

Алгоритм, описанный в [5] авторами Cohen-Steiner D., Morvan J.-М., основан на статье Taubin [3], в которой используется связь тензора кривизн с собственными векторами и собственными числами.

Для каждой внутренней вершины выполняются следующие действия:

1) проводится поиск области, на которой будет вычисляться кривизна.

Данная область состоит из всех треугольников первого кольца и треугольников, удовлетворяющих следующим условиям:

 треугольник не отделен от найденной области характерной кривой;

 все вершины треугольника лежат на расстоянии меньше заданного от исследуемой точки;

 общее количество треугольников в области ограничено заданным значением;

2) вычисляются матрицы из векторов, соответствующих ребрам каждого треугольника из найденного набора. Каждый вектор умножен на коэффициент *a*:

$$a = alfa \cdot |e|$$

где alfa — угол между треугольниками инцидентных ребру e, |e| — длина ребра.

 для построенной матрицы вычисляются собственные вектора и соответствующие им собственные числа, которые, в свою очередь, являются главными направлениями кривизн и их значениями соответственно.

Результаты работы алгоритма Cohen–Steiner D., Morvan J.-М. представлены на рис. 86 и 96.

Преимуществом этого алгоритма является то, что он выдает достаточно точные значения, а также в результате работы алгоритма можно получить направления главных кривизн. Недостаток данного алгоритма заключается в том, что вычисление кривизны происходит только во внутренних точках. Если все точки геометрии лежат на характерной кривой, то вычисление значений кривизн не производится (рис. 9б).



Рис. 8. Геометрия cubit: а – красной линией выделены характерные ребра геометрии cubit, б – распределение значений кривизны, полученных в результате работы алгоритма. Красным цветом обозначена нулевая кривизна





Рис. 9. Геометрия skoba: а – красной линией выделены характерные ребра геометрии skoba, б – распределение значений кривизны, полученных в результате работы алгоритма Cohen–Steiner D., Morvan J.-М. Желтым цветом обозначена нулевая кривизна

Модификации алгоритма Cohen–Steiner D., Morvan J.-M.

В ходе исследования алгоритма Cohen-Steiner D., Morvan J.-М были опробованы несколько его модификаций. Все модификации затронули вычисление кривизны в граничных точках.

Первая модификация. На первом шаге алгоритма в область, на которой будет вычисляться кривизна, добавляется только первое кольцо треугольников, которое, в свою очередь, разбито характерными кривыми на несколько частей.

На каждой части кольца кривизна вычисляется по алгоритму Cohen–Steiner D., Morvan J.-М., начиная со второго шага алгоритма. Итоговое значение кривизны в граничной вершине находится как максимальное из значений, найденных на отдельных частях первого кольца.



Рис. 10. Распределение значений кривизны, полученных в результате работы первой модификации алгоритма Steiner D: а – вершина, в которой достигается максимальная кривизна на всей геометрии, б – вершина, в которой значение кривизны превышает значение кривизны на сфере в 2 раза

Значения кривизны зависят от площади первого кольца треугольников.

Вторая модификация. Изменен этап поиска области. Из трех ограничений для поиска треугольников остается два:

 все вершины треугольника лежат на расстоянии меньше заданного от исследуемой точки;

 общее количество треугольников в области ограничено заданным значением.

Вся область разбивается характерными кривыми, полученными с предыдущего этапа работы поверхностного генератора.

Главным недостатком стала зависимость этапа вычисления кривизны от результатов предыдущих этапов работы поверхностного генератора.

Третья модификация. Третья модификация отличается от второй этапом получения характерных кривых. Характерные кривые выделяются по углу в 60 градусов между треугольниками. Угол был получен эмпирически.

На рис. 11 приведено распределение значений кривизн для геометрии cubit, полученных в результате работы второй и третьей модификации. На рис. 12 – фрагмент этого распределения в месте стыка сферической поверхности и 2-х плоскостей.



Рис. 11. Распределение значений кривизн для геометрии cubit, полученных в результате работы второй и третьей модификации



Рис. 12. Фрагмент распределения рис .11

Практическое применение алгоритма Cohen-Steiner D., Morvan J.-М. И его модификаций

При применении первой модификации алгоритма на границе сетки наблюдались скачки значений кривизны из-за характерных особенностей геометрий (длинных вытянутых треугольников или треугольников очень малой площади). Также значение кривизны зависит от размера области, на которой вычисляется кривизна.

Вторая модификация алгоритма зависит от предыдущего этапа работы генератора – разбиения геометрии на патчи. Так как генератор находится на этапе разработки, то после предыдущего этапа данные не всегда корректны, из-за чего возможны ситуации, когда этап вычисления кривизн в вершинах сетки отрабатывает некорректно.

Третья модификация используется в поверхностном генераторе SurfaceRemeshT3.

Заключение

В генераторе поверхностных сеток ЛОГОС.Пре-Пост был добавлен этап вычисления метрик по значениям кривизны, что значительно повысило качество итоговых сеток. Для вычисления кривизны используется третья модификация алгоритма Cohen–Steiner D., Morvan J.-M., так как по сравнению с другими она показала наилучший результат, несмотря на недостатки исходной сетки, такие как значительная разница площадей соседних треугольников, а также низкое качество исходных треугольников.

Результаты работы поверхностного генератора приведены на рис. 13–16. Результирующие сетки были получены для одной исходной замкнутой геометрии здания, окруженного габаритной коробкой. Исходная геометрия разбита на два патча: здание и габаритная коробка. На каждом патче заданы одинаковые пользовательские размеры. Итоговые сетки построены в двух версиях поверхностного генератора: в первой версии (рис. 13 и 15) метрика вычисляется по размерам, которые задал пользователь, во второй версии (рис. 14 и 16) метрика вычисляется с учетом кривизны исходной поверхности. Видно, что на рис.13 и 15 сетка в искривленных местах грубая по сравнению с сетками на рис. 14 и 16.



Рис. 13. Поверхностная сетка крыши здания, построенная с метриками, вычисленными по пользовательским данным



Рис. 14. Поверхностная сетка крыши здания, построенная с метриками, вычисленными с учетом искривления поверхности



Рис. 15. Фрагмент поверхностной сетки здания, построенной с метриками, вычисленными по пользовательским данным

Литература



Рис. 16. Фрагмент поверхностной сетки здания, построенной с метриками, вычисленными с учетом искривления поверхности

1. Kim S. J., Kim C.-H., Levin D. Surface simplification using discrete curvature norm // The Third Israel-Korea Binational Conference on Geometric Modeling and Computer Graphics, Seoul, Korea, October 2001.

2. Krsek P., Lukarcs C., Martin R.R. Algorithms for computing curvatures from range data // The Mathematics of Surfaces VIII, Information Geometers, A. Ball et al. (Eds.), 1998, pp. 1–16.

3. Taubin G. Estimating the tensor of curvature of a surface from a polyhedral approximation // The Fifth International Conference on Computer Vision, 1995. P. 902–907.

4. Watanabe K., Belyaev A.G. Detection of salient curvature features on polygonal surfaces // Eurographics 2001. Vol. 20, No 3, 2001.

5. Cohen-Steiner D., Morvan J.-M. Restricted Delaunay Triangulations and Normal Cycle // SoCG'03 California, SD: 2003.

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ ОБТЕКАНИИ ПУЧКОВ ТРУБ С ТРЕУГОЛЬНОЙ РАВНОСТОРОННЕЙ РАССТАНОВКОЙ

Р. А. Анпилогов, <u>В. А. Белугин</u>, Д. Н. Поздяев

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

В работе исследовался вопрос соотношения гидравлических сопротивлений при двух выделенных направлениях поперечного обтекания пучка гладких труб плотной треугольной равносторонней расстановки. Исследование проводилось по трем направлениям: анализ стандартной эмпирической формулы для расчета гидравлического сопротивления, анализ экспериментальных данных и расчетное исследование. Поперечное течение в пучке труб, как и обтекание одиночного цилиндра, является отрывным турбулентным течением, поэтому в работе предпринята попытка использования одного из гибридных RANS-LES методов, а именно, метода моделирования отсоединенных вихрей (Detached Eddy Simulation, DES). Результаты исследования служат аргументом в пользу того, что обсуждаемое соотношение для плотных трубных пучков слабо зависит от шага расстановки.

1. Типы поперечного обтекания равносторонних треугольных пучков труб. Формула Локшина

Будем рассматривать равносторонний треугольный пучок срасстоянием между ближайшими трубами (шагом расстановки) *а* и диаметром труб *d*. На рис. 1 изображена небольшая область такого пучка вместе с геометрическими параметрами, которые используются в дальнейших построениях. Величина $\sigma_{\Delta} = a/d$ – относительный шаг расстановки. Особенностью равностороннего пучка труб является то, что в нем присутствуют два естественных направления течения, шахматное и диагональное, которые чередуются с шагом 30°при мысленном повороте потока относительно пучка. Гидравлические сопротивления единицы длины трубного пучка при шахматном и диагональном направлениях течения могут быть различны.

Равносторонний пучок труб представляет собой частный случай равнобедренного пучка труб, для оценки гидравлического сопротивления которого существует эмпирическая формула, охватывающая широкий диапазон возможных параметров пучка – «формула Локшина», предложенная В. А. Локшиным с соавторами в работе [1]. Формула широко известна и часто рекомендуется в справочниках по теплогидравлическим расчетам – см. [2, 3]. В подходе Локшина коэффициент сопротивления пучка, опре-

деляющий перепад полного давления, зависит от нескольких безразмерных параметров:

- поперечного относительного шага σ_{\perp} ,
- продольного относительного шага σ_□, который используется для вычисления параметра геометрическо-

го сжатия $\psi = (\sigma_{\perp} - 1)/(\sigma' - 1), \sigma' = \sqrt{0, 25 \cdot \sigma_{\perp}^2 + \sigma_{\square}^2},$ • числа рядов *z*,

- числа рядов 2,
- числа Рейнольдса.

Формула Локшина имеет следующий вид:

$$\begin{split} \Delta p^* &= \xi \cdot \frac{\rho \upsilon_{\perp}^2}{2} , \quad \xi = \xi_0 (z+1) , \quad \xi_0 = C \operatorname{Re}^{-0.27} , \\ C &= 3, 2 + 0, 66 (1, 7 - \psi)^{1, 5} , \ 0, 1 \leq \psi \leq 1, 7 , \ \sigma_{\perp} \geq 1, 44 ; \ (1) \\ C &= 3, 2 + 0, 66 (1, 7 - \psi)^{1, 5} + \\ &+ \frac{1, 44 - \sigma_{\perp}}{0, 11} \left(0, 8 + 0, 2(1, 7 - \psi)^{1, 5} \right) , \\ 0, 1 \leq \psi \leq 1, 7 , \qquad 1, 08 \leq \sigma_{\perp} \leq 1, 44 ; \\ C &= 0, 44 (\psi + 1)^2 , \qquad 1, 7 \leq \psi \leq 6, 5 , \qquad \sigma_{\perp} \geq 1, 44 ; \\ C &= \left(0, 44 + 2(1, 44 - \sigma_{\perp}) \right) (\psi + 1)^2 , \qquad 1, 7 \leq \psi \leq 6, 5 , \\ &\sigma_{\perp} \leq 1, 44 , \end{split}$$

Формула Локшина применима в диапазоне чисел Рейнольдса $10^3 - 2 \cdot 10^5$.Число Рейнольдса определяется по средней скорости V_{\perp} в свободном сечении (выделено жирными линиями) в основании минимального треугольного элемента пучка, перпендикулярно к которому набегает поток и по диаметру труб – $\text{Re} = V_{\perp}d/v$, где v – кинематеческая вязкость. Подсчет рядов в пучке осуществляется, как показано на рис. 1, при этом длина рядов – $\sigma_{\Box}d$.

Для шахматного (рис. 1а) и диагонального (рис. 1б) протекания расстановки геометрические параметры σ_{\perp} , σ_{\Box} , ψ естественным образом различаются и могут быть выражены через значение относительного шага σ_{Δ} :

$$\sigma_{\perp}^{uuax} = \sigma_{\Delta}, \ \sigma_{\Box}^{uuax} = \frac{\sqrt{3}}{2}\sigma_{\Delta}, \ \sigma_{\perp}^{\partial uaz} = \sqrt{3}\sigma_{\Delta}$$

$$\psi^{uuax} = 1, \ \psi^{\partial uaz} = \frac{\sqrt{3}\sigma_{\Delta} - 1}{\sigma_{\Delta} - 1}, \ \sigma_{\Box}^{\partial uaz} = \frac{1}{2}\sigma_{\Delta}$$
(2)



Рис. 1. Геометрические параметры треугольного равностороннего пучка при двух ориентациях потока, выраженные через диаметр труб d и относительный шаг равносторонней расстановки σ_{Δ} : а – шахматное направление течения, б – диагональное направление течения

В соответствии с выражениями (2), $\sigma_{\perp}^{\partial uac} > \sqrt{3}$, $\psi^{\partial uac} > \sqrt{3}$ при любом $\sigma_{\Delta} > 1$ и $\psi^{\partial uac}$ становится тем больше, чем плотнее расстановка.

Исходя из формулы Локшина, выражения для расчета перепада полного давления в случаях шахматного и диагонального направлений можно выписать отдельно. При этом удобно привести их к единому виду, выбрав в качестве определяющей число Рейнольдса скорости величину, пропорциональную скорости набегающего потока V,например $V_{\Delta} = \sigma_{\Delta} V / (\sigma_{\Delta} - 1)$ для обоих случаев протекания. Величина V_{Λ} задает единое число Рейнольдса $\operatorname{Re}_{\Lambda}$.. В случае шахматного протекания V_л равна средней скорости V₁ в узком сечении, перпендикулярном потоку, а в случае диагонального протекания представляет собой эффективную величину. Тогда, исходя из (1) и используя выражения (2), для шахматного направления:

$$\Delta p_{max}^{*} = \chi^{max} \frac{\rho(V_{\Delta})^{2}}{2}, \qquad \chi^{max} = \chi_{0}^{max}(z+1),$$
$$\chi_{0}^{max} = C_{\Delta}^{max} \cdot \operatorname{Re}_{\Delta}^{-0,27}, \qquad (3)$$

$$\begin{split} C_{\Delta}^{uuax} &= 3, 2 + 0, 66 \big(0, 7 \big)^{1,5} + \frac{1, 44 - \sigma_{\Delta}}{0, 11} \Big(0, 8 + 0, 2(0, 7)^{1,5} \Big) \,, \\ &\quad 1, 08 \le \sigma_{\Delta} \le 1, 44 \;; \\ C_{\Delta}^{uuax} &= 3, 2 + 0, 66 \big(0, 7 \big)^{1,5} \,, \qquad \sigma_{\Delta} \ge 1, 44 \;. \end{split}$$

Для диагонального направления легко получить формулу

$$\Delta p_{\partial uaz}^{*} = \chi^{\partial uaz} \frac{\rho(V_{\Delta})^{2}}{2}, \qquad \chi^{\partial uaz} = \chi_{0}^{\partial uaz} (z+1),$$
$$\chi_{0}^{\partial uaz} = C_{\Delta}^{\partial uaz} \cdot \operatorname{Re}_{\Delta}^{-0,27}, \qquad (4)$$

$$\begin{split} C_{\Delta}^{\partial ua\varepsilon} &= 0,44 \Big(\psi^{\partial ua\varepsilon} + 1\Big)^2 \cdot \Big(\sqrt{3}\Big)^{1,73} / \Big(\psi^{\partial ua\varepsilon}\Big)^{1,73} \\ \psi^{\partial ua\varepsilon} &\leq 6,5 \,. \end{split}$$

Область применимости формулы для диагонального течения (4) заканчивается на значении $\psi^{\partial uar} = 6,5$, что соответствует $\sigma_{\Delta} = 1,154$. Для шахматного течения формула (3) применима вплоть до $\sigma_{\Delta} = 1,08$.

С помощью формул (3) и (4) можно оценить соотношение потерь полного давления в шахматном и диагональном направлениях течения. Будем рассматривать перепад полного давления на одной и той же длине в глубине пучка в обоих случаях. Для определенности выберем длину, равную длине ряда в шахматном направлении – $L = \sigma_{\Box}^{uuax} d$. В то же время, на длину L в диагональном направлении приходится $\sigma_{\Box}^{uuax} / \sigma_{\Box}^{\partial uuar} = \sqrt{3}$ рядов, см. рис. 1. Обозначим $\Delta p_{0,uuax}^*$ и $\Delta p_{0,\partial uuar}^*$ перепады, набирающиеся на длине L, соответственно в шахматном и в рядном направлениях течения в глубине пучка. С учетом разницы в длине рядов, очевидно, что:

$$\Delta p_{0,uax}^{*} = \chi_{0}^{uax} \cdot \frac{\rho(V_{\Delta})^{2}}{2},$$

$$\Delta p_{0,ouaz}^{*} = \chi_{0}^{\partial uaz} \sqrt{3} \frac{\rho(V_{\Delta})^{2}}{2}$$
(5)

Тогда, определяется как:

$$K = \frac{\Delta p_{0,uax}}{\Delta p_{0,0uaz}^*} = \frac{\chi_0^{uax}}{\chi_0^{0uaz}\sqrt{3}} = \frac{C_{\Delta}^{uax}}{C_{\Delta}^{0uaz}\sqrt{3}}.$$
 (6)

Величина *К* соответствует соотношению перепадов полных давлений для достаточно длинных равносторонних пучков труб одинаковой длины, в которых реализуется шахматное и диагональное течение. Величина *К* в подходе Локшина не зависит от числа Рейнольдсапри выбранном относительном шаге пучка.

2. Анализ экспериментальных данных. Ожидаемое соотношение гидравлических сопротивлений

Легко убедиться, что формула Локшина предсказывает почти независимый от величины σ_{Δ} коэффициент сопротивления C_{Δ}^{duar} при диагональном протекании, что приводило бы к резкому спаду *K* от значений ~1,5 при $\sigma_{\Delta} = 1,1$ к значениям ~0,8 при $\sigma_{\Delta} = 1,5$. Такое положение дел представляется маловероятным. Чтобы прояснить данный вопрос, был проведен анализ экспериментальных данных, собранных в статье [1], и анализ нескольких современных исследований [4–6], при этом рассматривались только равносторонние пучки.

Для шахматного направления коэффициенты C_{Δ}^{max} были оценены по результатам работ [4], [5] и [6] для значений σ_{Δ} , равных 1,1; 1,16 и 1,5; соответственно. Для диагонального направления коэффициенты $C_{\Delta}^{\partial uac}$ были оценены для значений σ_{Δ} , равных 1,172; 1,21 и 1,305 по результатам, приведенным в работе [1], и для $\sigma_{\Delta} = 1,5$ по результатам работы [6].

В отличие от случая шахматного направления, для диагонального направления отмечено существенное отличие экспериментальных значений от полученных по формуле Локшина. Для лучшей аппроксимации значений C_{Δ}^{duar} в области $\sigma_{\Delta} < 1, 2-1, 3$ формула (4) была модифицирована следующим образом:

$$C^{\partial uaz}_{\Delta,annp} = 0,505 \left(\psi^{\partial uaz} + 1\right)^2 \cdot \left(\sqrt{3}\right)^{1,73} / \left(\psi^{\partial uaz}\right)^{1,73} \tag{7}$$

Результаты анализа экспериментальных данных и расчет по формуле Локшина представлены на рис. 2.

В таблице приводятся значения величин C_{Δ}^{uax} и $C_{\Delta}^{duaz}\sqrt{3}$, необходимые для расчета удельного соотношения перепадов, полученные непосредственно по формулам (3) и (4), а также, более достоверные их значения по результатам описанного анализа. На рис. 2а представлены те же данные в графическом виде. Рис. 2б демонстрирует зависимость удельного соотношения перепадов от относительного шага по формуле Локшина и согласно проведенному анализу.

Данные по сопротивлению при шахматном и диагональном протекании равносторонних треугольных пучков труб с различными относительными шагами σ_{Δ} . Экспериментальные значения величин C_{Δ}^{uuax} и $C_{\Delta}^{\partial uac}\sqrt{3}$, значения по формуле Локшина и аппроксимированные значения в области отсутствия экспериментальных данных.



Рис. 2. Результаты анализа экспериментальных данных и расчет по формуле Локшина: а – зависимости величин C_{Δ}^{max} и $C_{\Delta}^{duac}\sqrt{3}$ от шага равностороннего пучка σ_{Δ} ; 6 – значение удельного соотношения перепадов полного давления

σ_{Δ}	1,1	1,16	1,172	1,21	1,305	1,5
C_{Δ}^{max} (эксп)	6,26	5,92				3,60
C_{Δ}^{max} (Лок)	6,42	5,92	5,82	5,50	4,71	3,59
C_{Δ}^{max} (аппр)			5,82	5,50	4,71	
$C_{\Delta}^{\partial uar}\sqrt{3}$ (эксп)			5,06	5,04	4,19	3,16
$C_{\Delta}^{\partial uar}\sqrt{3}$ (Лок)	4,41	4,35	4,35	4,37	4,46	4,65
$C_{\Delta}^{\partial uar}\sqrt{3}$ (аппр)	5,05	5,00				

По результатам проведенного анализа, зависимость $C_{\Delta}^{\partial uac}(\sigma_{\Delta})$ существенно отличается от «формульной», что приводит к примерному постоянству *K* на уровне значений 1.1÷1.25 в диапазоне относительных шагов $\sigma_{\Delta} = 1,1-1,5$, в отличие от предсказаний формулы Локшина.

3. Расчетное исследование

Расчеты проводились для расстановок с двумя значениями относительного шага: $\sigma_{\Lambda} = 1,1$ σ_{Λ} = 1,16. Для каждого значения σ_{Δ} исследовались 4 модели: пятирядный шахматный пучок, шестирядный шахматный пучок, девятирядный диагональный пучок, десятирядный диагональный пучок. Выбор размеров моделей мотивирован геометрией трубного пучка в экспериментах [4]. Диаметр труб во всех расчетных моделях составлял 54 мм, расстояние между центрами труб – 59.4мм в случае $\sigma_{\Lambda} = 1,1$ и 62,64мм в случае $\sigma_{\Lambda} = 1,16$. Поперечная толщина трубного пучка составляет для всех моделей 70 мм. На рис. 3 представлена трехмерная модель пятирядного шахматного пучка с относительным шагом $\sigma_{\Lambda} = 1,1$, как пример использованных моделей. На боковых стенках, перпендикулярных осям труб, использовались периодические граничные условия, на верхней и нижней стенках - симметричные граничные условия.



Рис. 3. Геометрия пятирядного пучка с шахматным направлением течения, $\sigma_{\Lambda} = 1, 1$, в трех измерениях

Расчеты проводились средствами ЛОГОСЗD методом DDES (Delayed Detached Eddy Simulation) с модельными константами по умолчанию. В расчете, после установления стационарного течения, измерялся перепад полного давления на модельной геометрии, после чего, в соответствии с подходом Локшина, вычислялся коэффициент сопротивления всего пучка и сопротивление на характерной длине $L - \chi_0^{max}$ и $\chi_0^{duar}\sqrt{3}$. Последовательным изменением параметров потока в расчетах было обеспечено достижение набора чисел Рейнольдса Re_{Δ} в диапазоне $10^4 - 10^5$.

В расчетах использовалась сетка, представляющая собой комбинацию полиэдрального замощения всей модели с размерами ячеек ~2–4 мм и концентрических окружностей, образующих пристеночный слой суммарной толщины 0,9 мм вокруг труб – см. рис. 4. Пристеночный слой состоит из 25 слоев с прогрессивно увеличивающейся со знаменателем 1.1 толщиной от стенки. Дополнительные RANS – расчеты показали достаточность разбиения такой области на ~15–20 слоев в исследуемом диапазоне чисел Рейнольдса. Размеры гексагональных ячеек были взяты как предельно допустимые для описания крупных, энергонесущих, вихрей с размером порядка величины зазора. Шаг по времени 10^{-4} с обеспечивал максимальные числа Куранта ~5 при Re₄ ≈ 10^{5} .



Рис. 4. Пример использованной расчетной сетки, $\sigma_{\Lambda} = 1,1$

На рис. 5 представлены расчетные сопротивления на характерной длине для пучков с относительным шагом $\sigma_{\Lambda} = 1,16$, вместе с соответствующими экспериментальными результатами. Для шахматного протекания использовались результаты работы [5] по исследованию сопротивления шестирядного пучка труб. Для диагонального направления ожидаемая зависимость была экстраполирована по данным, приведенным в работе [1], для восьмирядного пучка сочень близким относительным шагом σ_{Δ} = 1,172 . Для данного пучка приводится значение коэффициента C = 25,0 в диапазоне чисел $\text{Re} = 0.8 - 4,0.10^4$, в подходе Локшина, что соответствует ожидаемой зависимости сопротивления от числа Re_A вида $2,89 \cdot (9+1) \cdot \operatorname{Re}_{\Lambda}^{-0,27}$ для девятирядного пучка с $\,\sigma_{\Delta}$ = 1,172 , в диапазоне чисел ${\rm Re}_{\Delta} \square$ 3 – 13 $\cdot 10^4$. Для учета погрешности эксперимента и погрешности аппроксимации полагаем диапазон ожидаемых значений коэффициента сопротивления в этом случае равным ±15 %.



Рис. 5. Сопротивления на характерной длине $L - \chi_0^{max}$ и $\chi_0^{\partial uac} \sqrt{3}$ для пучковс относительным шагом $\sigma_{\Delta} = 1,16$, в зависимости от числа Re_A

На рис. 6 представлены расчетные сопротивления на характерной длине для пучков с относительным шагом $\sigma_{\Lambda} = 1,1$, а также, соответствующие экспериментальные результаты для пятирядного пучка при шахматном протекании [4]. Экспериментом был охвачен небольшой диапазон чисел Рейнольдса, при погрешности измерения коэффициента сопротивления в 15%. Указанную погрешность измерения сопротивления авторы связывают со значительным разбросом фактических диаметров труб и реальных шагов разбивки трубных досок, измеренных перед сборкой исследуемого пучка. При этомпо утверждению авторов работы [5], в этом эксперименте могла иметь место ошибка измерения сопротивления макета в сторону занижения фактического результата. Отметим также, что в работе [7] данная экспериментальная кривая приводится с увеличенными на ~15 % значениями. С учетом сказанного, расчетное описание экспериментальных данных по шахматному направлению является вполне удовлетворительным.



Рис. 6. Сопротивления на характерной длине $L - \chi_0^{max}$ и $\chi_0^{\partial uaz} \sqrt{3}$ для пучков с относительным шагом $\sigma_{\Delta} = 1, 1$, в зависимости от числа Re_A

Как для случая расстановок с относительным шагом $\,\sigma_{\Delta}$ = 1,16 , так и для случая $\,\sigma_{\Delta}$ = 1,1 было получено удовлетворительное описание экспериментальных зависимостей. Сопротивления на характерной длине для пучков разной рядности хорошо согласованы между собой, как и предсказывает подход Локшина. Величина К в расчетах почти не зависит от числа Рейнольдса и составляет ~1,27 для относительного шага σ_{Λ} = 1,1 и ~1,22 для относительного шага σ_{Λ} = 1,16, что согласуется с ее значениями (1,24 и 1,18) по результатам анализа экспериментальных данных (см. рис 2,б). Показатели степени при числе Рейнольдса, характеризующие наклон расчетных зависимостей, составили во всех случаях -0,18 против -0,27 в подходе Локшина. Расчетный наклон, скорее всего, отражает не физику течения, а свидетельствует о худшем

описании течения на фиксированной расчетной сетке при переходе от относительно низких скоростей течения к высоким.

Заключение

Проведенный анализ экспериментальных данных позволяет сделать вывод о слабой зависимости соотношения гидравлических сопротивлений при двух выделенных направлениях поперечного протекания плотной треугольной равносторонней расстановки труб от ее относительного шага. Значение соотношения, вероятно, составляет ~1,1–1,25 между шахматным и диагональным направлениями, для пучков труб с относительными шагами расстановки ~1,1–1,5.

В расчетах методом моделирования отсоединенных вихрей(Detached Eddy Simulation, DES) было получено удовлетворительное описание экспериментальных данных по гидравлическому сопротивлению трубных пучков с малыми относительными шагами. Расчетное соотношение сопротивлений в двух направлениях течения качественно и количественно согласуется с результатами анализа экспериментальных данных.

Литература

1. Локшин В. А., Мочан С. И., Фомина В. Н. Обобщение материалов по аэродинамическим сопротивлениям шахматных поперечно омываемых пучков труб // Теплоэнергетика. 1971. № 10. С. 67–70.

2. Кириллов П. Л, Юрьев Ю. С., Бобков В. П. Справочник по теплогидравлическим расчетам. –М.: Энергоатомиздат, 1990. С. 36.

3. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1992. С. 611.

4. Беленький М. Я., Готовский М. А., Фокин Б. С. Экспериментальное исследование теплогидравлических характеристик поперечно обтекаемых суперплотных шахматных пучков труб // Теплоэнергетика. 2000. № 10. С. 44–48.

5. Бурков В. К., Константинов В. Ф. Исследование теплоаэродинамических характеристик поперечно-омываемых суперплотных шахматных пучков труб // Теплоэнергетика. 2003. № 5. С. 56–60.

6. Анисин А. А. Повышение энергетической эффективности пучков гладких труб и профилированных каналов для газо-жидкостных теплообменных аппаратов энергетических установок. Диссертация на соискание ученой степени доктора физикоматематических наук. СПбГПУ, 2009.

 Крюков И. А. Сопротивление суперплотных пучков труб // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2014. Т. 15, вып. 6., С. 1–9.

ПОСТРОЕНИЕ СЕТКИ ПРОТЯГИВАНИЕМ 2,5D ПОВЕРХНОСТНЫХ ЯЧЕЕК В ОТДЕЛЬНОМ ОБЪЕМЕ

А. Г. Гиниятуллина, В. В. Лазарев, Р. В. Мартенс

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

Введение

В настоящее время все большую роль в разработке и совершенствовании промышленных изделий и конструкций стало играть компьютерное моделирование и инженерный анализ. Они позволяют существенно сократить затраты времени и средств на разработку, создание и модернизацию различных технических устройств.

В рамках работ по созданию препостпроцессора «ЛОГОС.ПреПост» для отечественного пакета программ инженерного анализа «ЛОГОС», ведется разработка гибридного генератора сеток, предназначенного для подготовки качественных сеточных моделей для решения задач прочности. «ЛОГОС.Пре-Пост» – это единая система для задания начальных данных и генерации сеток для численного решения задач инженерного анализа, проведения визуальной предобработки сеточной модели, а также для предоставления графических интерфейсов для подготовки и выполнения инженерного анализа с использованием отечественных счетных кодов и постобработки результатов счета.

Наиболее сложной и ресурсоемкой задачей, занимающей большую часть времени при подготовке задачи к расчету, является генерация сеток. В настоящее время в «ЛОГОС.ПреПост» ведется разработка гибридного генератора сеток, предназначенного для подготовки качественных сеточных моделей для решения задач прочности.

Процесс построения сетки на геометрии гибридным генератором включает в себя следующие основные этапы:

1) нарезание геометрии на «блоки»;

2) распознавание «блоков»;

3) генерация сеток в «блоках» различными способами: регулярная сетка, сетка протягиванием, нерегулярная сетка [1].

Подобный подход реализован в коммерческих программных продуктах ABAQUS, ANSYS, HyperMesh и др.

Данная работа посвящена одному из способов построения 3D сетки в «блоке» – протягиванием поверхностных ячеек в объеме.

Общие принципы

Протягивание (вытягивание, экструзия) – одна из наиболее эффективных техник генерации шести-

гранных сеток в 2,5D объемах. 2,5D объем – это объем, который имеет топологически постоянный поперечный срез вдоль одной оси, которую называют «ось протягивания»[4]. Для таких объектов известна параметризация поверхности. Многие геометрические объекты могут быть разбиты на подобласти, имеющие ось симметрии или топологически эквивалентные таким областям (например, цилиндру) [3].

В настоящее время в ЛОГОС-ПреПост реализовано построение сетки протягиванием в 2,5D объеме, имеющем одну грань-источник и одну грань-цель – так называемое One-to-one протягивание. Объемы, которые имеют несколько граней-источников или граней-целей, могут быть разделены с помощью декомпозиции на 2,5D объемы, имеющие одну граньисточник и одну грань-цель. Поэтому далее речь пойдет именно о таких объемах.

В 2,5D объемах выделяют следующие составные элементы (рис. 1):

поверхность-источник (грань-источник);

- поверхность-цель (грань-цель);

- набор боковых граней.

Грань-источник и грань-цель также называют основаниями объема.



Рис. 1. Составные элементы 2,5D объемов: а – граньисточник, б – грань-цель, в – боковые грани

Грань-источник (рис. 1а) и грань-цель (рис. 1б) могут иметь разные площади и кривизну. Более того, нет ограничения на количество ребер, описывающих эти поверхности. Однако они должны быть топологически эквивалентными. Это означает, что они должны иметь одинаковое количество отверстий и логических сторон. Все боковые грани (рис. 1в) должны быть пригодными для построения регулярной четырехугольной сетки, то есть иметь четыре логических стороны. На рис. 2 приведены примеры 2,5D геометрических объемов.



Рис. 2. Примеры 2,5D геометрических объемов: а – геометрия 1, б – геометрия 2, в – геометрия 3

Общая процедура построения объемной сетки протягиванием в 2,5D объеме состоит из следующих четырех шагов:

 построение поверхностной сетки на граниисточнике или получение ее от смежного по этой грани объема – шаг 1.

 проекция поверхностной сетки с граниисточника на грань-цель (гарантируя этим, что исходная сетка и сетка на грани-цели будут иметь одинаковую сеточную структуру) – шаг 2.

 построение структурированной четырехугольной сетки на боковых гранях – шаг 3.

 построение узлов внутри объема и создание объемных элементов – шаг 4.

Две наиболее сложные задачи при реализации метода протягивания: шаг 2 и шаг 4.

В ЛОГОС-ПреПост построение сетки методом протягивания реализовано на базе генератора блочных сеток [5].

В основе построения блочных сеток лежит похожая идея: геометрическая область представляется в виде композиции шестигранных или четырехугольных топологических блоков. Таким образом, данный метод основывается на замене пользовательской геометрической модели на ее блочное представление. На каждой грани и каждом блоке строятся регулярные сетки, которые затем объединяются в единую нерегулярную сетку.

Операция протягивания, напротив, выполняется над нерегулярной сеткой на грани, и полученная в результате нее объемная сетка на блоке также нерегулярна.

Чтобы применить этот подход к организации данных для протягивания, были введены дополнительные топологические объекты для представления ранее неподдерживаемых типов геометрических элементов:

• произвольная топологическая грань, с которой связана нерегулярная поверхностная сетка;

• топологический блок под протягивание.

Произвольная топологическая грань представляет геометрическую грань, имеющую произвольное количество ребер и контуров.

Топологический блок под протягивание представляет геометрический объем, у которого выделены грань-источник и грань-цель, являющиеся произвольными топологическими гранями, и набор боковых граней, заданных четырехугольными топологическими гранями. Таким образом, исходными данными, на основе которых задаются параметры сетки, и выполняется ее построение в генераторе блочных сеток (рис. 3) являются:

1) геометрический 2,5D объем и представляющий его топологический блок под протягивание;

2) разбиение ребер геометрии, которое определяет размер ячеек сетки на гранях и толщину каждого слоя. В генераторе блочных сеток реализованы разбиения: равномерное, геометрическое, симметричное геометрическое и бигеометрическое.



Рис. 3. Исходные данные для построения сетки протягиванием: а – 2.5D объем, б – разбиение ребер геометрии

Коротко о реализации в ЛОГОС-ПреПост всех шагов алгоритма на базе генератора блочных сеток:

 шаг 1 – поверхностная сетка на граниисточнике строится методом подвижного фронта с помощью генератора неструктурированных конечно-элементных сеток в ЛОГОС-ПреПост (рис. 4а);

– шаг 2 – для проекции поверхностной сетки на грани-цели реализован метод приближения аффинного отображения по методу наименьших квадратов [6, 7] (рис. 4б). После построения выполняется сглаживание полученной сетки по Лапласу;

 – шаг 3 – структурированные сетки на боковых четырехугольных гранях строятся самим генератором блочных сеток (рис. 4в);

 шаг 4 – создание узлов внутри объема осуществляется модифицированным методом BMSweep, который будет более подробно рассмотрен в данной работе [4] (рис. 4г).



Рис. 4. Данные, получаемые на каждом шаге построения сетки протягиванием: а – шаг 1, б – шаг 2, в – шаг 3, Γ – шаг 4

Конечно, существуют и другие методы нахождения узлов внутри объема, основанные на аффинном преобразовании, методе наименьших квадратов и сглаживании [2, 4, 6, 7]. Однако в некоторых случаях они оказываются неэффективными либо из-за времени работы, либо из-за сингулярности матрицы преобразования, либо из-за некачественных элементов, получающихся в итоге.

Алгоритм BMSweep построения 3D сетки протягиванием

Для построения узлов внутри топологического блока под протягивание был выбран алгоритм «Sweeping via Background Mesh Interpolation» или сокращенно BMSweep – алгоритм, определяющий положение узлов внутри объема с помощью фоновой сетки. Алгоритм BMSweep, созданный группой специалистов из ANSYS, является одним из наиболее простых и универсальных алгоритмов. Интерполяционный метод предусматривает качественное создание элементов, даже если граница будет меняться.

Авторы алгоритма BMSweep заявляют его следующие преимущества:

• возможность построить сетку на любых 2,5D объемах;

• малая вычислительная сложность;

• не требует плоских грани-источника и границели;

• не требует параллельности грани-источника и грани-цели;

• не требует сглаживания после начального размещения внутренних узлов;

• не требует совпадения формы грани-источника и грани-цели (Пока грань-источник и граньцель имеют одинаковое количество циклов, области могут иметь разную поверхность и форму);

• не требует постоянную форму поперечного сечения вдоль направления протягивания, но требует постоянную топологию поперечного сечения.

При реализации алгоритм BMSweep, представленный в статье [4], был модифицирован для корректного построения узлов в случае, когда граница грани-источника и грани-цели неплоская или не перпендикулярна направлению протягивания. Для этого скалярную поправку положения узла, которая должна учитывать кривизну, заменили векторной величиной, которая изменяется вместе с направлением протягивания. Подробнее об этом будет написано ниже.

Для работы алгоритма BMSweep должны быть подготовлены следующие данные:

1) объем, на котором строится сетка (топологический блок под протягивание);

 на грани-источнике должна быть построена сетка, состоящая из четырехугольников и/или треугольников;

 на грани-цели должна быть построена сетка с такими же элементами, как и на грани-источнике.
 Например, переносом сетки с грани-источника на грань-цель методом приближения аффинного отображения по методу наименьших квадратов [6, 7];

4) все боковые грани области должны иметь регулярную, четырехугольную сетку, согласованную с сеткой на смежных гранях.

Если все данные подготовлены корректно, то каждому узлу на границе грани-источнике будет соответствовать узел на боковой поверхности на каждом слое и узел на грани-цели.

Алгоритм BMSweep состоит из следующих шагов: 1) построение фоновой сетки;

2) вычисление интерполяционной информации с помощью фоновой сетки;

 вычисление положения каждого внутреннего узла на всех слоях на основе фоновой сетки и полученной на предыдущем шаге интерполяционной информации;

4) формирование новых объемных элементов. Рассмотрим подробнее эти шаги.

1. Построение фоновой сетки

Фоновая сетка необходима для задания «каркаса», относительно которого можно вычислить положение внутренних узлов. Фоновая сетка генерируется тесселяцией области, ограниченной узлами контуров сетки на грани-источнике. Так как тесселяцию проще выполнить в 2D, то используем для нее параметрические координаты граничных узлов граниисточника. На рис. 5 показаны граничные узлы исходной сетки, спроецированные на параметрическую область, и сетка, полученная тесселяцией области, которую они ограничивают. Эта сетка используется в качестве фоновой для блока.

Фоновая сетка должна быть построена только с использованием граничных узлов. Это требование обусловлено тем, что при работе алгоритма фоновая сетка будет продвигаться от слоя к слою вдоль направления протягивания, в то время как ни один из промежуточных слоев не имеет пока внутренних узлов, соответствующих внутренним узлам исходной сетки.



Рис. 5. Фоновая сетка в параметрической области

2. Вычисление интерполяционной информации

Для каждого внутреннего узла исходной сетки необходимо вычислить следующую интерполяционную информацию:

1) треугольник фоновой сетки, который содержит этот узел; барицентрические координаты узла в найденном треугольнике на грани-источнике и на грани-цели;

 вектор смещения от грани-источника и от грани-цели.

Треугольник фоновой сетки

Для каждого внутреннего узла *i* исходной сетки находим его параметрические координаты (U_i^S, V_i^S) в параметрической области грани-источника. Затем с помощью них ищем «базовый» треугольник T_i – треугольник фоновой сетки в параметрической области, который содержит рассматриваемый узел. Базовый треугольник для внутреннего узла ищется только один раз и только на одной из гранейоснований, в данном случае – на грани-источнике, но используется для вычисления барицентрических координат данного узла на обоих основаниях. Вполне возможно, что один треугольник фоновой сетки будет содержать более одного узла или же вовсе не содержать узлов.

На рис. 6 черным показана фоновая сетка в параметрической области, а красным – исходная сетка, спроецированная на нее.



Рис. 6. Фоновая и исходная сетки в параметрической области

Чтобы избежать возможной ситуации, когда из-за недостаточной точности или погрешности вычислений (например, в случае, когда узел лежит близко к ребру) для некоторых узлов не были найдены треугольники, поиск треугольника решено было совместить с поиском барицентрических координат узлов. В качестве треугольника, «содержащего» обрабатываемый узел, принимается треугольник, в котором этот узел имеет наилучшие барицентрические координаты.

Барицентрические координаты

Барицентрические координаты вместе с треугольниками фоновой сетки используются для определения положения каждого внутреннего узла. Нужны два набора барицентрических координат для каждого внутреннего узла *i* грани-источника:

 $\left(a_{i}^{S},b_{i}^{S},c_{i}^{S}
ight)$ – барицентрические координаты узла *i* с параметрическими координатами $\left(U_{i}^{S},V_{i}^{S}
ight)$ в базовом треугольнике T_{i} фоновой сетки граниисточника. $\left(a_{i}^{T}, b_{i}^{T}, c_{i}^{T}\right)$ – барицентрические координаты соответствующего узла на грани-цели с параметрическими координатами $\left(U_{i}^{T}, V_{i}^{T}\right)$ в этом же треугольнике T_{i}

фоновой сетки грани-цели. При этом узел не обязательно должен принадлежать этому треугольнику.

Если форма грани-источника и грани-цели совпадают, то эти 2 набора барицентрических координат будут совпадать. Однако если форма граниисточника отличается от формы грани-цели, то барицентрические координаты могут отличаться. Фактически, если их форма решительно отличается, то треугольник фоновой сетки после переноса на граньцель может вовсе не содержать соответствующий узел, в этом случае одна или более барицентрических координат будут отрицательными, что вполне допустимо. Барицентрические координаты должны быть связаны с одним и тем же треугольником, так как каждый внутренний узел определяется линейной интерполяцией этих координат.

Вектор смещения

Вектор смещения – это вектор с началом во внутреннем узле *i* треугольника T_i фоновой сетки и концом в *i* узле 3D пространства.

Вектор смещения нулевой, если грань плоская. Если грань-источник или грань-цель не плоские, то для определения положения внутренних узлов необходимы вектора смещения. Вектор смещения как интерполяционные данные нужен для учета кривизны грани-источника и грани-цели, которая не передается фоновой сеткой. Поскольку только граничные узлы используются для построения фоновой сетки, то фоновая сетка отражает только кривизну, представленную на границе грани-источника и грани-цели.

Необходимо найти два вектора смещения для каждого внутреннего узла *i* грани-источника: v_i^S и v_i^T – вектор смещения от грани-источника и от грани-цели соответственно.

Пусть P_i^S – координаты внутреннего узла *i* грани-источника, а P_i^T – координаты соответствующего ему узла на грани-цели. $P_i^{S1}, P_i^{S2}, P_i^{S3}$ – координаты узлов треугольника T_i фоновой сетки на грани-источнике в 3D пространстве, а $P_i^{S1}, P_i^{S2}, P_i^{S3}$ – соответственно координаты узлов треугольника T_i фоновой сетки на грани-цели в 3D пространстве. Тогда формулы вычисления векторов смещения можно записать как:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{v}_i^S &= \left(\boldsymbol{a}_i^S \cdot \boldsymbol{P}_i^{S1} + \boldsymbol{b}_i^S \cdot \boldsymbol{P}_i^{S2} + \boldsymbol{c}_i^S \cdot \boldsymbol{P}_i^{S3}\right) - \boldsymbol{P}_i^S \\ \boldsymbol{v}_i^T &= \left(\boldsymbol{a}_i^T \cdot \boldsymbol{P}_i^{T1} + \boldsymbol{b}_i^T \cdot \boldsymbol{P}_i^{T2} + \boldsymbol{c}_i^T \cdot \boldsymbol{P}_i^{T3}\right) - \boldsymbol{P}_i^T \end{aligned}$$

3. Вычисление положения узлов каждого уровня

После вычисления интерполяционной информации положение P_i^L каждого узла *i* на каждом слое *L* может быть определено за четыре шага:

1) вычисление барицентрических координат (a_i^L, b_i^L, c_i^L) узла *i* в слое *L* с помощью линейной интерполяции барицентрических координат (a_i^S, b_i^S, c_i^S) и (a_i^T, b_i^T, c_i^T). Вычисление вектора смещения v_i^L для узла *i* в слое *L* линейной интерполяцией v_i^S и v_i^T – векторов смещения от граниисточника и грани-цели соответственно. В качестве интерполяционного параметра используется параметр разбиения бокового ребра блока. Это разбиение может задавать как равномерное расстояние между слоями, так и неравномерное, по определенному закону (геометрическое, симметричное геометрическое и бигеометрическое разбиение).

2) перемещение треугольника фоновой сетки T_i , содержащего соответствующий внутренний узел i на текущий слой L. Это достигается выбором граничных узлов на слое L, которые соответствуют узлам треугольника T_i на грани-источнике.

3) поворот вектора смещения v_i^L . При переходе от слоя к слою ориентация в пространстве сдвигаемой исходной сетки может меняться согласно изменению направления протягивания. Соответственным образом должен меняться и вектор смещения. Поэтому вектор смещения v_i^L для узла *i* на текущем слое *L* изменяем (поворачиваем) таким же образом, как изменилось направление протягивания в этом узле в слое *L* по сравнению с исходным направлением.

Пусть $V_i^{S1}, V_i^{S2}, V_i^{S3}$ – направления протягивания в узлах треугольника T_i фоновой сетки на граниисточнике в 3D пространстве, а $V_i^{L1}, V_i^{L2}, V_i^{L3}$ – направления протягивания в узлах треугольника T_i на слое *L*. Тогда направление протягивания внутреннего узла *i* на грани-источнике – V_i^S можно вычислить по формуле:

 $V_i^S = a_i^S \cdot V_i^{S1} + b_i^S \cdot V_i^{S2} + c_i^S \cdot V_i^{S3}$

Аналогично вычисляется V_i^L – направление протягивания внутреннего узла *i* в текущем слое *L*:

$$V_i^L = a_i^L \cdot V_i^{L1} + b_i^L \cdot V_i^{L2} + c_i^L \cdot V_i^{L3}$$

Далее находим параметры поворота, выполнив который, можно из вектора V_i^S получить вектор V_i^L :

• ось, вокруг которой осуществляется поворот,

вычисляется как векторное произведение V_i^S и V_i^L ;

• угол поворота – угол между векторами V_i^S

и V_i^L можно найти через их скалярное произведение.

Применяем этот поворот к вектору смещения и получаем вектор смещения v_i^{LR} .

4) следующей формулой можно определить положение P_i^L внутреннего узла *i* в слое *L*:

$$P_{i}^{L} = a_{i}^{L} \cdot P_{i}^{L1} + b_{i}^{L} \cdot P_{i}^{L2} + c_{i}^{L} \cdot P_{i}^{L3} + v_{i}^{LR}$$

Эта формула определяет финальное положение внутреннего узла. Проведение сглаживания не требуется. По сути, она вычисляет положение внутреннего узла с помощь интерполяции координат граничных узлов в слое *L*. Положение узлов в других слоях выше и ниже рассматриваемого слоя не влияет на положение узлов в нем. В результате положение узлов на каждом уровне изменяется вместе с граничными узлами этого уровня полностью независимо от глобальной ориентации объема. Это позволяет алгоритму BMSweep строить сетки протягиванием на объемах, которые резко скручиваются (рис. 8) и изменяются в поперечном сечении (рис. 9 и 10).

4. Формирование новых объемных элементов

Каждый слой *L* имеет такие же 2D элементы и в таком же порядке, как и первый слой, т. е. исходная сетка. Новые объемные элементы формируются в виде призм, основаниями которых являются 2D элементы с одинаковым идентификатором двух соседних слоев.

Примеры построенных сеток

На рис. 7 представлены объемные сетки, полученные протягиванием нерегулярной поверхностной сетки в 2,5D объеме на геометриях 1 и 3 из рис. 2a и 2в.



Рис. 7. Примеры объемной сетки на 2,5D объеме: а – на геометрии 1, рис. 2а; б – на геометрии 3, рис. 2в

На рис. 8 показана геометрия, поперечное сечение которой довольно сильно закручивается вокруг своей оси, приведена ее объемная сетка и один из внутренних слоев.



Рис. 8. Пример геометрии и объемной сетки с закручивающимся поперечным сечением: а – геометрия, б – объемная сетка, в – внутренний слой

Приведенные на рис. 9 и 10 сетки были построены на геометрии 2, приведенной на рис. 26, которую можно использовать для протягивания в разных направлениях, так как она является топологическим шестигранником. Были выбраны два наиболее интересных направления протягивания:

1) вдоль протягивания меняется поперечное сечение геометрии (рис. 9);

2) грань-источник и грань-цель, а также их границы неплоские (рис. 10).

Для наглядности в обоих примерах на граниисточнике была построена триангуляционная сетка. На рис. 9б и 10б показан один из ее внутренних слоев.



Рис. 9. Пример объемной сетки и отдельного слоя при изменении поперечного сечения вдоль оси протягивания: а – объемная сетка на геометрии 2, рис. 26; б – внутренний слой



Рис. 10. Пример объемной сетки и отдельного слоя при разной кривизне грани-источника и грани-цели: а – объемная сетка на геометрии 2, рис. 26; б – внутренний слой

Генератор блочных сеток позволяет создавать составные грани. С помощью них можно расширить применимость метод протягивания. Например, в некоторых случаях можно обойти требование для боковых граней, чтобы они являлись топологическими четырехугольниками, если их можно объединить в составную грань, которая является топологическим четырехугольником и содержит противолежащие ребро грани-источника и ребро грани-цели. На рис. 11 приведена геометрия, не являющаяся 2,5D объемом (рис. 11а), но которая может быть к нему приведена, если объединить выделенные боковые грани (рис. 11б) в одну составную грань.



Рис. 11. Геометрия, которую можно привести к 2,5D объему путем объединения выделенных боковых граней в одну составную: а – геометрия, не являющаяся 2,5D объемом,

б – геометрия с выделенными боковыми гранями

На рис. 12 показана объемная сетка (рис. 12а), полученная протягиванием на геометрии с рис. 11а и один из внутренних слоев объемных ячеек (рис. 12б).



Рис. 12. Объемная сетка на геометрии с составной боковой гранью и один слой ее внутренних ячеек: а – объемная сетка, б – внутренний слой

Заключение

В ЛОГОС.ПреПост ведется разработка гибридного генератора для подготовки сеточных моделей для решения задач прочности. Гибридный генератор предназначен для построения сетки в «блоках» различными способами, одним из которых является построение сетки протягиванием. В данной работе представлен подход к построению объемной сетки протягиванием в единичном объеме и его интеграция в генератор блочных сеток. Подробно рассмотрен модифицированный метод BMSweep - метод определения положения узлов внутри объема вдоль протягивания, который позволяет строить сетку, не требуя параллельности или плоскости граней, и при этом допускает вращение и изменение формы поперечного сечения геометрии вдоль протягивания до тех пор, пока выполняется постоянство топологии поперечного сечения. В дальнейшем планируется развивать генератор, добавив возможность строить сетки на блоках, имеющих более одной граниисточника (составную грань-источник).

Литература

1. Фархутдинов В. Ф., Тарасов В. И., Соловьев А. Н., Борисенко О. Н., Смолкина Д. Н., Кузьменко М. В. и др. Обзор возможностей по обработке геометрических и построению сеточных моделей в ЛОГОС.Препост // Труды XIV Международной конференции «Супервычисления и математическое моделирование». 2013. С. 585–592.

2. Owen S. Non-Simplical Unstructured Mesh Generation. A Dissertation Submitted to The Department of Civil and Environmental Engineering Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA. U.S.A. in Partial Fulfillment of Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy. 1999.

3. Ted D. Blacker, The Cooper Tool // Proceedings, 5th International Meshing Roundtable. 1996. P. 13–29.

4. Staten M. L., Canann S. A., Owen S. J. BMSweep: Locating interior nodes during sweeping // Engineering with Computers. 1999. Vol. 15, No 3, P. 212–218.

5. Лазарев В. В., Фархутдинов В. Ф., Данилова Т. Г., Морозова Е. В. Блочные регулярные сетки в ПреПроцессоре ЛОГОС // XII научно-техническая конференция «Молодежь в науке»: Сб. докладов, Саров, 2014. С. 67–70.

6. Roca X, Sarrate J, Huerta A. Surface Mesh Projection for Hexahedral Mesh Generation by Sweeping // 13th Int Meshing Roundtable. 2004. P. 169–179.

7. Roca X, Sarrate J. An Automatic and General Least-Squares Projection Procedure for Sweep Meshing // Engineering with Computers. 2010. Vol. 26, issue 4, P. 391–406.

ГЕНЕРАТОР ЗАМКНУТОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ТРИАНГУЛЯЦИОННОЙ СЕТКИ В КОМПЛЕКСЕ ПРОГРАММ ЛОГОС

<u>Ф. О. Голомидов</u>, В. А., Никитин А. И., Панов С. С. Соколов, А. В. Шурыгин

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

В настоящее время во ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» разработан комплекс программ инженерного анализа ЛОГОС [1], предназначенный для подготовки, моделирования и анализа результатов задач прочности и тепломассопереноса с использованием супер-ЭВМ с массовым параллелизмом. Для подготовки начальных данных для расчетных методик, входящих в состав пакета программ (ПП) ЛОГОС, используется интегрированный в состав ЛОГОС препостпроцессор ЛОГОС-ПреПост.

При подготовке математических моделей задач тепломассопереноса используется генератор многогранных дискретных моделей, входящий в состав ЛОГОС-ПреПост.

Поверхностная сетка в ЛОГОС-ПреПост может быть получена из нескольких источников. Во-первых, подготовленная с использованием стороннего программного обеспечения поверхностная сетка может быть импортирована в ЛОГОС-ПреПост через обменный формат (*.stl, *.vtk и др.). Во-вторых, поверхностная сетка может быть сгенерирована для исходной геометрической модели в параметрическом представлении. И в-третьих, поверхностная сетка может быть получена на этапе перестроения поверхностной сетки в операции генерации объемной сетки.

Следует отметить, что в том случае, когда в качестве исходной модели используется геометрическая модель, получаемая из САD-систем, данная модель может состоять из множества поверхностей, не имеющих общей границы со счетной областью. Возникает необходимость изолировать «лишние» элементы поверхностей и выделить единую поверхностную сетку, по которой в дальнейшем будет построена объемная сетка.

Сам генератор поверхностной сетки, используемой в ЛОГОС-ПреПост, во всех случаях работает исключительно с исходной поверхностной триангуляционной сеткой. Поэтому, крайне важно, чтобы эта исходная сетка была корректной. Наличие несогласованностей (дефектов) в исходной триангуляции делают невозможным дальнейшее построение объемной сетки.

Устранение обнаруженных дефектов в ЛОГОС-ПреПост может быть проведено как в автоматическом, так и в ручном режимах. Для обнаружения несогласованностей в геометрических моделях ЛОГОС-ПреПост предоставляет специальные средства диагностики. Во многих случаях, тем не менее, автоматическое исправление проблем невозможно или приводит к нежелательным побочным эффектам. В таких случаях у пользователя остается только вариант с ручным исправлением обнаруженных дефектов. Однако при большом количестве несогласованностей (обычно сотни и более), их исправление вручную является трудоемким и, как следствие, длительным мероприятием. Таким образом, существует высокая потребность в создании автоматических средств подготовки корректной замкнутой начальной триангуляционной сетки для последующего перестроения поверхностных и построения объемных сеток. Развитие таких средств позволит существенно сократить время подготовки 3D моделей к построению объемных сеток и тем самым заметно сократить общее время подготовки и проведения расчетов с использованием ПП ЛОГОС.

Коллективом авторов данной статьи было разработано средство, обеспечивающее возможность быстрой автоматической генерации корректных, замкнутых поверхностных сеток по исходной поверхностной сетке, содержащей различные несогласованности, дефекты в виде зазоров, пересечений, наложений треугольников и т. д.

Основные аспекты разрабатываемого генератора замкнутой поверхностной триангуляционной сетки

Метод генерации замкнутой поверхностной триангуляционной сетки (метод генерации ЗПТС), в литературе также встречается под названием метод вакуумной упаковки (метод ВУ), в области коммерческих программных систем инженерного анализа подход получил развитие, начиная с 2006 года. В настоящее время подобный инструмент реализован во многих коммерческих системах, например, таких как: CD-Adapco Star-CCM+, Altair HyperWorks, Siemens NX CAE, ANSA Beta CAE, ENGYS HELIX и др.

Публикаций, раскрывающих детали реализации этих генераторов, крайне мало. Одна из известных статей, авторы которой работали в компании FLUENT[2], описывают основные этапы и проблемы, связанные с реализацией подобного генератора, рис.1. В статье раскрываются основные действия, выполняемые на каждом из этапов.

Таким образом, задача генерации ЗПТС разбивается на следующие этапы:

 формирование начальной внешней оболочки методом построения адаптивной декартовой объемной сетки, рис. 16;



 извлечение поверхностной сетки из граней поверхностных ячеек объемной сетки, рис. 1в;

 проецирование точек поверхностной сетки на поверхность исходной геометрической модели, рис. 1г;

– оптимизация полученной поверхностной сетки, рис. 1д.

На первом этапе работы программы генерации замкнутой поверхностной триангуляционной сетки (генератор ЗПТС) происходит чтение из файла в формате *.stl исходной геометрии и вызывается процедура, связывающая треугольники начальной геометрии в замкнутую поверхность. Для этого строится габаритная шестигранная сетка, в которую погружается исходная геометрия. Для вершин треугольников формируются списки вершин, «пригодных» для формирования узла сетки, и ребер, которые необходимо объединить. Затем происходит их объединение в топологически связанную поверхностную сетку, рис. 2.



Рис. 2. Исходная геометрия, погруженная в габаритную шестигранную сетку

Если замкнутая поверхность сформировалась, то далее начинается анализ и коррекция результирующей поверхностной сетки, в противном случае, следующим этапом работы программы будет формирование вспомогательной объемной дробно-адаптивной сетки.

Ее формирование начинается с анализа пресечения треугольников исходной геометрии и ячеек вспо-

могательной габаритной шестигранной сетки. Для каждой ячейки формируется список индексов треугольников, пресекающих ее. Если же ни один треугольник не пресекает ячейку, то она удаляется.

Далее происходит дробление шестигранных ячеек по ряду критериев. К примеру, если ребро поверхностной сетки исходной геометрии находится внутри шестигранной ячейки, то она дробится на 8 подъячеек.

Следующим этапом снова проверяется пресечение треугольников с дочерними ячейками шестигранной сетки, и удаляются пустые ячейки, рис. 3.



Рис. 3. Дробно-адаптивная шестигранная сетка, с учетом выкинутых непересекающихся с исходной поверхностью ячеек

После всех манипуляций с дробно-адаптивной сеткой, происходит извлечение из нее ступенчатой поверхностной сетки.

Сначала из списка граней области находятся граничные, которые становятся будущими ячейками поверхностной сетки. В итоге получается «внешняя» и «внутренняя» поверхности по отношению к начальной геометрии. На рис. 4 показано сечение (плоскость XOY), проходящее через середину фюзеляжа самолета. Затем выделяем поверхность, которая будет проектироваться на исходную геометрию. Фрагмент полученной «внешней» сетки показан на рис. 5.



Рис. 4. Сечение (плоскость XOY), проходящее через середину фюзеляжа самолета



Рис. 5. Фрагмент полученной внешней сетки

Перед началом процедуры проектирования выполняется ряд оптимизаций ступенчатой поверхности, а также формируется ряд вспомогательных данных, описывающих характерные особенности исходной геометрии. Во вспомогательной информации о начальной топологии хранятся опорные линии. Опорные линии формируются по ребрам исходной поверхностной сетки, в местах, где угол между нормалями треугольников, образующих исходную поверхность, больше заданного пользователем параметра (по умолчанию, он равен 30 градусам), рис. 6. В качестве оптимизаций применяется триангуляция и сглаживание ступенчатой поверхности. Сглаживание производится для минимизации возможности возникновения перехлестов при проектировании треугольников на поверхность, а также для более ровного распределения узлов.



Рис. 6. Опорные линии исходной геометрии

На следующем этапе выполняется проектирование узлов оптимизированной поверхности на исходную геометрию. На этом этапе рассматривается каждый узел замкнутой поверхности и для него ищется ближайшая ячейка исходной сетки, на которой вычисляется точка проецирования. Узел замкнутой поверхности переносится в найденную точку. В результате, замкнутая поверхность «притягивается» к исходной сетке.

Результат работы программы показан на рис. 7.



Рис. 7. Результат работы программы

Заключение

Коллективом авторов данной статьи был разработан программный продукт, обеспечивающий возможность быстрой автоматической генерации корректных, замкнутых поверхностных сеток по исходной поверхностной сетке, содержащей различные несогласованности, дефекты в виде зазоров, пересечений, наложений треугольников и т. д.

Для оценки качества получаемой поверхностной сетки был произведен ряд тестовых испытаний, в ходе которых были выявлены положительные стороны разработанного генератора ЗПТС, а также отмечены места, требующие доработки. В ходе тестовых испытаний, полученные поверхностные сетки проверялись на наличие дефектов. Дефекты, такие как открытые контура, зазоры, самопересечения и т. д., в результирующей геометрии обнаружены не были. Следует отметить, что в местах, где пресекается большое число опорных линий, генератор ЗПТС может выдавать не очень качественную сетку. В дальнейшем планируется развивать алгоритмы и улучшать их быстродействие, а также улучшать качество результирующей сетки.

Литература

1. 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: физикоматематические модели расчета задач аэро-, гидродинамики и тепломассопереноса. Препринт № 111. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013, 67 с.

2. Surface mesh generation for dirty geometries by shrink wrapping using cartesian grid approach. Y. K. Lee, Chin K. Lim, Hamid Ghazialam, Harsh Vardhan, Erling Eklund, Fluent Inc.

ДИНАМИКА ЭЛЕКТРОННЫХ ВОЛНОВЫХ ПАКЕТОВ В ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ДИЭЛЕКТРИКАХ, НАХОДЯЩИХСЯ ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

<u>Н. А. Кравец</u>, Е. В. Фролова

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

Введение

Топологические изоляторы – особый тип материала, который внутри объема представляет собой диэлектрик, а на поверхности проводит электрический ток. Объемные состояния топологических диэлектриков характеризуются энергетическим спектром, который имеет запрещенную зону. Поверхностные же состояния являются бесщелевыми и локализованными вблизи границ двумерного или трехмерного газа. В такой ситуации электроны, лежащие на поверхности изолятора, находятся в проводящем состоянии, а электроны в объеме не проводят электрический ток.

В последние годы возрос интерес к изучению свойств двумерных и трехмерных топологических изоляторов [1–3]. Так, для экспериментального исследования поверхностных состояний рассматриваемых структур применялась техника спектроскопии с угловым разрешением ARPES, а так же методы СТМ, СТС и ряд оптических методов. Подобное активное исследование этих материалов связано с их необычной зонной струк-

турой [2–8]. Последнее приводит к тому, что поляризованные по спину электроны практически не рассеиваются на дефектах и неровностях поверхности диэлектрика. Это свойство представляет большой интерес в практическом плане для создания устройств спинтроники с малой диссипацией. В этой связи, несомненно, важным представляется исследование динамики электронных волновых пакетов в данных структурах.

Ранее в работе [9] авторами была исследована эволюция гауссовских волновых пакетов, сформированных из поверхностных электронных состояний в топологическом диэлектрике Bi₂Se₃, находящемся в магнитном поле, перпендикулярном плоскости 2D электронного газа. Было показано, что в этом случае проявляется нестандартная динамика электронной и спиновой плотностей, зависящая от специфики краевых состояний топологических диэлектриков и начальных характеристик волнового пакета. При этом начальный волновой пакет расщепляется на части, вращающиеся в противоположные стороны с одинаковыми частотами.

Пространственно-временная эволюция электронных волновых пакетов, содержащих состояния одной энергетической зоны

В настоящей работе был проведен более глубокий анализ эволюции электронных волновых пакетов в топологическом диэлектрике Bi₂Se₃, находящемся в перпендикулярном магнитном поле, с учетом эффектов, обусловленных неэквидистантностью спектра гамильтониана [3]:

$$H_{eff} = v_F \Big[\big(\hbar k_x - eBy \big) \sigma_y + i\hbar \partial_y \sigma_x \Big] + \Delta \sigma_z , \quad (1)$$

В данном случае для векторного потенциала \vec{A}

была выбрана калибровка Ландау $\vec{A} = (\vec{B}y, 0, 0)$.

С помощью не сложных аналитических вычислений, можно получить выражения для собственных функций (2) и собственных значений (3) гамильтониана (1):

$$|n,s\rangle = \begin{pmatrix} \sin \theta_{n,s} | n-1 \rangle \\ \cos \theta_{n,s} | n \rangle \end{pmatrix}, \tag{2}$$

$$E_{n,s} = s v_F \sqrt{2e\hbar B \left(n + m_0^2\right)}.$$
(3)

Коэффициент $s = \pm 1$ отражает наличие двух, противоположных по знаку, ветвей энергетического спектра (3), а именно зоны проводимости и валентной зоны. $|n\rangle$ – состояние гармонического осцилля-

тора,
$$\theta_{n.s} = \sqrt{n} / \left(s \sqrt{n + m_0^2 - m_0} \right)$$
, $m_0 = \Delta l_B / \sqrt{2} \hbar v_F$,
 Δ – энергия Зеемана, $l_B = \sqrt{\hbar/eB}$ – магнитная длина (будем работать в системе, в которой скорость света

равна единице c = 1). Неэквидистантность энергетического спектра (3) при изучении пространственно-временной эволюции начального локализованного состояния предполагает существование явлений коллапса и возрождения [10-12]. В работе [10] было показано, что если энергетический спектр системы не является эквидистантным и приближенно описывается выражением $E_n = E_{n0} + E'_{n0} (n - n_0) + E''_{n0} (n - n_0)^2 / 2 + ...,$ то линейный член разложения определяет период классических осцилляций волнового пакета $T_{cl} = 2\pi \hbar / E'_{n_0}$. При этом наряду с классическим периодом T_{cl} возникает дополнительный, чисто «квантовый» временной мас- $T_R = 4\pi\hbar/E_{n_0}^{"}$ – время штаб возрождения $(T_R >> T_{cl})$, который играет существенную роль в долговременной эволюции волновых пакетов.

Для иллюстрации этого фундаментального утверждения рассмотрим динамику локализованного волнового пакета, содержащего состояния одной (верхней) энергетической зоны (s=1) с номерами уровней Ландау вблизи среднего значения n_0 и дисперсией σ [13]:

$$\Psi(x, y, t) = \int dp \sum_{n,s} c_{n,s}(p) \varphi_{p,n,s}(x, y) \cdot \exp(-iE_{n,s}t/\hbar)$$

$$c_n^{s=-1}(p) = 0 \qquad (4)$$

$$c_n^{s=1}(p) = \sqrt{\frac{l_B}{\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{(p-q)^2 l_B^2}{2\hbar^2} - \frac{(n-n_0)^2}{2\sigma^2}\right)$$

Здесь $c_n^s(p)$ – коэффициенты разложения начального волнового пакета по стационарным состояниям (2).

После интегрирования (4) по квазиимпульсу получаем явный вид для компонент волновой функции (5):

$$\Psi_{1}(x, y, t) = f(x, y) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sqrt{2n}}{2^{n} n!} \left(\frac{y - q l_{B}^{2} - ix}{l_{B}} \right)^{n-1} \times \left(1 + \frac{m_{0}}{\sqrt{n + m_{0}^{2}}} \right)^{1/2} \exp\left(-\frac{(n - n_{0})^{2}}{2\sigma^{2}} - i\Omega\sqrt{n + m_{0}^{2}t} \right),$$

$$\Psi_{2}(x, y, t) = f(x, y) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2^{n} n!} \left(\frac{y - q l_{B}^{2} - ix}{l_{B}} \right)^{n-1} \times \left(1 - \frac{m_{0}}{\sqrt{n + m_{0}^{2}}} \right)^{1/2} \exp\left(-\frac{(n - n_{0})^{2}}{2\sigma^{2}} - i\Omega\sqrt{n + m_{0}^{2}}t \right),$$

где функция

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi^{3/4} l_B \sqrt{\sigma}} \times \exp\left(-\frac{x^2 + (y - q l_B^2)^2 - 2ix(y + q l_B^2)}{4 l_B^2}\right).$$

Для визуализации полученных результатов, удобно координаты *x* и *y* измерять в единицах магнитной длины l_B , время в единицах Ω^{-1} ; кроме того, введем безразмерный параметр $a = l_B q$.

На рис.1 представлено распределение полной электронной плотности (6) в топологическом диэлектрике Bi₂Se₃ помещенном в магнитное поле B = 10T ($m_0 = 0,2$; $\Omega = 12,3 \cdot 10^{13} \text{ c}^{-1}$) в разные моменты времени. $\Omega = v_F \sqrt{2}/l_B$ – циклотронная частота. Исходный локализованный волновой пакет, собран из состояний вблизи уровня n₀=15 с дисперсией $\sigma = 3$.

$$\rho(x, y, t) = |\psi_1(x, y, t)|^2 + |\psi_2(x, y, t)|^2$$
(6)



Рис. 1. Распределение полной электронной плотности (6) начального волнового пакета (4), обладающего дисперсией $\sigma = 3$ в разные моменты времени: a – t = 0; б – t = $T_R/10$ – возродилось 5 подпакетов; в – t = $T_R/4$ – возродилось 2 подпакета; $\Gamma - t = T_R/2$ – полное возрождение волнового пакета.



Рис. 2. Распределение полной электронной плотности (6) начального волнового пакета (4), обладающего дисперсией $\sigma = 15$ в разные моменты времени: a - t = 0,2 пс; $\delta - t = 0,3$ пс; B - t = 0,4 пс.

При малых временах волновой пакет движется по классической циклотронной орбите с периодом $T_{cl} = 2\pi\hbar/\dot{E_{n_0}} = \left(4\pi\sqrt{n_0 + m_0^2}\right)/\Omega = 40\cdot10^{-14}c$. С течением времени электронная плотность распределя-

чением времени электронная плотность распределяется практически однородно по циклотронной орбите. Это происходит из-за расфазировки вкладов отдельных стационарных состояний, обусловленной неэквидистантностью уровней Ландау с номерами $n_0 - \sigma < n < n_0 + \sigma$. Однако на временном интервале $T_{cl} < t \le T_R$ в отдельные моменты $t = mT_R/n$ (где *m* и *n* – взаимно простые числа) фазы отдельных слагаемых в (5) становятся кратны 2π , что позволяет начальному волновому пакету частично собраться в $N = n \left(3 - (-1)^n\right)/4$ подпакетов. $T_R = 4\pi\hbar/E_{n_0}^r$ = $= \left(16\pi \left(n_0 + m_0^2\right)^{3/2}\right)/\Omega = 24 \cdot 10^{-12}c$ – время полного

возрождения, при котором пакет снова становится локализованным в пространстве. Следует отметить, что при $t \ge T_R$ классическая эволюция пакета возрождается вновь.

При увеличении дисперсии *σ*, наблюдение эффектов возрождения затруднено. Для демонстрации этого факта на рис. 2 представлено распределение полной электронной плотности для волнового пакета собранного из уровней Ландау вблизи среднего значения $n_0 = 20$ с дисперсией $\sigma = 15$ в разные моменты времени. Видно, что электронная плотность закручивается в спираль. Данное явление может быть объяснено несоразмерностью циклотронных частот соответствующих далеким друг от друга уровням Ландау. Кроме того, в данном случае наблюдается неоднородное заполнение электронной плотностью пространства внутри самой циклотронный орбиты.

Пространственно-временная эволюция электронных волновых пакетов, содержащих состояния с положительной и отрицательной энергиями

Рассмотрим эволюцию волнового пакета в топологическом изоляторе Bi_2Se_3 , содержащем состояния как верхней, так и нижней энергетических зон. Аналогично ситуации, рассмотренной в предыдущем разделе, выберем коэффициенты разложения в (4) в виде:

$$c_n^{s=-1}(p) = c_n^{s=1}(p) = \sqrt{\frac{l_B}{\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{(p-q)^2 l_B^2}{2\hbar^2} - \frac{(n-n_0)^2}{2\sigma^2}\right)$$

В этом случае явный вид компонент волновой функции пакета в произвольный момент времени принимает вид:

$$\begin{split} \Psi_{1}(x,y,t) &= -i \cdot f(x,y) \sum_{n=1} \frac{\sqrt{2n}}{\sqrt{2^{n} n!}} \left(\frac{y - q l_{B}^{2} - ix}{l_{B}} \right)^{n-1} \times \\ &\times \left(1 + \frac{m_{0}}{\sqrt{n + m_{0}^{2}}} \right)^{1/2} \exp\left(-\frac{\left(n - n_{0}\right)^{2}}{2\sigma^{2}} \right) \cdot \sin(\Omega \sqrt{n + m_{0}^{2}} t), \\ &\Psi_{2}(x,y,t) = f(x,y) \sum_{n=1} \frac{1}{\sqrt{2^{n} n!}} \left(\frac{y - q l_{B}^{2} - ix}{l_{B}} \right)^{n-1} \times \\ &\times \left(1 - \frac{m_{0}}{\sqrt{n + m_{0}^{2}}} \right)^{1/2} \exp\left(-\frac{\left(n - n_{0}\right)^{2}}{2\sigma^{2}} \right) \cdot \cos(\Omega \sqrt{n + m_{0}^{2}} t), \end{split}$$

где функция

$$f(x, y) = \frac{2}{2\pi^{3/4} l_B \sqrt{\sigma}} \times \exp\left(-\frac{x^2 + (y - q l_B^2)^2 - 2ix(y + q l_B^2)}{4 l_B^2}\right)$$

Распределение полной электронной плотности (6) начального волнового пакета (4), содержащего состояния с положительными и отрицательными энергиями, обладающего дисперсией $\sigma = 3$ в разные моменты времени представлено на рис. 3.

В результате начальный волновой пакет (рис. 3а), состоящий наполовину из состояний верхней зоны и наполовину – из состояний нижней энергетической зоны, на начальной стадии своей эволюшии расшепляется на два подпакета, врашающиеся в противоположных направлениях по циклотронной орбите (рис. 3б, 3в, 3г). При этом два раза за циклотронный период наблюдается интерференция подпакетов. Через достаточно большой промежуток времени, когда каждый подпакет распределяется практически равномерно по циклотронной орбите (рис. 3д), эффект интерференции наблюдается практически перманентно за исключением моментов дробного возрождения (рис. 3е). На рис. 3е представлена плотность вероятности в момент времени $t \approx T_R/4$, представляющая собой регулярную структуру из четырех фракций (каждый из двух подпакетов частично собирается в два пакета-фракции).

Заключение

В данной работе исследованы эффекты коллапса и возрождения волновых пакетов в топологическом диэлектрике Bi_2Se_3 в присутствии внешнего перпендикулярного магнитного поля. Аналитически и численно изучена долгосрочная эволюция электронных волновых пакетов, являющихся суперпозицией состояний с квантовыми числами *n*, близкими к номеру некоторого уровня Ландау *n*₀.

Показано, что вместо стандартной циклотронной динамики – вращения с постоянной частотой ω_c – должна наблюдаться эволюция, характеризуемая полной делокализацией волнового пакета в пределах



Рис. 3. Распределение полной электронной плотности (6) начального волнового пакета (4) содержащего состояния с положительными и отрицательными энергиями, обладающего дисперсией $\sigma = 3$ в разные моменты времени: a - t = 0; $\delta - t = 0.04$ пс, B - t = 0.08 пс, $\Gamma - t = 0.1$ пс, d - t = 0.5 пс, $e - t = T_R/4=6$ пс

циклотронной траектории и последующим его восстановлением. При этом можно выделить несколько характерных времен периодичности, которые зависят от деталей спектра собственных значений исследуемой системы. Если энергетический спектр системы не является эквидистантным и приближенно описывается выражением $E_n = E_{n0} + E'_{n0}(n-n_0) + E''_{n0}(n-n_0)^2/2 + ...,$ то линейный член разложения определяет период классических осцилляций волнового пакета $T_{cl} = 2\pi\hbar/E'_{n0}$, время последующего восстановления – $T_R = 4\pi\hbar/E''_{n0}$, время частичного восстановления – T_Rm/n , где *m* и *n* – взаимно простые числа.

Литература

1. Konig M., Buhmann H., Molenkampet L. W. et al., Phys. Soc. Jpn. 2008. V. 77, P. 031007.

2. Hasan M. Z., Kane C. L. Reviews of Modern Physics. 2010. V. 82, P. 3045.

3. Moore J. E. Nature Phys. 2009. V. 5, P. 378.

4. Shen S Q. Topological Insulators. Dirac Equation in Condensed Matters. Springer Series in Solid-State Sciences, 2012.

5. Qi H. L., Zhang S. H. Rev. Mod. Phys. 2011. V. 83, P. 1057.

6. Konig M., Wiedmann S., Brne C. et al. Science. 2007. V. 318, P.766.

7. Демиховский В. Я., Тележников А. В. Письма в ЖЭТФ. Т. 99. Вып. 2, С. 110–114.

8. Maksimova G. M., Demikhovskii V. Ya., Frolova E. V. Physical Review B.2008.V. 78, P. 235321.

9. Фролова Е.В., Кравец Н.А. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2016. № 3, С. 1–5.

10. Averbukh I. Sh., Perel'man N. F. Sov. Phys. Usp. 1991. V. 34, P. 572.

11. Yeazell J. A. et al. Observation of the Collapse and Revival of a Ridberg Electronic Wave Packet, Physical Review L. 1990.V. 64, P. 2007.

12. Vrakking M. J. J. Observation of fractional revivals of a moleqular wave packet, Physical Review A. 1990. V. 54, R37

13. Romera E., de los Santos F. Phys. Rev.B. 2009. V. 80, P. 165416.

РАЗРЕЗАНИЕ НЕВЫПУКЛЫХ МНОГОУГОЛЬНЫХ ГРАНЕЙ И МНОГОГРАННЫХ ЯЧЕЕК В ГЕНЕРАТОРЕ ОБЪЕМНЫХ СЕТОК МЕТОДОМ ОТСЕЧЕНИЯ В ЛОГОС.ПРЕПОСТ

<u>М. В. Кузьменко,</u> О. Н. Борисенко, Д. Н. Смолкина

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

Для задания начальных данных и генерации сеток, а также предоставления графических интерфейсов для подготовки и выполнения инженерного анализа по комплексу программ ЛОГОС[1] ведется разработка препостпроцессора ЛОГОС-ПреПост [2]. В рамках препостпроцессора для подготовки расчетных сеток для решения задач аэрогидромеханикиразрабатываются автоматические генераторы поверхностных триангуляционных сеток и объемных сеток с многогранными элементами методом отсечения.

Особенностью генератора сеток методом отсечения является неоднородная структура сетки. На рис. 1 приведены примеры типов ячеек в генераторе методом осечения.

Вдали от границ модели ячейки сетки (шаблонные ячейки), рис. 1а, имеют форму куба, но они могут состоять более чем из шести граней. Вблизи границы модели формируются ячейки, являющиеся многогранными призмами, рис. 1в. Отсеченные ячейки, рис. 1б, на стыке шестигранников и призм являются многогранниками произвольной формы (рис. 1). На рис. 2 показан плоский срез геометрии с обозначениями ячеек.



Рис. 1. Примеры типов ячеек в генераторе методом отсечения: а – шаблонная ячейка, б – отсеченная ячейка, в – призматическая ячейка

На рис. 2 показан плоский срез геометрии с обозначениями ячеек.

Счетный код ЛОГОС. Аэродинамика чувствителен к качеству сетки, на которой проводится численное моделирование. От качества сеток зависит как скорость проведения расчета, так и принципиальная возможность проведения расчета. Для моделирования физических процессов предпочтительными сетками являются сетки из правильных шестигранников, но построение таких сеток не может быть проведено автоматическими генераторами.

В процессе адаптации автоматического генератора методом отсечения к решению задач аэрогид-

ромеханики были выработаны критерии качества, которым должны отвечать ячейки многогранной сетки. К наиболее значимым можно отнести следующие критерии: минимальный объем ячеек (менее 1e-21), соотношение объемов ячеек (более 1e+4), минимальная площадь грани (менее 1e-10), невыпуклые ячейки. В генераторе сеток создан модуль улучшения качества сеток, который проводит корректировку сеток для удаления невыпуклых, вырожденных ячеек, ячеек с большими соотношениями объемов и площадей поверхностных граней, и т. д.



Рис. 2. Плоский срез геометрии

На данный момент в генераторе реализованы следующие модули улучшения качества сетки:

- посадка точек на поверхность;
- объединение малых ячеек сетки;
- объединение поверхностных граней;
- разрезание невыпуклых многогранных ячеек;

 разрезание поверхностных невыпуклых многоугольных граней.

Перед началом работ были изучены имеющиеся наработки по методам разрезания граней и ячеек. Для избавления от невыпуклости в гранях, предлагалось разбивать грань на треугольники [3], но этот метод вносил слишком много новых граней, что в свою очередь, значительно увеличивало количество ячеек на этапе восстановления призматики. Для разрезания невыпуклых ячеек рассматривался метод [4], но критерий разбиения, основанный на использовании максимального количества ребер, невыпуклости и минимального периметра вносил много вырожденных граней.

В данном докладе будут описанымодули разрезания невыпуклых многоугольных гранейи разрезания невыпуклых многогранных ячеекв генераторе сеток методом отсечения версии 5.1.

Разрезание невыпуклых граней

Восстановление призматических слоев в генераторе проводится на основе поверхностных граней, полученных после этапа отсечения треугольниками ячеек шаблонной сетки. В случае восстановления призматики с невыпуклой грани все ячейки будут невыпуклыми, что является нежелательным для проведения дальнейшего моделирования по счетному коду ЛОГОС. Аэродинамика. С этой целью в модуль улучшения качества была добавлена возможность разрезания невыпуклых граней. Способ разрезания невыпуклых граней зависит от количества и расположения особых точек на грани.

Алгоритм разрезания грани, рис. 3, состоит из следующих этапов:

 определение точек невыпуклости грани (особые точки) – точка Р_с на рис. 3;

 проверка расстояния между особыми точками. Если оно меньше заданной точности, то точка удаляется из списка особых;

3) выбор способа разрезания:

 одноточечное (если грань имеет только одну точку невыпуклости), рис. 3а;

 многоточечное (если грань имеет несколько непоследовательных точек невыпуклости), рис. 3б;

 разрезание по секторам (если грань имеет несколько последовательных точек невыпуклости), рис. 3в. направлению нормали N и вычисляем к ним нормали (N_1, N_2) (рис. 4);



Рис. 4. Трансляцияребра по направлению нормали к грани

3.
$$\alpha = \begin{cases} a\cos\left(-\left(\vec{N}_{1},\vec{N}_{2}\right)\right), ecли\left[N,\left(\vec{N}_{1},\vec{N}_{2}\right)\right] \\ 2\pi - a\cos\left(-\left(\vec{N}_{1},\vec{N}_{2}\right)\right), ecли\left[N,\left(\vec{N}_{1},\vec{N}_{2}\right)\right] \end{cases}$$
(1)

При $\alpha \ge \pi$ грань считается выпуклой в узле, а при $\alpha < \pi$ – невыпуклой[6].

Одноточечное разрезание грани

С помощью графовых алгоритмов находятся все возможные варианты разрезания грани. Из полученных вариантов убираем комбинации, содержащие невыпуклые полигоны и полигоны, имеющие площадь меньше 10⁻¹⁰. Из оставшихся вариантов выбираем комбинацию с минимальным соотношением периметров (рис. 5).



Рис. 5. Результат работы одноточечного метода разрезания



Рис. 3. Примеры типов разрезаний: а – одноточечное разрезание, б – многоточечное разрезание, в – разрезание по секторам

Рассмотрим эти этапы подробнее.

Определение точек невыпуклости

1. Определяется базовая нормаль N к грани в рассматриваемом узле по методу Ньюэлла [5];

2. Для каждого ребра грани последовательно формируем временные грани трансляцией ребер по

Многоточечное разрезание грани

1. Ищем ближайшие особые точки по и против обхода часовой стрелки (рис. 6);

2. Вычисляем метрики для потенциальных граней 1-2-3-4 и 1-6-7по формуле:

$$M = N_{y_{3,706}} + \frac{L}{P}, \qquad (2)$$

где $N_{y_{3706}}$ – количество узлов новой грани, не лежащих на одной прямой; L – длина нового ребра отрезаемой части; P – периметр отрезаемой части.



Рис. 6. Пример многоточечного разрезания

3. Выбираем грань 1-2-3-4, подходящую под следующие условия (рис. 7):

 все узлы новой грани лежат по одну сторону от нового ребра;

– метрика минимальна.



Рис. 7. Результат работы многоточечного метода разрезания

Разрезание грани по секторам

Сектор разреза определяется пересечением положительных полупространств, разделяемых плоскостями, построенными по точкам: СР (текущая точка), NP (следующая по часовой стрелке точка), PP (точка против часовой стрелки). На рис. 8 показан сектор разреза, принадлежащий грани.



Рис. 8. Пример построения сектора разреза

Затем определяем узлы грани, попавшие в сектор разреза, и выбираем оптимальный следующим образом:

 если в сектор разреза не попал ни один узел грани, то берем ближайший узел по обходу;

2) если попал один узел, то берем его;

3) если в сектор разреза попало несколько узлов, последовательно соединяем узел СР с каждым из найденных узлов. Для каждого полученного многоугольника вычисляем метрику М и проверяем: все узлы новой грани лежат по одну сторону от нового ребра. Определяем многоугольник, для которого метрика минимальна (рис. 9).

Метрика определяется по формуле:

$$M = K_{square} + K_{nodes} + K_{concave}, \qquad (3)$$

Коэффициент площади:

$$K_{square} = \left| S_{loc} - \frac{S_{face}}{N_{SP} + 1} \right| \cdot \frac{1}{S_{face}}, \qquad (4)$$

где S_{loc} – площадь новой грани; S_{face} – площадь исходной грани; N_{SP} – количество особых точек в исходной грани.

Коэффициент узлов:

0, количество узлов новой грани равно 4,

$$K_{nodes} = \begin{cases} 0, 5, & \text{количество узлов новой грани равно3,} \\ 10, & \text{иначе.} \end{cases}$$
(5)

Коэффициент выпуклости:

$$K_{concave} = \begin{cases} 0, грань выпуклая, \\ 100, грань невыпуклая. \end{cases}$$
(6)



Рис. 9. Результат работы разрезания по секторам

Разрезание невыпуклых ячеек

В процессе проведения операции отсечения, могут возникать ситуации, при которых получаются невыпуклые ячейки. В версиях генератора 5.0 и ранее использовался метод разрезания ячейки по биссектрисе угла двух внешних граней, образующих невыпуклость, но в процессе использования данного метода были выявлены недостатки. Например, разрезание в ряде случаев проводилось не оптимально с точки зрения распределения объемов между новыми ячейками, также появлялись дополнительные ребра малой длины. Было предложено модернизировать метод разрезания ячейки, исходя из условий минимизации добавления новых узлов в сетку и оптимизации распределения объемов между новыми ячейками. Модификация метода разрезания в основном заключалась в быстромпоиске наиболее оптимальной плоскости разреза, в притягивании «близких» к данной плоскости узлов, в адаптации существующих функций и итерационному разрезанию ячейки другими вариантами плоскостей в случае получения на предыдущей итерации ячеек неудовлетворительного качества.

Согласно формуле (1), описанной в разделе разрезания грани, проводим поиск ребер невыпуклости. Поиск потенциальных плоскостей разрезания, проходящих через ребра, осуществляется:

по биссектрисе двух внешних граней;

 по двум плоскостям граней, образующих ребро невыпуклости.

Процесс разрезания невыпуклых многогранных ячеек можно разделить на 3 основныхшага:

 классификация узлов и граней ячейки относительно режущей плоскости.

 оценка предварительного качества ячеек и выбор варианта оптимального разрезания.

3) построение новых ячеек.

Далее подробно рассмотрим эти шаги.

1. Классификация узлов и граней ячейки.

Классификация узлов и граней ячейки относительно режущей плоскостипроводится по следующим типам:

- принадлежит плоскости разреза;

 в положительном полупространстве относительно плоскости разреза (далее «выше» плоскости разреза);

– в отрицательном полупространстве относительно плоскости разреза (далее «ниже» плоскости разреза).

Для грани дополнительно определяется, пересекает ли грань плоскость разреза.

Перед тем, как определить к какому типу относится грань, требуется классифицировать все ее узлы. На рис. 10 представлен пример классификации узлов относительно режущей плоскости. Узел 8 примет тип«ниже» плоскости, а узел 12 – «выше» плоскости.

Чтобы минимизировать количество новых узлов при разрезании, и как следствие количество новых граней и ячеек, реализовано изменение положения режущей плоскости путем добавления близких к ней узлов, имеющихся в ячейке. Таким образом, узел 12 изменит тип на «принадлежит плоскости разреза» (т. к. расстояние между точкой разреза и узлом меньше 1/10 от длины ребра [8, 12]).



Рис. 10. Классификация узлов относительно режущей плоскости

В зависимости от того, как классифицированы узлы грани, грань принимает тип:

принадлежит плоскости разреза (например, грань 1 на рис. 11);

- «выше» плоскости разреза (грань 2);
- «ниже» плоскости разреза (грань 7);
- пересекает плоскость разреза (грань 6).



Рис. 11. Классификация граней относительно режущей плоскости

2. Оценка предварительного качества ячеек.

Чтобы выбрать оптимальный вариант разрезания, необходимо провести предварительную оценку качества потенциальных ячеек.

На первом этапе происходит оценка отклонения грани разреза от плоскости, полученного в результате притягивания узлов к плоскости сечения. Для этого для всех узлов, имеющих тип «на плоскости разреза», считаем расстояние до плоскости разреза (исключение составляют узлы, лежащие на ребре невыпуклости, а также узлы грани, если плоскость разреза строилась по грани, образующей ребро невыпуклости) (рис. 12).



Рис. 12. Грань разреза, состоящая из узлов 1, 2, 3, 4, 5, 6

Вычисляем отклонение узлов от плоскости разреза следующим образом:

 находим узел с наибольшим положительным и отрицательным отклонением от плоскости разреза (узел 3 и узел 6 на рис. 13);.

2) вычисляем нормали к плоскостям по трем точкам – узлы ребра невыпуклости и узлы с максимальным отклонением (1, 2, 3 и 2, 1, 6 на рис. 13);.

 если угол между этими нормалями меньше 150°, то узлы грани считаются сильно отклоненными от плоскости. Поэтому меняем признак узла с максимальным отклонением на «выше» или «ниже» плоскости разреза в зависимости от знака.



Рис. 13. Вычисление отклонения грани от плоскости

На втором этапе вычисляем коэффициент качества ячеек по формуле:

$$K = 1 - \frac{N_{\Pi Y}}{N_{\Pi \Gamma}} + \frac{S_1}{S_2},$$
 (7)

где $N_{\Pi Y}$ – количество притянутыхузлов; $N_{\Pi \Gamma}$ – количество порезанных граней; S_1 , S_2 – площади неразрезанных граней, лежащих выше и ниже плоскости разреза.

В качестве плоскости разреза выбирается плоскость с наибольшим значением коэффициента качества.

3. Построение новых ячеек.

На первом этапе сортируем грани ячейки по корзинам «выше» и «ниже» плоскости разреза. Если грань принадлежит плоскости разреза, то она добавляется в противоположный список от грани, соседней с ней по ребру невыпуклости.

Проводим разрезание граней, которые пересекаются с плоскостью разреза. Разрезание грани состоит из следующих шагов:

поиск точек пересечения плоскости разреза с ребрами грани;

- упорядочиваем точки;
- формируем новые ребра;
- строим новые грани.

Перед этапом непосредственного построения новых ячеек запоминаем прежние состояния граней (номера разделяемых ячеек, список узлов).Новые ячейки формируются из граней, находящихся в разных корзинах. При разрезании ячейки в каждом из полупространств может быть сформировано несколько ячеек.

В случае получения после разрезания неудовлетворительной по качеству ячейки (большое соотношение объемов с соседями, наличие свободных ребер, отрицательный объем одной из новых ячеек), ячейка возвращается в исходное состояние и выбирается следующий по метрике вариант разрезания. Если ни одним из вариантов разрезаний невозможно получить удовлетворительные ячейки, производится полный откат до исходного состояния сетки.

На рис. 14–15 приведены примеры отсеченных ячеек сетки без разрезаний и с разрезаниями.



Рис. 14. Отсеченная невыпуклая ячейка и совокупность ячеек после разрезания на модели «Самолет»



Рис. 15. Отсеченная невыпуклая ячейка и совокупность ячеек после разрезания на модели «Здание»

	«Здание»		«Самолет»		
	Число ячеек - 3660 т	ъю.	Число ячеек 2235 тыс.		
	Число граней - 1174	б тыс.	Число граней - 7253тыс		
	Количество невы-	Количество невы-	Количество невыпук-	Количество невы-	
	пуклых граней тыс.	пуклых ячеек тыс.	лых граней тыс.	пуклых ячеек тыс.	
Без разрезаний	4,159	39,636	5,822	10,402	
Разрезание ячеек по биссектри-					
се + одноточечное разрезание	0,442	5,868	0,800	5,765	
граней					
Разрезание ячеек					
по биссектрисе + модифициро-	0,387	5,871	0,439	5,922	
ванное разрезание граней					
Модифицированное разрезание					
ячеек + одноточечное разрезание	0,433	5,119	0,801	5,767	
граней					
Модифицированное разрезание					
ячеек + модифицированное	0,380	5,116	0,441	5,723	
разрезание граней					

Статистика по разрезанию граней и ячеек для моделей«Здание» и «Самолет»

В таблице приведена статистика по различным вариантам разрезания невыпуклых граней и ячеек для практических задач «Здание» и «Самолет».

Заключение

В рамках генератора объемных сеток методом отсечения проводится работа по улучшению качества построенных расчетных сеток. В данном докладе были описаны модифицированные методы разрезания невыпуклых граней и ячеек. Приведена статистика по различным вариантам разрезания граней и ячеек для практических задач. При разрезании невыпуклых элементов данными методами видно, что статистика по качеству улучшилась, но будут проводиться работы по дальнейшей оптимизации.

Литература

1. Козелков А.С., Дерюгин Ю.Н., Зеленский Д.К. и др. Многофункциональный пакет про-

грамм ЛОГОС для расчета задач гидродинамики и тепломассопереноса на супер-ЭВМ: базовые технологии и алгоритмы // Труды XII Международного семинара «Супервычисления и математическое моделирование» / Под ред. Р. М. Шагалиева – Саров: ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2011. С. 215–230.

2. Фархутдинов В. Ф., Тарасов В. И., Соловьев А. Н., Борисенко О. Н., Смолкина Д. Н., Кузьменко М. В. и др. Обзор возможностей по обработке геометрических и построению сеточных моделей в ЛОГОС.Препост // Труды XIV Международной конференции «Супервычисления и математическое моделирование». 2013. С. 585–592.

3. Avis D., Toussaint G. An efficient algorithm for decomposing a polygon into star-shaped polygons, 1999.

4. Dawei R., Yanpeng L. Algorithm of decomposing arbitrary polyhedrons into convex pieces, 2012.

5. J.owen S. Non-simplical unstructured mesh generation U.S.A, 1999.

6. Хилл Ф.OpenGL. Программирование компьютерной графики. Для профессионалов. СПб.: Питер, 2002. С. 355–357.

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ЛУЧИСТОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МЕТОДОМ СГЛАЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

<u>А. А. Лазарев¹</u>, С. Н. Полищук², Б. П. Тихомиров²

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

Метод сглаженных частиц SPH был предложен в 1977 году независимо Люси [1] и Джинголдоном и Моноганом [2] и получил практическое применение при решении широкого класса задач. Настоящая работа посвящена численному решению уравнения лучистой теплопроводности. При аппроксимации уравнения используется неявная схема. В работе рассмотрены алгоритмы реализации граничных условий. На примере ряда тестовых задач, имеющих аналитические решения, проведены результаты двумерных и трехмерных расчетов при варьировании числа частиц и радиуса сглаживания.

Расчеты проводились в рамках комплекса МРС [3], предназначенного для решения двумерных и трехмерных задач газовой динамики с теплопроводностью.

1. Постановка задачи

Рассматривается процесс распространения излучения в ограниченной области Ω . Уравнение теплопроводности, описывающее данный процессв лучистом приближении, имеет следующий вид:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{1}{\rho} div \overrightarrow{q} = Q, \qquad (1)$$

$$\vec{q} = -\chi \operatorname{grad} T$$
 (2)

Здесь ε – удельная внутренняя энергия, t – время, ρ – плотность, \vec{q} – вектор теплового потока, T – температура, Q – тепловой источник, χ – коэффициент теплопроводности, который вычисляется по формуле:

$$\chi = \frac{4}{3}c\sigma\ell T^3,$$

где c – скорость света, σ – постоянная Стефана-Больцмана, ℓ – эффективный пробег излучения.

Дивергенция теплового потока \vec{q} для трехмерного течения в декартовой системе координат имеет следующий вид:

$$\overrightarrow{div q} = -\left(\frac{\partial}{\partial x}\left(\chi\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\chi\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\chi\frac{\partial T}{\partial z}\right)\right).$$

Для двумерного плоского ($\nu = 0$) и осесимметричного ($\nu = 1$) течения (2) запишется в виде:

$$div \overrightarrow{q} = -\left(\frac{\partial}{\partial x}\left(\chi \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{1}{y^{\mathrm{v}}} \frac{\partial}{\partial y}\left(y^{\mathrm{v}}\chi \frac{\partial T}{\partial y}\right)\right),$$

где (x, y) – соответственно декартовые или цилиндрические (x – ось симметрии) координаты точки.

Уравнение (1) дополняется соотношениями:

$$\varepsilon = \varepsilon(\rho, T),$$

 $\chi = \chi(\rho, T)$ или $l = l(\rho, T).$

На границах области Ω заданы следующие условия:

• Температура $T_G(t, \vec{r})$:

$$T\big|_{\partial\Omega} = T_G \,; \tag{3}$$

• Поток $q_G(t, \vec{r})$:

$$\left(\vec{q}\cdot\vec{n}\right)\Big|_{\partial\Omega} = q_G\,,\tag{4}$$

где *n* – единичный вектор нормали к границе области; • условие симметрии.

2. Метод сглаженных частиц

Метод сглаженных частиц основан на интерполяции величин, определенных в заданных точках пространства. Сплошная среда заменяется дискретной системой расположенных в пространстве частиц. Уравнения сплошной среды записываются для каждой частицы, взаимодействующей с остальными частицами пространства.

Значение расчетной величины и ее градиента в методе SPH вычисляются по формулам:

$$\langle f(\vec{r}) \rangle = \sum_{j} \frac{m_{j}}{\rho(\vec{r}_{j})} f(\vec{r}_{j}) W(\vec{r} - \vec{r}_{j}, h).$$

$$\left\langle grad f\left(\vec{r}\right) \right\rangle = \sum_{j} \frac{m_{j}}{\rho\left(\vec{r}_{j}\right)} f\left(\vec{r}_{j}\right) grad W\left(\vec{r} - \vec{r}_{j}, h\right),$$
 (5)

где

grad $W(\vec{r}-\vec{r}_j,h) = W'(\vec{r}-\vec{r}_j,h) \frac{\vec{r}-\vec{r}_j}{\left|\vec{r}-\vec{r}_j\right|},$

 $W(\vec{r}-\vec{r}',h)$ – сглаживающая функция (ядро).

3. Дискретизация уравнения

Уравнение теплопроводности (1) для частицы с номером *i* в трехмерном случае имеет следующий вид:

$$\frac{d\varepsilon_i}{dt} + \frac{1}{\rho_i} div \ \vec{q}_i = Q_i \ .$$

По формуле (5) запишем дискретизацию дивергенции вектора теплового потока:

$$div \, \vec{q}_i = \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} \, \vec{q}_j \, grad \, W_{ij} \cong 2 \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} \, \vec{q}_{ij} \, grad \, W_{ij},$$

где поток $\vec{q}_{ij} = \frac{1}{2} (\vec{q}_i + \vec{q}_j)$ вычисляется в точ-

ке
$$\vec{r}_{ij} = \frac{1}{2}(\vec{r}_i + \vec{r}_j)$$
.

Тогда уравнение перепишется в виде [4, 5]:

$$\frac{d\varepsilon_i}{dt} - 2\sum_j \frac{m_j}{\rho_i \rho_j} \chi_{ij} W'_{ij} \frac{T_i - T_j}{\left|\vec{r}_i - \vec{r}_j\right|} = Q_i , \qquad (6)$$

где $W'_{ij} = W'_{ij}(\vec{r}_i - \vec{r}_j, h_{ij}), \ h_{ij} = \alpha (h_i + h_j), \alpha = \frac{1}{2}.$

Используя аналогичные рассуждения, дискретный аналог уравнения теплопроводности для двумерного плоского и осесимметричного случая можно записать в следующем виде:

$$\frac{d\varepsilon_i}{dt} - 2\sum_j \left(\frac{1}{2\pi} \left(\frac{y_{ij}}{y_i y_j}\right)\right)^{\nu} \frac{m_j}{\rho_i \rho_j} \chi_{ij} W_{ij}^{'} \frac{T_i - T_j}{\left|\vec{r}_i - \vec{r}_j\right|} = Q_i, \quad (7)$$

где $y_{ij} = \frac{1}{2} \left(y_i + y_j\right).$

3.1. Усреднение коэффициента теплопроводности

Коэффициент теплопроводности χ_{ij} на границе

взаимодействия частиц можно вычислить различными способами [6, 7], в частности:

1) арифметическое усреднение:

$$\chi_{ij} = \frac{1}{2} \Big(\chi_i(\rho_i, T_i) + \chi_j(\rho_j, T_j) \Big); \tag{8}$$

2) одна из модификаций гармонического усреднения:

$$\chi_{ij} = \frac{\left(\chi_i(\rho_i, T_i) + \chi_i(\rho_i, T_{ij})\right) \times}{\left(\chi_i(\rho_i, T_i) + \chi_i(\rho_i, T_{ij})\right) +},$$

$$\frac{\times \left(\chi_j(\rho_j, T_j)\right) + \left(\chi_j(\rho_j, T_{ij})\right)}{+ \left(\chi_j(\rho_j, T_j)\right) + \left(\chi_j(\rho_j, T_{ij})\right)},$$
(9)

где $T_{ij} = 0,5 (T_i + T_j).$

3.2. Неявная схема

Аппроксимируя уравнение (6) по неявной разностной схеме можно получить:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_i^{n+1} - \varepsilon_i^n \end{pmatrix} = 2\tau \sum_j \frac{m_j}{\rho_i \rho_j} \times \\ \times \chi_{ij} W'_{ij} \frac{T_i^{n+1} - T_j^{n+1}}{\left| \vec{r}_i - \vec{r}_j \right|} + \tau Q_i^n$$
(10)

Система уравнений (10) записана относительно двух неизвестных: удельной внутренней энергии ε^{n+1} и температуры T^{n+1} на слое по времени с номером (n+1). Для решения системы линеаризуем ее по Ньютону (γ – номер итерации):

$$\begin{split} \left(\varepsilon_{i}^{\gamma+1} - \varepsilon_{i}^{n}\right) &= 2\tau \sum_{j} \frac{m_{j}}{\rho_{i}\rho_{j}} \chi_{ij}^{\gamma} W'_{ij} \times \\ &\times \frac{T_{i}^{\gamma+1} - T_{j}^{\gamma+1}}{\left|\vec{r_{i}} - \vec{r_{j}}\right|} + \tau Q_{i}^{n} \end{split}$$
(11)
$$\begin{split} \varepsilon_{i}^{\gamma+1} &= \varepsilon_{i}^{\gamma} + \frac{\partial \varepsilon}{\partial T} \bigg|_{i}^{\gamma} \left(T_{i}^{\gamma+1} - T_{i}^{\gamma}\right) \\ \varepsilon_{i}^{\gamma} \bigg|_{\gamma=0} &= \varepsilon_{i}^{n}, \quad T_{i}^{\gamma} \bigg|_{\gamma=0} = T_{i}^{n} \end{split}$$
(12)

Завершение итерационного процесса выполняется при удовлетворении по всем *i* следующего неравенства:

$$\left|T_{i}^{\gamma+1}-T_{i}^{\gamma}\right| < \varepsilon_{omH} \left|T_{i}^{\gamma}\right| + \varepsilon_{a\delta c}$$

где ε_{omh} и ε_{abc} – значения соответственно относительной и абсолютной погрешностей.

Коэффициент теплопроводности χ^{γ} можно пересчитывать только на нескольких первых итерациях, остальные итерации проводятся при «замороженном» коэффициенте теплопроводности.

3.3. Реализация граничных условий

При реализации граничных условий используются «зеркальные» частицы, которые формируются посредством отражения ближайших счетных частиц от границы расчетной области.

Слагаемое, отвечающее за взаимодействие счетной частицы с номером i и «зеркальной» с номером j, согласно (11), имеет вид:

$$2\tau \frac{m_j}{\rho_i \rho_j} \tilde{\chi}_{ij}^{\gamma} W'_{ij} \frac{T_i^{\gamma+1} - T_j^{\gamma+1}}{\left|\vec{r}_i - \vec{r}_j\right|}.$$

Рассмотрим вид данного слагаемого для следующих граничных условий:

• Заданная температура. Значение температуры частицы с номером j заменяется на заданное значение температуры на границе T_G (3):

$$2\tau \frac{m_j}{\rho_i \rho_j} \tilde{\chi}_{ij}^{\gamma} W'_{ij} \frac{T_i^{\gamma+1} - T_G}{\left| \vec{r}_i - \vec{r}_j \right|} \,.$$

• Заданный поток. Вместо аппроксимации потока задается его значение q_G (4):

$$2\tau \frac{m_j}{\rho_i \rho_j} W'_{ij} q_G$$

• Симметрия. Значение температуры частицы с номером j заменяется на значение температуры ее счетного зеркального родителя j^* :

$$2\tau \frac{m_j}{\rho_i \rho_j} \tilde{\chi}_{ij}^{\gamma} W'_{ij} \frac{T_i^{\gamma+1} - T_{j*}^{\gamma+1}}{\left|\vec{r_i} - \vec{r_j}\right|} \,.$$

4. Численныерасчеты

При решении задач расстановка частиц в пространстве выполнялась равномерным образом. Радиус сглаживания частиц задавался постоянным и равным θd_0 , где θ – заданная константа, d_0 – начальное расстояние между частицами.

В качестве ядра используется сплайн третьей степени, значение производной по пространству для которого имеет следующий вид:

$$W'(\vec{r} - \vec{r}', h) = \frac{1}{N'} \begin{cases} -12R + 9R^2, & 0 < R < 1\\ -3(2 - R)^2, & 1 \le R < 2\\ 0, & R \ge 2 \end{cases}$$

где $N' = 2,8\pi h^3$ для двумерного случая, $N' = 4\pi h^4$ – для трехмерного случая.

Решение системы линейных алгебраических уравнений на каждой итерации по нелинейности находится с использованием библиотеки решателей LParSol [8]. Параметры сходимости итераций по нелинейности заданы равными $\varepsilon_{omh} = 10^{-4}$ и $\varepsilon_{a \delta c} = 10^{-8}$.

4.1. Распространение тепла от мгновенного точечного источника

Рассматривается задача распространения сферической тепловой волны от мгновенного точечного источника [9]. В начальный момент времени в точке r = 0 выделилась внутренняя энергия $\varepsilon = 10^5$. Уравнение состояния имеет следующий вид: $\varepsilon = c_v T$, $c_v = 1$, коэффициент теплопроводности задан формулой $\chi = T^{\sigma}$, $\sigma = 2$. Плотность среды $\rho = 1$.

Задача решалась в трехмерной постановке. Расчетная область представляет собой куб $-0,5 \le x, y, z \le 0,5$, в котором с равномерными шагами расстановки $d_0 = 0,015625$ (ансамбль № 1) и $d_0 = 0,078125$ (ансамбль № 2)размещены частицы. В частицах, попавших в сферу радиуса 0,015625, задана начальная внутренняя энергия 10^5 , в остальных частицах области внутренняя энергия равна нулю.

Расчеты проводились с усреднением коэффициента теплопроводности по формуле среднеарифметического усреднения (8). На рис. 1 и 2 приведены результаты расчетов с ансамблем частиц № 1 при $\theta = 1$; 1,5; 2. Из графиков видно, что на фронте тепловой волны при увеличении радиуса сглаживания наблюдается увеличение зоны размазывания. Погрешность при $\theta = 1$; 1,5 и 2 в точке инициализации источника составила соответственно 0,65 %, 0,26 % и 0,06 %.

На рис. 3 представлены результаты расчетов на сходимость при $\theta = 1$ с двумя ансамблями частиц. Погрешность в точке инициализации источника в расчете с ансамблем № 1 составила 0,34 %, с ансамблем № 2 – 0,2 %.



Рис. 1. Графики распределения температуры вдоль оси абсцисс



Рис. 2. Графики распределения температуры вдоль оси абсцисс в окрестности фронта волны



Рис. 3. Графики распределения температуры вдоль оси абсцисс при θ = 1 с различными расстановками частиц в двумерном расчете

4.2. Распространение тепла от постоянно действующего источника

Рассматривается задача распространения сферической тепловой волны от постоянного действующего источника $Q(t,T) = \frac{3}{2} \frac{T}{t}$.

Уравнение состояния имеет следующий вид: $\varepsilon = c_v T$, $c_v = 1$. Коэффициент теплопроводности $\chi = T^{\sigma}$, $\sigma = 4$. Плотность среды $\rho = 1$.

Задача решалась в двумерной осесимметричной и трехмерной постановках. Расчетная область по каждому координатному направлению задана в ин-

тервале [0; 2,5]. Частицы расставлены равномерным образом с шагом $d_0 = 0,05$. В частицах, расположенных внутри квадрата (куба) с размерами [0; 0,1], задана начальная температура T_0 , которая для двумерного случая равна 1,1629541, а для трехмерного случая равна 0,913382.

Расчеты проводились с начального момента времени 0,00697. Усреднение коэффициента теплопроводности выполнялось по формуле гармонического усреднения (9). Параметр θ задан равным 1.

На рис. 4 представлено распределение температуры на момент времени 1,5 в двумерном и трехмерном расчетах.



Рис. 4. Распределение температуры в двумерном и трехмерном расчетах

На рис. 5 показаны графики распределения температуры вдоль оси абсцисс в двумерном и трехмерном расчетах на момент времени 1,5. Из графиков видно хорошее согласие с аналитическим решением полученных численных решений. Погрешность в точке начальной инициализации источника в двумерном и трехмерном расчетах составила, соответственно, 0,19 % и 0,35 %.

4.3 Распространение тепловой волны в слоистой системе

Рассматривается плоская одномерная задача нагрева теплопроводного газа в слоистой системе: в первом слое [0,10] плотность $\rho=1$, коэффициент теплопроводности $\chi = BT^{\sigma}, B = 100, \sigma = 5$; во втором слое[10,10.6] – плотность $\rho = 20$, коэффициент теплопроводности $\chi = BT^{\sigma}, B = 5, \sigma = 5$. На левой границе задана температура $T(t) = \left(\frac{t}{20}\right)^{0,2}$, на правой – поток тепла равен нулю. Задача считалась в двумерной плоской постановке. Размеры расчетной области по оси абсцисс заданы равными [0; 10,6], вдоль оси ординат– [0; 0,1]. В первомслое системы расстояние между частицами $d_0 = 0.02$, а во втором $d_0 = 0.01$.

Усреднение коэффициента теплопроводности в расчетах выполнялось по формуле гармонического усреднения (9). Параметр θ задан равным 1,5.

На рисунке 6 показаны распределения температуры вдоль оси абсцисс, полученные в расчетах с «заморозкой» коэффициента теплопроводности после первых двух итераций [10] по нелинейности и без его «заморозки», на момент времени 20.Из приведенного графика видно хорошее согласие численных решений. Отличие расчетных профилей температуры в численных расчетах не превышает 10^{-4} %. Максимальное отличие от аналитического решения не превышает 0,02 %.



Рис. 5. Графики температуры вдоль оси абсцисс в двумерном и трехмерном расчетах



Рис. 6. Графики распределения температуры вдоль оси абсцисс в двумерных расчетах с «заморозкой» после первых двух итераций и без «заморозки» коэффициента теплопроводности

Заключение

Представленный численный алгоритм решения уравнения лучистой теплопроводности методом SPH был опробован на решении тестовых задач в двумерной и трехмерной постановках. Во всех задачах получено хорошее согласие результатов численных расчетов и аналитических решений. В первой задаче продемонстрирована сходимость численных решений по числу частиц, и показано, что на фронте тепловой волны при увеличении радиуса сглаживания наблюдается увеличение зоны размазывания, что хорошо согласует с теорией метода сглаженных частиц. Во второй задаче получено хорошее согласие численных решений задач в двумерной и трехмерной постановках. В третьей задаче показано, что численное решение с «замороженным» коэффициентом теплопроводности сопоставимо по точности с решением без «заморозки».

Литература

1. Lucy L. A numerical approach to the testing of the fission hepothesis // Astronom. J. 1977. Vol. 82 P. 1013.

2. Gingold R. A., Monaghan J. J. Smoothed Particle Hydrodynamics: theory and application to nonspherical stars // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1977. Vol. 181. P. 375–389.

3. Дерюгин Ю. Н., Полищук С. Н., Тихомиров Б. П.Расчет лучистой теплопроводности в методике МРСс использованием неточных методов Ньютона. Тезисы XV Международной конференции «Супервычисления и математическое моделирование», С. 58–59. – Саров, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2014.

4. Brookshaw L. A method of calculating radiative heat diffusion in particle simulations // Proc. ASA 6 (2), 1986. P. 207–210.

5. Cleary P. W., Monaghan J. J. Conduction modelling using smoothed particle hydrodynamics // Journal of Computational Physics 148, 1999. P. 227–264.

6. Авдошина Е. В., Бондаренко Ю. А., Горбунов А. А., Дмитриева Ю. С., Наумов А. О., Проневич С. Н., Рудько Н. М., Тихомиров Б. П. Исследование точности различных методов усреднения коэффициента теплопроводности на стороне ячейки интегрирования при численном решении уравнения теплопроводности. // ВАНТ, сер. Математическое моделирование физических процессов. 2014. Вып. 3 С. 32–46.

7. Дмитриев Н. А., Софронов И. Д., Тихомиров Б. П. Методика расчета одномерных многообластных задач высокотемпературной газовой динамики // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Методики и программы численного решения задач математической физики. 1983. Вып. 3. С. 3–8.

8. Бартенев Ю. Г., Ерзунов В. А., Карпов А. П., Петров Д. А., Пищулин И. А., Стаканов А. Н., Щаникова Е. Б., Капорин И. Е., Милюкова О. Ю., Харченко С. А., Коньшин И. Н., Сысоев А. В., Мееров И. Б. Комплекс библиотек параллельных решателей СЛАУ LParSol версии 3: в сб. докладов XIV международной конференции «Высокопроизводительные параллельные вычисления на кластерных системах». ПНИПУ, Пермь, 2014. С. 49–53.

9. Зельдович Ю. П., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. – М.: Наука, 1966. С. 519–523.

10. Бондаренко Ю. А., Горбунов А. А. Практические условия устойчивости для счета тепловых волн в неявных разностных схемах. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2008. Вып. 4. С. 3–12.
ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ТРИАНГУЛЯЦИОННЫХ СЕТОК НА ПОВЕРХНОСТЯХ В АНАЛИТИЧЕСКОМ И ФАСЕТОЧНОМ ПРЕДСТАВЛЕНИИ

<u>А. Н. Лукичев</u>, Т. В. Цалко, Д. М. Панкратов, Д. В. Логинов, А. И. Белова, Е. О. Моськина

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

Введение

В наше время в России, как и во всем мире, активно развиваются технологии компьютерного моделирования. Одна из задач, с которой часто сталкиваются при решении данного вопроса – дискретизация поверхностей трехмерного тела, то есть описание поверхности тела множеством простейших элементов. В этом докладе рассматриваются некоторые проблемы, связанные с особенностями представления геометрии моделируемых тел, с которыми придется столкнуться при решении данной задачи, на примере построения поверхностных триангуляционных сеток. Однако аналогичные проблемы ожидают и при построении других типов сеток, использующих геометрическую модель тела.

Поверхностные триангуляционные сетки

Поверхностная триангуляционная сетка – это дискретное представление поверхности трехмерного тела с помощью набора связанных треугольников. Говоря о триангуляционной сетке, будем предполагать наличие дополнительных требований со стороны методики моделирования и генераторов объемных сеток:

 триангуляционная сетка должна полностью описывать поверхность тела с заданной точностью.
 Отклонение от геометрии больше заданной точности может негативно повлиять на достоверность расчетов;

 размер элементов должен соответствовать заданным пользователем параметрам;

 качество треугольников определяется соотношением длин сторон. При построении сетки требуется увеличивать минимальный угол всех треугольников сетки. Равносторонний треугольник обладает максимальным качеством;

 соотношение площадей соседних треугольников не должно превышать заданного порога.

 недопустимо наличие пересечений, наложений, вырожденных элементов;

 недопустимо наличие «дыр» (треугольников, не имеющих соседей по одному или нескольким ребрам), если этого не предусматривает геометрия.

В рамках данного доклада мы не будем рассматривать сложные случаи с различными параметрами, предполагая, что размер элемента – один на всю геометрию, а показатели качества и соотношение площадей – по возможности наиболее оптимальные. Задача построения триангуляционной сетки существует уже давно, и существует множество алгоритмов построения оптимальной по тем или иным критериям триангуляции на плоскости, однако, построение оптимальной триангуляции трехмерных поверхностей в общем случае является нетривиальной задачей [1]. Будем предполагать задачу генерации 2D сетки решенной и сосредоточимся на проблемах получения качественной трехмерной поверхностной сетки.

Для описания геометрии моделируемого тела используются различные варианты представления. Рассмотрим наиболее популярные.

Аналитические поверхности

Аналитическое представление геометрии описывает тело с помощью математических формул и структур данных, представляющих вершины, ребра и грани геометрии. Чаще всего в качестве аналитического представления геометрии используется т. н. BREP [2] представление.

В ВREP (или В-гер) представлении трехмерное тело описывается набором замкнутых оболочек, разделяющих пространство на внешнее пространство и внутреннее по отношению к рассматриваемому предмету. Каждая оболочка состоит из набора граней. Грань – это поверхность, ограниченная набором ребер. Ребро – это кривая на поверхности или в пространстве, ограниченная двумя вершинами.

Поверхности и кривые при аналитическом представлении описываются с помощью математических формул. Чаще всего используется параметрический способ задания.

При параметрическом способе задания поверхность описывается в виде:

$$S = S(u, v), u, v \in \Omega, \qquad (1)$$

где
$$S = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$
 – точка поверхности, Ω – область оп-

ределения параметров, чаще всего – прямоугольная область $[u_{\min}, v_{\min}, u_{\max}, v_{\max}], u, v$ – координаты точки в этой области.

Каждой точке из области определения параметров соответствует точка на трехмерной поверхности. Таким образом, можно говорить о преобразовании двухмерной области в 3D, и S(u,v) является функцией преобразования.

При использовании данного представления геометрии очевидным алгоритмом построения трехмерной сетки является построение 2D сетки в области определения параметров и использование функции преобразования для получения трехмерных координат узлов сетки. Но проблемы построения поверхностных сеток заключаются в некоторых важных особенностях параметрического представления поверхностей:

• Преобразование S(u, v) не гарантирует сохранение углов, пропорций, и, как следствие, может приводить к сильным искажениям любых фигур, построенных на плоскости.

• Обратное преобразование, восстанавливающее 2D координаты в параметрической области произвольной точки поверхности, в общем случае не является однозначным. Это значит, что одной точке поверхности может соответствовать несколько координат (u,v) в области определения параметров. Более того, в ряде случаев точке на поверхности будет соответствовать бесконечное множество точек на отрезке области определения параметров.

Далее рассмотрим основные проблемы, возникающие из-за данных особенностей и варианты их решения, используемые при генерации поверхностных сеток: искажение размеров, перекрытие, самопересечения, несогласованное разбиение границ, вырожденные элементы и совпадающие вершины.

Искажение размеров

Первая и наиболее важная проблема – искажение размеров при переходе на 3D поверхность. Представим ситуацию, когда мы имеем параметризацию сферы. Рассмотрим наиболее часто встречающийся случай описания сферы одной поверхностью и ребром, проходящим от одного полюса к другому (рис. 1).

Параметрическое уравнение сферы:



где
$$\theta \in [0, \pi]$$
 и $\phi \in [0, 2\pi]$.



Рис. 1. Сферическая поверхность в аналитическом представлении

Таким образом, область определения параметров представляет собой прямоугольник со следующими свойствами:

– отрезки $\theta = 0, \phi \in [0, 2\pi]$ и $\theta = \pi, \phi \in [0, 2\pi]$ соответствуют двум точкам – полюсам сферы;

– отрезки $\theta \in [0, \pi], \phi = 0$ и $\theta \in [0, \pi], \phi = 2\pi$ соответствуют одному отрезку на поверхности сферы, соединяющему полюса.

Представим, что мы, используя простейший алгоритм построения сетки в 2D области, строим равномерную сетку с фиксированным размером. При переводе результата в 3D мы увидим, что равномерный размер элементов в области определения параметров превратится в постепенное сгущение элементов к полюсам.

Для корректного распределения размеров элементов при построении сетки в 2D области используется метрический тензор или метрика, позволяющая при выборе положения новых точек в области определения параметров вычислять реальное расстояние до соседних точек в 3D. На рис. 2 изображена сетка, построенная с использованием метрического тензора.

Также метрический тензор используется для построения сетки с неравномерным распределением размеров элементов – когда требуется получить специфичные размеры элементов в тех или иных областях поверхности.



Рис. 2. Сетка, построенная с использованием метрического тензора

Перекрытия

Поскольку преобразование S(u,v) не является аффинным, некоторые элементы сетки при переходе в 3D могут оказаться вывернутыми. Особенно это касается элементов, близких к вырожденным элементам (рис. 3).



Рис. 3. Появление перекрытий при переходе от параметрической области к трехмерной поверхности

Во избежание подобных случаев используется дополнительный контроль расстояния и направления нормалей при генерации сетки. Кроме того, используется контроль качества, чтобы не допускать появления подобных элементов. В ряде случаев используется дополнительная обработка сетки и перекрытия исправляются уже после построения.

Самопересечения

Самопересечения поверхностной сетки возникают, когда две криволинейные поверхности находятся на достаточно близком расстоянии друг от друга. В качестве примера рассмотрим тонкостенный цилиндр, на котором были заданы достаточно крупные размеры элементов на боковых поверхностях (рис. 4). В результате построения, сетки на боковых поверхностях стали пересекаться.



Рис. 4. Самопересечение поверхностей на тонкостенном цилиндре

Во избежание подобных ситуаций используют следующие подходы:

 при построении сетки учитывается дополнительный параметр – отклонение элементов сетки от поверхности. Если данный параметр будет меньше минимального расстояния между поверхностями геометрии, подобной ситуации не возникнет;

 учет близости поверхностей. При генерации сетки в подобных областях размер элемента ограничивается в соответствии с расстоянием до ближайшей поверхности (рис. 5).



Рис. 5. Учет близости поверхностей при генерации сетки на тонкостенном цилиндре

Несогласованные разбиения границ

Рассмотрим пример со сферой. Если мы будем рассматривать параметрическую область независимо от соответствующей ей трехмерной поверхности, то возможно построение, при котором точки на ребрах $\varphi = 0$ и $\varphi = 2\pi$ не будут соответствовать друг другу, что приведет к ситуации, изображенной на рис. 6.



Рис. 6. Несогласованные границы на сфере

Таким образом, при генерации сетки на параметрической области дополнительно необходимо учитывать совпадения отображений ребер на трехмерную поверхность.

Вырожденные элементы, совпадающие вершины

Используя все тот же пример со сферой, можно заметить, что при переходе из 2D в 3D, совпали некоторые вершины и появился ряд вырожденных треугольников. Подобный результат также связан с особенностями представления геометрии, и его необходимо обрабатывать, вставляя дополнительный этап сшивки сетки и удаления вырожденных элементов.

Фасеточная геометрия

Фасеточная геометрия описывает поверхность тела с помощью набора треугольников таким образом, чтобы отклонение полученной поверхности от реальной (исходной) было не больше заданного значения. В качестве критерия оценки отклонения используются различные подходы: абсолютное – расстояние между поверхностями, относительное – отклонение от поверхности на единицу длины/площади, потеря объема, и т. д.

Преимущества фасеточного представления геометрии:

 простейший формат представления и хранения – для полного описания поверхности достаточно массива треугольников с координатами вершин (формат STL [3]);

 простые и быстрые алгоритмы по обработке данной геометрии: проекция точки на поверхность, поиск кратчайшего пути по поверхности, пересечение поверхностей, различные аффинные преобразования и т. д.

Недостатки:

 потеря точности: безвозвратное огрубление криволинейных поверхностей,

 в большинстве случаев – потеря или отсутствие информации о характерных элементах геометрии: ребер, граней, фрагментов. Необходимость ее восстановления.

Несмотря на недостатки, фасеточное представление геометрии незаменимо при решении множества практических задач:

 восстановление поверхностей тел по данным, полученным в результате сканирования реального объекта,

- построение оболочки для облака точек (частиц),

 обработка сложных геометрий в аналитическом представлении с множеством несшитых поверхностей, при наличии самопересечений и искажений, связанных с особенностями CAD системы и трансляторов.

Ключевые особенности фасеточной геометрии:

 в отличие от аналитического представления, фасеточная геометрия не имеет функции преобразования объектов из 3D в 2D пространство и обратно,

– возможно отсутствие информации о характерных элементах геометрии: ребрах, гранях, фрагментах.

Построение сетки на поверхности в фасеточном представлении часто включает в себя три этапа:

- восстановление информации о геометрии;

сегментация поверхности;

 отображение патчей (патч – односвязное подмножество треугольников) на плоскость.

Восстановление информации о геометрии

Поскольку часто фасеточная геометрия не содержит информации о ребрах, гранях, фрагментах описываемых тел, ее необходимо восстановить. Если этого не делать, возможны неприятные казусы, такие как сглаживание острых углов и ребер деталей либо пропадание технологических отверстий (рис. 7). Отсутствие информации о характерных ребрах геометрии может приводить к нежелательным отклонениям от поверхности.



Для восстановления информации об особенностях геометрии используют:

 полуавтоматический метод. Предоставляют пользователю возможность задания угла для выделения характерных особенностей геометрии и инструменты редактирования полученного набора,

 полностью автоматический метод. Выделение производится по набору внутренних параметров, с учетом кривизн, заданных размеров сетки и сложных алгоритмов автоматического выделения отдельных компонент детали.

Восстановление информации о геометрии тесно связано со следующей задачей: сегментация поверхности.

Сегментация поверхности

Изначально фасеточная геометрия представляет собой единый массив связанных между собой треугольников. Отображение всей поверхности на плоскость является чрезвычайно сложной задачей, требующей решения сложных задач оптимизации и развертки. Для упрощения задачи отображения необходимо произвести разделение поверхности на более простые наборы связанных треугольников (патчи), каждый из которых легко отображается на плоскость.

Ключевыми критериями в задаче сегментации поверхности являются:

- учет геометрических особенностей поверхности;

 возможность отображения патча на плоскость с учетом допустимых искажений.

Отображение патчей на плоскость

После сегментации поверхности должны быть получены патчи, гарантированно отображаемые на плоскость. Для отображения патча на плоскость необходимо отобразить узлы патча на плоскость таким образом, чтобы при сохранении связанности сетки ни один узел не попал внутрь треугольника, на ребро или другой узел сетки.

Критерии хорошего отображения патча на плоскость:

- отсутствие самопересечений.

- минимальное искажение треугольников.

Идеальным считается отображение, при котором сохраняются все длины сторон треугольников.

Далее на контуре патча в 2D строится сетка, с учетом операции отображения, искажающей размеры (подобно тому, как это делалось в случае с аналитическим представлением). Для отображения полученной сетки на поверхность используются барицентрические координаты новых узлов в треугольниках исходной сетки.

Далее рассмотрим некоторые сложности, с которыми придется столкнуться при построении сетки на фасеточной геометрии: кривизна дискретных поверхностей, зашумленность поверхности, низкое качество поверхности, ошибки в топологии и вырожденные элементы.

Кривизна дискретных поверхностей

На фасеточных поверхностях, как и на аналитических, также требуется учет кривизны для более точного описания геометрии. Однако в отличие от аналитических поверхностей, вычисление кривизны дискретных поверхностей является далеко не тривиальной задачей. Для ее решения используются различные методы аппроксимации поверхности, а также вычисление различных интегральных характеристик поверхности в каждой вершине и треугольнике [4] (рис. 8).



Рис. 8. Результат построения сетки с использованием кривизны поверхности

Зашумленность поверхности

Поскольку фасеточная геометрия может быть получена различными путями, возможно «зашумление» поверхности, что проявляется в виде неравномерного изменения направления нормалей треугольников на предположительно гладких поверхностях, что может привести к ошибкам во многих алгоритмах, таким как – неверное вычисление кривизн поверхности, ошибочное автоматическое выделение геометрических особенностей, и т. д. (рис. 9).



Рис. 9. Резкий уступ на гладкой поверхности

Низкое качество поверхности

Помимо зашумленности, поверхность часто содержит узкие вытянутые треугольники низкого качества (с длиной самой короткой стороны – на пределе точности геометрии), что накладывает повышенные требования к точности вычислений и учету возможной вычислительной погрешности (рис. 10).



Рис. 10. Узкие вытянутые треугольники – главная особенность всех фасеточных поверхностей

Ошибки в топологии, вырожденные элементы

И наконец, фасеточная геометрия может содержать большое количество топологических и геометрических ошибок (рис. 11), таких как:

 вырожденные элементы (треугольники нулевой площади);

- самопересечения;
- перекрытия;

 – «дыры» (отсутствие соседей у треугольников в местах, где предполагалась непрерывная поверхность).

Для того чтобы избежать ошибок, некорректной работы алгоритмов построения сетки и повысить качество результирующей сетки необходимо включать этап предварительного анализа и лечения геометрии.



Рис. 11. Вырожденные треугольники, перекрытия на стыке поверхностей

Заключение

В докладе были показаны далеко не все особенности, которые приходится учитывать при разработке генераторов поверхностных сеток, однако, целью данной работы было показать плюсы и минусы использования того или иного представления геометрии с точки зрения генерации сеток и того, с какими особенностями придется столкнуться при работе с тем или иным представлением.

Подводя итог, можно сказать, что:

 аналитическое представление позволяет более точно описывать геометрию моделируемого тела и в пределах точности геометрии увеличивать точность моделирования, однако, требует хорошей параметризации поверхностей, сильного упрощения модели и отсутствия геометрических ошибок.

 – фасеточное представление позволяет самостоятельно выделить характерные особенности геометрии, вычислить оптимальное отображение патчей на плоскость, уменьшая искажения, но вносит ограничения на увеличение точности моделирования, а также может содержать множество элементов низкого качества и «артефакты», требующих особой обработки и лечения.

Литература

1. Скворцов А. В. Обзор алгоритмов триангуляции Делоне // Вычислительные методы и программирование, 2002. Т. 3, С. 14-39. 2. Матвеев И., Игнатьев Ю., Микушин В. Построение согласованной триангуляции для b-гер моделей с параметрическим представлением поверхностей в системе 3DVision // Построение расчетных сеток: теория и приложения: сборник трудов. – М.: РАН Вычислительный центр, 2002.

3. The STL format // Режим доступа http://fabbers.com/tech/STL_Format, свободный.

4. Dyn N., Hormann K., Kim S., Levin D. Optimizing 3d triangulations using discrete curvature analysis / T. Lyche, L.L. Schumaker (Eds.) // Mathematical Methods in CAGD: Oslo 2000. Nashville, TN: Vanderbilt University Press, 2001. P. 135–146.

ОСОБЕННОСТИ ЭКРАНИРОВКИ МАКРОЗАРЯДОВ В КОМПЛЕКСНОЙ ПЛАЗМЕ

<u>И. А. Мартынова</u>, И. Л. Иосилевский, А. А. Шагайда

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

Введение

Проблема фазовых переходов в равновесной высоко-несимметричной комплексной плазме как системе макро- и микроионов изучается теоретически и экспериментально уже достаточно долгое время. Это сопровождается рассмотрением большого количества упрощенных моделей кулоновских систем. В данной работе рассматриваются равновесные электронейтральные двух- (+Z, -1), (-Z, +1) или трехкомпонентные (+Z, -1, +1), (-Z, -1, +1)высокоасимметричные системы классических макрои микроионов с фиксированными зарядовыми числами Z>>1. Таким образом, изучаются следующие идеализации моделей комплексной плазмы:

(A) – современная электроразрядная пылевая плазма, лишь частично равновесная, искусственно удерживаемая полем ловушки и, как правило, с раздельными температурами макроионов (T_z) и микроионов (электронов и положительных микроионов с температурами T_e и T_i соответственно) ($Z \sim 102-$ 103, $T_e \neq T_i \neq T_z$) [1];

(*B*) – термически ионизованная равновесная КДФ-плазма продуктов сгорания или плотных («капельных») насыщенных паров щелочных металлов, активно изучавшихся в конце 70-х и начале 80-х годов ($Z \approx \text{const}, Z \sim 10-103, T_e = T_z$) [2];

(C) – полностью равновесная коллоидная плазма высокозаряженных макромолекул в жидкой фазе при комнатных температурах ($T_e = T_i = T_z$) (см., напр., [3]);

(D) – полностью равновесная атмосферная пылевая плазма серебристых облаков (Z ~ 1–100) [4].

В качестве базовой модели для сравнения выбрана

(E) – однокомпонентная система зарядов Z с потенциалом Юкавы с фиксированным радиусом экранирования (см. [5]).

Общепринятым упрощением является переход от двух- и трехкомпонентной кулоновских систем с дальнодействующим кулоновским потенциалом взаимодействия, зависящим только от расстояния, к однокомпонентной системе макроионов с эффективным экранированным короткодействующим потенциалом в форме потенциала Юкавы. Здесь V_{ij} – кулоновский потенциал, Φ – потенциал Юкавы, r_D – дебаевский радиус, n_z – концентрация макроионов, n_e – концентрация электронов, n_i – концентрация положительных микроионов, a – радиус Вигнера-Зейтца.

$$V_{ij} = Z_i Z_j / r \tag{1}$$

$$\Phi(r|T_{e}, T_{i}, n_{e}, n_{i}) = \frac{(Ze)^{2}}{r} \exp(-r/r_{D})$$

$$r_{D} = \left(\frac{4\pi e^{2}n_{e}}{kT_{e}} + \frac{4\pi q_{i}^{2}n_{i}}{kT_{i}}\right)^{-1/2}, \quad (2)$$

Наиболее полной диаграммой, описывающей фазовые состояния классической равновесной системы с дебаевским потенциалом в форме потенциала Юкавы, является диаграмма, построенная в 1997 в работе [6] в переменных $\kappa - \Gamma$ (κ – структурный параметр, Γ – параметр неидеальности)

$$\kappa = \frac{a}{r_D}, \ \Gamma = \frac{(Ze)^2}{akT}, \ a = (3/4\pi n_Z)^{-1/3},$$
(3)

где *а* – радиус Вигнера-Зейтца, *г*_D – дебаевский радиус, *k* – константа Больцмана.

$$r_D = \left(\frac{e^2 n_i}{kT_i} + \frac{e^2 n_e}{kT_e}\right)^{-1/2}.$$
 (4)

Диаграмма получена методами прямого численного моделирования и содержит границы трех фазовых состояний дебаевской системы с дебаевским потенциалом: жидкость, кристалла bcc и кристалла fcc (см. рис. 5 в [6]).

Проблема термодинамической устойчивости

В настоящее время существует неопределенность в точном определении термодинамической роли фона микроионов среди различных групп авторов. Давление в работах [6–9] определяется через производную свободной энергии:

$$p = n_Z \left(\frac{\partial f}{\partial n_Z}\right)_T,\tag{5}$$

причем

$$p = \frac{PV}{N_Z k T_Z}, f = \frac{F}{N_Z k T_Z}, u = \frac{U}{N_Z k T_Z}.$$
 (6)

Введем обозначения: P_{tot} – полное давление в рассматриваемой системе, $P_{ideal} = n_z kT_z + n_e kT_e + n_i kT_i$, P_{ex} – неидеальная часть давления (так называемое избыточное давление), N_Z – число положительных макроионов, тогда

$$P_{tot} = P_{ideal} + P_{ex}.$$
 (7)

В настоящее время существует как минимум два варианта расчета Pex в многокомпонентной кулоновской системе [6-8] и [9]. В них различается понимание термодинамической роли фона (в [6-8] фон (т. е. микроионы) считается сжимаемым, а в [9] – нет. Хорошей моделью для сравнения является давно и хорошо изученная модель однокомпонентной плазмы ОСР на сжимаемом нейтрализующем фоне зарядов противоположного знака [5]. В работах [7] и [9] приведены графики зависимостей неидеальной части давления во флюиде от параметра Г при постоянных значениях к. Неожиданным является тот факт, что кривые не только при возрастании к расходятся от кривой ОСР у разных авторов в противоположные стороны, но и при $\kappa = 0$ не совпадают (см. [10])! Для более ясного понимания читателя следует отметить, что данные зависимости взяты непосредственно из статей [7, 9] и изображены в данной работе на одном графике вместе с аппроксимацией указанной зависимости для модели ОСР. Все это опять же приводит к мысли о различном определении термодинамической роли фона, а, следовательно, различном понимании понятия давления в системе.

При построении зависимостей неидеальной части давления во флюиде от параметра неидеальности Г, например, на границе плавления так же получается расхождение в значениях давления во флюиде на границе плавления [10]. Стоит отметить, что при $\Gamma = 175 \ (\kappa = 0)$ все три кривые не сходятся в одной точке, что еще раз подтверждает то, что у различных групп авторов нет единого понимания полного давления системы, что с большой долей вероятности вызвано различным пониманием термодинамической роли нейтрализующего фона. Более того, неидеальная часть давления принимает огромные отрицательные значения. Таким образом, полное давление во флюиде с ростом значения параметра Г становится отрицательным, а еще раньше становится отрицательной полная сжимаемость $\left(\partial P_{fluid} / \partial n\right)_T$ [11]!

Для Z = 1000:

$$\left(\partial P_{fluid} / \partial n\right)_T < 0$$
 при $\Gamma > 967 (\kappa > 2,76),$
 $P_{fluid} / n_z kT < 0$ при $\Gamma > 1295 (\kappa > 3,05).$

Здесь P_{fluid} – полное давление во флюиде. Если температуры макроионов и электронов разные ($T_e = 7$ эВ, $T_z = 1$ эВ), то тогда

$$\left(\partial P_{fluid} / \partial n\right)_T < 0$$
 при $\Gamma > 960 \ (\kappa > 2,78),$
 $P_{fluid} / n_z kT < 0$ при $\Gamma > 6352 \ (\kappa > 4,35).$

Таким образом, значительная часть диаграммы [6] лежит в области отрицательного давления и, что

еще более важно, в области отрицательной сжимаемости. Последнее, в частности, означает, что при использовании указанных уравнений состояния равновесная система не может существовать в однородном фазовом состоянии.

Можно предположить, что на диаграмме [6] недостает еще одного фазового перехода газ – жидкость и/или газ – кристалл. Это утверждение представляется весьма логичным, если вспомнить о системе высоко-заряженных макроионов и подвижных электронов, но уже не с дебаевским, а кулоновским потенциалом с твердой стенкой.

Электронейтральную высоко-асимметричную равновесную кулоновскую систему, состоящую из макроионов конечного размера и точечных микроионов можно рассматривать как простейшую модель комплексной плазмы. В работе [10] используется прямое численное моделирование методом Монте-Карло для описания именно такой системы. Там показано, что при достаточно низких температурах в рассматриваемой системе присутствует значительный скачок плотности на границе фазового перехода типа газ – жидкость и газ – кристалл (см. рис. 1 из [12]), поэтому вследствие фазового расслоения полная сжимаемость остается неотрицательной.

Нелинейное экранирование макроионов

Были проанализированы результаты работы [12], и сделан вывод, что дебаевский потенциал не всегда является адекватным для описания термодинамики двухкомпонентной кулоновской системы, т. к. экранирование перестает быть линейным при низких температурах. Расчеты предыдущего раздела были проведены в предположении справедливости дебаевского потенциала (как и в работе [6]), поэтому был обнаружен артефакт указанной модели с потенциалом Дебая, а именно отрицательная полная сжимаемость равновесной двухкомпонентной кулоновской системы.

Упомянутый выше эффект нелинейного экранирования следует учитывать уже при достаточно небольших значениях $Z (Ze^2/\sigma T \Box 1)$, т. е. уже при Z > 22 для частиц с диаметром $R_Z \sim 1$ мкм, T = 0.03 эВ.

Этот эффект ведет к перенормировке заряда макроионов, в результате которой получается так называемый меньший «видимый» заряд.

Для простоты рассмотрим систему (-Z, +1). Для того, чтобы рассчитать его, необходимо численно решить уравнение Пуассона в ячейке

$$\Delta \varphi = -\rho_0 / \varepsilon_0 \exp(-e\varphi/kT)$$
(8)

Пусть R – радиус ячейки, R_Z – радиус макроиона, ε_0 – диэлектрическая постоянная, ρ_0 – плотность положительных микроионов на границе ячейки, n_{i0} – концентрация положительных микроионов на границе ячейки. Система электронейтральна, т. е.

$$Ze = \int_{R_Z}^{R} 4\pi r^2 e n_{i0} \exp(-e\varphi/kT) dr .$$
 (9)

Для расчета электрического поля используем теорему Гаусса:

$$4\pi r^2 E(r) = \frac{1}{\varepsilon_0} q(r) , \qquad (10)$$

где q(r) – полный заряд внутри сферы радиуса r, E(r) – напряженность электрического поля. Получаем

$$E(r) = \frac{1}{4\pi r^2 \varepsilon_0} \times \left(Ze - \int_{R_Z}^r 4\pi r^2 e n_{i0} \exp(-e\varphi/kT) dr \right).$$
(11)

Из (9)

$$n_e = \frac{Z}{\prod_{\substack{j \in Z \\ R_Z}} 4\pi r^2 \exp(-e\varphi/kT)dr},$$
 (12)

тогда

$$E(r) = \frac{1}{4\pi r^2 \varepsilon_0} \times \left(\frac{Ze - \int_{R_Z}^{r} r^2 \exp(-e\varphi/kT) dr}{R_Z} \right)^{R_Z} e^{-e\varphi/kT} dr = 0.$$
(13)

Перейдем к безразмерным переменным. Потенциал будет иметь вид $\Phi = e\varphi/kT$, координата x = r/R, а электрическое поле $E = \frac{eR}{kT}E$. В этом случае

$$E(x) = \frac{Ze^2}{4\pi kT\varepsilon_0 R} \frac{1}{x^2} \times \left(1 - \int_{x_Z}^x x_1^2 \exp(-\Phi) dx_1 / \int_{x_Z}^1 x_2^2 \exp(-\Phi) dx_2\right), \quad (14)$$

где $x_Z = R_Z/R$. Введем безразмерный параметр

$$\delta^2 = \frac{3Ze^2}{4\pi k T \varepsilon_0 R} \,. \tag{15}$$

Далее численно решаем следующую систему уравнений в области $x \in [x_Z, 1]$:

$$\begin{cases} E(x) = \frac{\delta^2}{3x^2} \times \\ \times \left(1 - \int_{x_Z}^x x_1^2 \exp(-\Phi) dx_1 \right) / \int_{x_Z}^1 x_2^2 \exp(-\Phi) dx_2 \end{pmatrix}, (16) \\ \frac{d\Phi(x)}{dx} = -E(x). \end{cases}$$

Граничное условие $\Phi(1) = 0$. Распределение микроионов найдем следующим образом

$$n_{i0} = n_Z \frac{R^3}{\underset{R_Z}{3 \int \exp(\Phi(r))r^2 dr}}.$$
 (17)

Методом итераций подберем подходящий потенциал взаимодействия и распределение.

Также, было проведено сравнение полученного потенциала, во-первых, с тем, который формально получился бы при использовании условия линеаризации даже при низких температурах, а во-вторых, с потенциалом взаимодействия в ситуации, как если бы микроионы были распределены равномерно вокруг макроиона.

Получим потенциал в приближении LDH (linear Debye-Hückel) для системы (–*Z*, +1). Запишем уравнение Пуассона-Больцмана (в центре отрицательный макроион)

$$\Delta \varphi_{LDH}(r) = -4\pi e n_i(r) , \qquad (18)$$

где n_i – плотность положительных микроионов, и условие линеаризации

$$\Delta \varphi_{LDH}(r) = -4\pi e n_i(r) . \tag{19}$$

$$\Delta \varphi_{LDH}(r) = -4\pi e n_{i0} \left(1 - \frac{e \varphi_{LDH}(r)}{T} \right), \quad (20)$$

$$\Delta \phi_{LDH}(r) - \kappa_{LDH}^2 \phi_{LDH}(r) + 4\pi e n_{i0} = 0 , \quad (21)$$

где $\kappa_{LDH}^2 = \frac{4\pi n_{i0}e^2}{T}$.

Общий вид задачи (здесь C_1 , C_2 , C_3 , φ_1 , φ_2 – константы):

$$\varphi_{LDH}(r) = \begin{cases} C_1 r^2 + \varphi_1, & 0 < r < R_Z, \\ \frac{C_2 \exp(\kappa_{LDH} r) + C_3 \exp(-\kappa_{LDH} r)}{r} + \varphi_2, \\ R_Z < r < R, \\ 0, & r = R. \end{cases}$$
(22)

Решением при $R_Z < r < R$ является

$$\varphi_{LDH}(r) = \frac{C_2 \exp(\kappa_{LDH}r) + C_3 \exp(-\kappa_{LDH}r)}{r} + \frac{4\pi\rho_0}{\kappa_{LDH}^2}.$$
 (23)

Запишем граничные условия (ϕ_{in} – потенциал при $r \leq R$, ϕ_{mid} – потенциал при $R_Z \leq r \leq R$, ϕ_{out} – потенциал при $r \geq R$):

$$\begin{cases} \varphi_{in}(R_Z) = \varphi_{mid}(R_Z), \\ \varphi_{mid}(R) = \varphi_{out}(R) = 0, \\ \varphi'_{in}(R_Z) = \varphi'_{mid}(R_Z), \\ \varphi'_{mid}(R) = \varphi'_{out}(R) = 0. \end{cases}$$
(24)

$$Z = \int_{R_Z}^{R} 4\pi \rho_0 \left(1 - \frac{e\varphi_{LDH}(r)}{T} \right) r^2 dr - \text{условие электро-$$

нейтральности.

Итоговый вид потенциала:

$$\Phi_{LDH}(r) = \frac{e\varphi_{LDH}(r)}{T} = .(25)$$
$$= -\frac{\exp\left[\kappa(r-R)\right](\kappa R+1) + \exp\left[\kappa(R-r)\right](\kappa R-1)}{2\kappa r} + 1.$$

Теперь перейдем к искусственной ситуации равномерного распределения (uniform profile) микроионов вокруг макроиона. Найдем потенциал взаимодействия.

$$\varphi_{UP}(r) = \begin{cases} C_4 r^2 + \varphi_3, & 0 < r < R_Z, \\ C_4 r^2 + \frac{C_5}{r} + \varphi_4, & R_Z < r < R, \\ 0, & r = R. \end{cases}$$
(26)

Здесь *C*₄, *C*₅, ϕ_3 , ϕ_4 – константы. Опять приравняем потенциалы и напряженности на границе макроиона и ячейки. В результате потенциал будет иметь вид

$$\Phi_{UP}(r) = \frac{e\varphi_{UP}(r)}{T} = \frac{e^2}{T} \times \left(-\frac{Z}{2\left(R^3 - R_Z^3\right)}r^2 - \frac{ZR^3}{\left(R^3 - R_Z^3\right)}r + \frac{3ZR^2}{2\left(R^3 - R_Z^3\right)}\right).$$
 (27)

Пример зависимости безразмерных потенциалов от координаты представлены на рис. 1.



Рис. 1. Зависимость потенциала взаимодействия макроиона (с зарядом Ze и радиусом R_Z) с микроионом в ячейке радиуса R: 1 – численное решение уравнения Пуассона – Больцмана; 2 – аналитическое решение при формальном использовании условия линеаризации; 3 – аналитическое решение при искусственной ситуации, когда микроионы распределены равномерно; n_Z – плотность всех макроионов; T_i – температура микроионов

На рис. 2 изображен пример распределения микроионов в ячейке. Видно, что макроион сильно экранируется микроионами. Поэтому на больших расстояниях макрочастица воспринимается как несущая меньший, так называемый видимый, заряд.



Рис. 2. Распределение микроионов в ячейке, в центре которой находится макроион с зарядом Ze и радиусом R_Z:1 – распределение при потенциале взаимодействия, получаемым при решении уравнения Пуассона – Больцмана в ячейке; 2 – распределение, получаемое при формальном использовании условия линеаризации даже при низких температурах; 3 – искусственно удерживаемое однородное распределение микроионов

С учетом перенормировки зарядов можно перестроить фазовую диаграмму [6]. Параметр кулоновской неидеальности и структурный параметр будут выглядеть следующим образом:

$$\Gamma^{*} = \frac{Z^{*}}{Z} \Gamma, \quad \kappa^{*} = \frac{r_{D}^{lin}}{r_{D}^{*}} \kappa = \sqrt{\frac{n_{i0}^{*}}{n_{i0}^{lin}}} \kappa, \quad (28)$$

где n_{i0}^{lin} – концентрация микроионов на поверхности ячейки при использовании условия линеаризации, n_{i0}^{*} – концентрация микроионов на поверхности ячейки при решении уравнения Пуассона – Больцмана, Z – реальный заряд макроиона, Z* – его видимый заряд. В обоих случаях эту концентрацию можно найти из условия электронейтральности ячейки

$$n_{i0} = \frac{Z}{\prod_{\substack{l \in Z \\ R_Z}} 4\pi r^2 \exp(\Phi(r))}.$$
 (29)

Видимый заряд находится следующим образом:

$$Z^* = \int_{R_X}^{R} 4\pi r^2 \exp(\Phi(r)) dr, \qquad (30)$$

где R_x – расстояние, на котором перестает выполняться условие линеаризации $k_B T_i = \Phi(R_x)$. Значения видимых зарядов для рассмотренных случаев сведены в таблицу.

Видимые заряды Z^* для $R_z/R = 0,1$ и различных значений δ

Z	n _Z , м ⁻³	Z*
1000	10^{8}	228
1000	10^{7}	462
1000	10^{6}	586
339	10^{8}	222
339	107	300
339	10^{6}	314

Выводы

1. Согласно существующим расчетам уравнения состояния [6,9] полное давление и сжимаемость равновесной двухкомпонентной системы становятся отрицательными с ростом Г. Вследствие этого ожидается дополнительный фазовый переход типа газ – жидкость и/или газ – кристалл на фазовой диаграмме [6].

2. Численно решено уравнение Пуассона – Больцмана в ячейке. Получено распределение микроионов. Показано, что макроион сильно экранируется микроионами, в результате эффективный заряд макроиона становится меньше, чем реальный.

Работа поддержана РНФ, грант № 14-50-00124.

Литература

1. Фортов В. Е., Храпак А. Г., Якубов И. Т. Физика неидеальной плазмы. Учеб.пособие. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 528 С.

2. Жуховицкий Д. И., Храпак А. Г., Якубов И. Т. // Физика плазмы 11 / Ред. Смирнова В. – М.: Энергоиздат, 1984, 41 С.

3. Fortini A., Hynninen A.–P., Dijkstra M. // J. Chem. Phys. 2006. Vol. 125. P. 094502.

4. Клумов Б. А., Морфилл Г. Е., Попель С. И. // ЖЭТФ 2005. Т. 127, вып.1. С. 171–185. 5. Potekhin A., Chabrier G. Equation of state of fully ionized electron–ion plasmas // Phys. Rev. E 1998. Vol. 58, № 4. P. 4941–4049.

6. Hamaguchi S., Farouki R. T. Dubin D. Triple point of Yukawa systems // Phys. Rev. E 1997. Vol. 56. P. 4671–4682.

7. Hamaguchi S., Farouki R. T. Thermodynamics of strongly coupled Yukawa systems near the one-component OCP limit. II. Molecular dynamics simulations. // J. Chem. Phys. 1994. Vol. 101. P. 9885–9893.

8. Hamaguchi S., Farouki R. T. Thermodynamics of strongly coupled Yukawa systems near the one-component OCP limit. I. Derivation of the excess energy // J. Chem. Phys. 1994. Vol. 101. P. 9876–9884.

9. Khrapak S. A., Khrapak A. G. Ivlev A. V., Morfill G. E. Simple estimation of thermodynamic properties of Yukawa systems // Phys. Rev. E 2014. Vol. 89. P. 023102.

10. Martynova I. A., Iosilevskiy I. L. On melting density gap and non-congruence of phase transitions in models of dusty and colloid plasmas // J. Phys.: Conf. Ser. 2015. Vol. 653. P. 012141.

11. Martynova I. A., Iosilevskiy I. L. Features of Phase Transitions in models of complex plasma // Contrib. Plasma Phys. 2016. Vol. 56, №5. P. 432–441.

12. Panagiotopoulos A. Z., Hynninen A. P. // Phys. Rev. Lett. 2007. 98. P. 198301.

КВАНТОМЕХАНИЧЕСКИЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ СОСТОЯНИЯ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СВЕРХРЕШЕТКАХ В СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

И. В. Пенягин

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

Введение

Залача о квантовомеханическом движении носителей заряда в полупроводниковых структурах, помещенных во внешнее магнитное поле, имеет более чем полувековую историю [1–7]. С того момента, как Ландау решил задачу о движении заряженной частицы в перпендикулярном магнитном поле, стало ясно, что действия периодического поля кристалла и магнитного поля на электрон или дырку в полупроводнике существенно рознятся по характеру. Так, магнитное поле квантует поперечное движение заряженной частицы, а поле кристаллической решетки приводит к образованию энергетических зон. В результате в зонах проводимости и в валентной зоне в магнитном поле формируются «лестницы» уровней Ландау. В действительности, как показывают результаты первых теоретических работ, выполненных в 1960-х годах (см., например, [6]), уровни Ландау в кристаллах уширяются в зоны экспоненциально малой ширины. Причиной тому является снятие вырождения состояний частицы в магнитном поле по центру орбиты вследствие взаимодействия ее с электростатическим периодическим полем кристалла.

Следует отметить, что экспериментальное наблюдение расщепленной зонной структуры в реальных кристаллах, помещенных в магнитное поле, существенно затруднено тем, что для этого необходимо генерировать мегагауссные магнитные поля. В то же время, искусственные полупроводниковые кристаллы – сверхрешетки, – с периодом в несколько десятков нанометров являются перспективными объектами для теоретического и экспериментального исследования магнитных блоховских состояний носителей, а так же для создания на их базе фоточувствительных приборов, лазеров, спиновых фильтров и клапанов. Следует отметить, что интерес к сверхрешеткам возник полвека назад после того, как Л. В. Келдыш опубликовал свою работу [8], где изложил идею создания сверхпериодичности в кристалле с помощью акустической волны. Следует отметить, что с тех пор, как были опубликованы первые работы по сверхрешеткам, вплоть до настоящего времени интерес к этим квантовым структурам не ослабевает. Так, следуя хронологическому порядку, в присутствии высокочастотного поля в одномерных сверхрешетках были предсказаны эффекты абсолютной отрицательной проводимости, полной самоиндуцированной прозрачности, осциллирующей зависимости тока от напряженности высокочастотного поля

[9–12], предсказано наличие резонанса статического тока в полупроводниках со сверхрешеткой при совпадении кратных ларморовской и штарковской частот [13]. Наличие в минизоне сверхрешетки областей с отрицательной эффективной массой оказалось определяющим для экспериментально обнаруженного эффекта Шапиро в сверхрешетке [14], и, если размер данной области занимает значительную часть зоны Бриллюэна, то наряду с эффектом брэгговского отражения отрицательная эффективная масса становится причиной возникновения отрицательной дифференциальной проводимости (ОДП) [15].

Постановка задачи. Теоретическая модель

Гамильтониан, описывающий квантовомеханическое движение электрона в двумерной двоякопериодической квадратной сверхрешетке, в постоянном однородном магнитном поле, с учетом эффекта Зеемана и спин-орбитального взаимодействия Рашба в газе носителей имеет вид:

$$\hat{H} = \hat{H}_{0} + V(x, y) = \frac{\left(\hat{\mathbf{p}} - \frac{e}{c}\mathbf{A}\right)^{2}}{2m^{*}}\hat{E} +$$

$$+ \frac{\alpha}{\hbar} [\mathbf{z} \cdot \hat{\sigma}] \left(\hat{\mathbf{p}} - \frac{e}{c}\mathbf{A}\right) - g\mu_{B}H\hat{\sigma}_{z} + V(x, y),$$
(1)

где μ_B — магнетон Бора, \hat{E} — единичная матрица размерности 2 × 2, m^* — эффективная масса электрона вблизи дна зоны проводимости, c — скорость света, $\hat{\mathbf{p}}$ — оператор импульса, $\hat{\sigma}$ — вектор, составленный из матриц Паули, α — константа спин-орбитального взаимодействия Рашба. Для векторного потенциала магнитного поля выберем калибровку Ландау $\mathbf{A} = (0, H \cdot x, 0)$, так что $\mathbf{H} \| OZ$. Функция

$$V(x, y) = V_1 \cos^2\left(\frac{\pi x}{a}\right) \cos^2\left(\frac{\pi y}{a}\right) + V_2\left(\sin\left(\frac{2\pi x}{a}\right) + \sin\left(\frac{2\pi y}{a}\right)\right)$$
(2)

моделирует периодический электростатический потенциал поля двумерной сверхрешетки с периодом a, амплитуды потенциала V_1 и V_2 ответственны за центросимметричную и нецентросимметричную его часть, соответственно.

Структура гамильтоновской матрицы. Метод решения

В работе [16] была аналитически решена задача о квантовых состояниях двумерного электрона с гамильтонианом \hat{H}_0 , было найдено аналитическое выражение для спектра, волновых функций.В достаточно сильном магнитном поле спектр представляет собой пары уровней с характерным расстоянием между парами, равным энергии Ландау ħω_c, и расщеплением порядка суммы зеемановского сдвига и энергии СО-взаимодействия. При этом для актуальных для современных экспериментов параметров сверхрешеток [17] и величин напряженности магнитного поля порядка, энергии зеемановского расщепления в спектре, спин-орбитального взаимодействия и расщепления в спектре, обусловленного действием электростатического поля сверхрешетки на электрон, оказываются сопоставимыми между собой.

$$\hbar\omega_c >> V_1; V_2, \quad V_{1,2} \approx E_{SO} \tag{3}$$

В таком случае становится оправданным расчет квантовых состояний электрона с гамильтонианом (1) в так называемом двухуровневом приближении [18], когда исключается примесь состояний невозмущенных пар уровней в состояния магнитных блоховских подзон рассматриваемой выбранной пары с заданным значением *S*. При этом ширина расщепленной зонной структуры уровней пары много меньше характерной энергии Ландау. Рассчитаем далее квантовые состояния лишь первых двух энергетических уровней основной пары, а именно E_0^+ и E_1^- .

Волновая функция электрона, являющаяся одновременно и собственной функцией оператора магнитной трансляции [8], может быть представлена в виде симметризованной линейной комбинации состояний первой пары уровней [18]:

$$\Psi_{k}(x,y) = \begin{pmatrix} \Psi_{1k}(x,y) \\ \Psi_{2k}(x,y) \end{pmatrix} =$$

$$= \sum_{n=1}^{p} \sum_{l=-\infty}^{\infty} e^{ik_{x}a(lp+n)q/p} e^{2\pi i y(lp+n)/a} \times \qquad (4)$$

$$\times \Big(A_{n}(k)\psi^{+}_{0nlk}(x,y) + B_{n}(k)\psi^{-}_{1nlk}(x,y)\Big),$$

где $\psi^+_{0nl\mathbf{k}}(x, y)$ и $\psi^-_{1nl\mathbf{k}}(x, y)$ – спинорные волновые функции первых двух уровней,

В представлении оператора H_0 оператор Гамильтона (1) представляется матрицей размерности $2p \cdot 2p$ и имеет блочный вид:

$$\begin{pmatrix} (A) & (AB)^* \\ (AB) & (B) \end{pmatrix}.$$
 (5)

Каждый из блоков представляет собой квазитрехдиагональную матрицу размерности $p \times p$. Матричные элементы гамильтониана были рассчитаны нами аналитически и приведены в работе [19].

В собственном базисе гамильтониана H_0 уравнение Шредингера представляет собой систему линейных алгебраических уравнений относительно коэффициентов $A_n(\mathbf{k})$ и $B_n(\mathbf{k})$ разложения волновой функции электрона по базисным состояниям. Данная система уравнений решалась нами численно с привлечением метода унитарных преобразований для диагонализации эрмитовских матриц: был использован метод Хаусхолдера в совокупности с QL-QR –алгоритмами.

Квантовые состояния: результаты расчетов

Все расчетные параметры были максимально приближены к известным из экспериментов [17] для решеточных структур $In_{0,23}Ga_{0,77}As/GaAs$: $m^* = 0,05m_e, \alpha = 2,5 \cdot 10^{-11} eVm, a = 80nm, g = -4.$

В низшей из подзон нами был рассчитан закон дисперсии электрона $E_1(k)$ (см. рис. 1). Функция $E_1(k)$ является четной функцией квазиимпульса в магнитной зоне Бриллюэна, поскольку периодический потенциал (2) поля сверхрешетки, в данном случае, центросимметричен. В случае нецентросимметричного потенциала решетки симметрия закона дисперсии понижается (см. рис. 2).



Рис. 1. Основная подзона спектра гамильтониана (1) при $V_2 = 0$



Рис. 2. Основная подзона спектра гамильтониана (1) при $V_2 = 0, 1 \cdot V_1$

Проведенные нами модельные расчеты показывают, что в случае, когда потенциал сверхрешетки не обладает центром инверсии, экстремумы законов дисперсии энергетических подзон смещены относительно центра МЗБ вдоль линии $k_y = -k_x$ (см. рис. 3).



Рис. 3. Законы дисперсии в магнитных блоховских подзонах при $V_2 = 0, 1V_1$

Кроме того, непосредственными расчетами показано, что при соотношении между амплитудами потенциала $V_2/V_1 \approx 0,13$ вторая и третья магнитные подзоны мгновенно касаются друг друга в некоторой точке магнитной зоны Бриллюэна. Ожидалось, что это скажется на перестройке распределения средних спинов электрона в плоскости газа, однако дальнейшие расчеты не подтвердили этого предположения.

В работе также был выполнен расчет средних значений проекций спина электрона в магнитных подзонах

$$\left\langle S_{i}^{\mu}(\mathbf{k})\right\rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Psi_{\mathbf{k}}^{\mu*}(x, y) \overset{\wedge}{\sigma_{i}} \Psi_{\mathbf{k}}^{\mu}(x, y) dx dy, \qquad (6)$$

где i = x, y, z; μ – номер подзоны.

На рис. 4 приведены результаты расчетов векторного поля средних значений проекций спина в плоскости электронного газа в случаях центросимметричного, рис. 4,а, и нецентросимметричного, рис. 4,б, периодического потенциала при p/q = 5/1 в низшей подзоне. Векторное поле среднего спина в плоскости, перпендикулярной магнитному полю, имеет вихревую структуру, линии векторного поля являются касательными к изображенным изоэнергетическим линиям. Если потенциал центросимметричен, спиновая намагниченность в плоскости газа равна нулю.

$$\sum_{i}^{\mu} = \iint_{M3\mathcal{B}} \left\langle S_{i}^{\mu}(\mathbf{k}) \right\rangle dk_{x} dk_{y} , \quad (i = x, y)$$
(7)

В случае нецентросимметричного $V_2 \neq 0$ периодического потенциала в перпендикулярном магнитном поле появляется спиновая намагниченность в плоскости газа. Отсутствие инверсионной симметрии периодического электростатического поля сверхрешетки является необходимым условием возникновения данного эффекта в электронном газе со спин-орбитальным взаимодействием в изучаемых структурах.

По результатам изложенных исследований была опубликована статья [19].





Квантовые состояния в присутствии постоянного электрического поля

Изучим влияние слабого электрического поля на квантовые состояния носителей в рассматриваемых системах. Решение данной задачи проводилось методом теории возмущений. Аналитически были рассчитаны матричные элементы возмущающего электростатического потенциала, а численно были проведены расчеты спектра, ВАХ структуры.

Гамильтониан слабого электростатического поля, направленного вдоль оси 0х, имеет вид

$$\hat{W} = e\varepsilon x. \tag{8}$$

Матричные элементы оператора возмущающего электростатического поля были рассчитаны аналитически и имеют вид

$$W(\boldsymbol{k})_{\alpha\gamma} = \frac{e\varepsilon l_{H}^{2}}{qa\sqrt{2}} \frac{D_{1}}{\sqrt{1+D_{1}^{2}}} \sum_{j=1}^{p} \sum_{i=1}^{p} \times \left(\left(A_{j}^{\alpha}(\boldsymbol{k}) \right)^{*} B_{j}^{\gamma}(\boldsymbol{k}) + \left(B_{j}^{\alpha}(\boldsymbol{k}) \right)^{*} A_{j}^{\gamma}(\boldsymbol{k}) \right).$$

$$(9)$$

Здесь $A_j^{\alpha}(\mathbf{k}) - j$ -ая компонента собственного вектора для состояния с вектором k в подзоне с номером α . $B_j^{\alpha}(\mathbf{k}) - (j+p)$ -ая компонента собственного вектора для подзоны с номером α .

На рис. 5 представлены результаты расчетов поправки к спектру электрона в основной магнитной блоховской подзоне (рис. 1) в электрическом поле $E_x = 100 \frac{\text{B}}{\text{см}}$. На масштабе магнитной зоны Бриллюэна знакопеременный диагональный матричный элемент $W_{11}(\mathbf{k})$ оператора \hat{W} приводит к исчезновению симметрии поворотной оси четвертого порядка в законе дисперсии электрона в минизоне.



Рис. 5. Поправка к энергии электрона в основной энерге-

тической подзоне при
$$E_x = 100 \frac{B}{CM}$$

Транспорт носителей в направлении электрического поля

Для анализа транспортных свойств модельного материала в слабом электрическом поле была рассчитана неравновесная функция распределения $f^{\mu}(\mathbf{k}, E_x)$ носителей заряда в-ой магнитной подзоне, исходя из численного решения квазиклассического однородного кинетического уравнения Больцмана в τ -приближении методом Эйлера:

$$\frac{E_{x}ea}{\hbar}\frac{\partial f^{\mu}(\boldsymbol{k},E_{x})}{\partial k_{x}a} = -\frac{1}{\tau} \Big(f^{\mu}(\boldsymbol{k},E_{x}) - F(\boldsymbol{k}) \Big), \quad (10)$$

где $F(\mathbf{k})$ – равновесная функция распределения Ферми-Дирака.

На рис. 6 представлена функция распределения электронов в основной магнитной блоховской подзоне при $E_x = 100 \frac{\text{B}}{\text{см}}$. В отличие от равновесной функции она не обладает симметрией поворотной оси четвертого порядка в магнитной зоне Бриллюэна, и в электрическом поле распределение носителей смещается в холловском направлении.

В низшей магнитной подзоне был проведен расчет величины поверхностной плотности электрического тока j_x как функции внешнего постоянного однородного электрического поля

$$j_x^{\mu} = \frac{|e|^2}{(2\pi)^2} \iint_{k \in MBZ} dk_x dk_y v_x^{\mu}(k) f^{\mu}(k, E_x).$$
(11)

Уровень Ферми при расчетах располагался в следующей за рассматриваемой магнитной подзоной энергетической щели, так что концентрация носителей составляла малую величину порядка $n = 10^{10}$ см⁻². Проекция вектора скорости электрона на направление электрического поля и его эффективная масса в подзоне Ландау существенным образом зависят от точки в магнитной зоне Бриллюэна, по которой ведется интегрирование в выражении (11). На рис.7 представлена зависимость поверхностной плотности электрического тока в основной магнитной блоховской подзоне от величины напряженности внешнего электрического поля.



Рис. 6. Функция распределения электронов в основной магнитной блоховской подзоне при $E_x = 100 \frac{\text{B}}{\text{см}}$, $V_2 = 0, 1V_1$



Рис. 7. ВАХ модельного материала (время релаксации импульса $\tau = 10^{-12} c$) при $V_2 = 0, 1V_1$

Расчеты показывают, что имеет место переход от линейной вольт-амперной характеристики структуры к участку насыщения поверхностного тока с его последующим уменьшением с возрастанием напряженности внешнего электрического поля. В области значений напряженности электрического поля, соответствующей равенству между штарковской частотой и обратным временем релаксации импульса, наблюдается, таким образом, переход от омического участка ВАХ к участку с отрицательной дифференциальной проводимостью.

Вольт-амперная характеристика исследуемого модельного материала существенно зависит от доли вклада нецентросимметричной части периодическо-го потенциала (см. рис. 8).



Рис. 8. Зависимость ВАХ от вклада нецентросимметричной части периодического потенциала

Заключение

В ходе работы впервые был рассчитан спектр электрона, находящегося в нецентросимметричном двоякопериодическом потенциале и перпендикулярном магнитном поле при учете спин-орбитального взаимодействия. Показано, что для случая центросимметричного знакопостоянного периодического потенциала энергетические подзоны в сильном магнитном поле группируются по одну сторону от положения каждого из невозмущенных уровней энергии в паре. В отсутствие нецентросимметричного вклада в потенциале наблюдается симметрия C_{4V} для законов дисперсии в магнитной зоне Бриллюэна, в присутствии – симметрия закона дисперсии в подзонах понижается до C_S – симметрии периодического го потенциала при $V_1 \neq 0; V_2 \neq 0$.

Были рассчитаны распределения среднего спина в состояниях магнитных подзон в случаях центросимметричного и нецентросимметричного модельных потенциалов сверхрешетки. Показано, что имеет место вихревая структура распределения спинов в плоскости электронного газа. Следует отметить, что в случае центросимметричного потенциала, спиновая намагниченность газа в полностью заполненной подзоне равна нулю.

Была решена задача о квантовомеханическом движении блоховского электрона в скрещенных взаимно перпендикулярных постоянных однородных магнитном и электрическом полях. Влияние электрического поля на электрон учитывалось в первом порядке стационарной теории возмущений. Исследована симметрия законов дисперсии и рассчитано распределение носителей по энергиям в магнитных подзонах Ландау в зависимости от величины напряженности внешнего электрического поля. Показано, что невозмущенный электрическим полем закон дисперсии электрона в магнитной подзоне обладает симметрией поворотной оси четвертого порядка, а распределение электронов по энергиям в подзонах в электрическом поле смещается в холловском направлении.

В слабых электрических полях на основе решения квазиклассического кинетического уравнения Больцмана в приближении одной заполненной магнитной подзоны Ландау, когда закон дисперсии электрона в ней есть электронный гамильтониан, рассчитана вольт-амперная характеристика сверхрешетки. Учитывалось лишь упругое рассеяние носителей на примесях в приближении времени релаксации импульса.

Показано, что в скрещенных полях имеет место эффект отрицательной дифференциальной продольной проводимости, мало чувствительный к различным вкладам в спин-орбитальное взаимодействие в электронном газе. В то же время, эффекты зарядового транспорта в холловском направлении существенным образом зависят от того, какой тип спин-орбитального взаимодействия преобладает в электронном газе. Следует отметить также, что если электрическое поле будет достаточно сильным, то при расчетах вольтамперных характеристик системы необходимо руководствоваться решением квантового кинетического уравнения, учитывать разогрев электронного газа, межминизонное туннелирование в спектре и эффекты неупругого рассеяния на фононах.

Литература

1. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Статистическая физика часть2 – 8-е издание, стереот. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006.

2. Зильебрман Г. Е. Энергетический спектр электрона в кристалле в магнитном поле, ЖЭТФ т. 30, С. 1092 (1956).

3. Зильберман А. Е. Электрон в слабом периодическом и однородном магнитном полях, ЖЭТФ т. 23, С. 49 (1952).

4. Rauh A. Degeneracy of Landau Levels in Crystals, Phys.Stat.Sol., (b) V. 65, P. K131 (1974).

5. Hofstadter D. Energy levels and wave functions of Bloch electrons in rational and irrational magnetic fields, Phys.Rev.(B) V.14 P.2239 (1976).

6. Butler F.A., Brown E.Model Calculations of Magnetic Band Structure, Phys.Rev.(B) V. 166 P. 630 (1968).

7. Hasegawa Y., Hatsugai Y., Kohmoto M. Stabilization of flux states on two-dimensional lattices, Phys. Rev. (B) V. 41 No 13 P. 9174 (1990).

8. Келдыш Л. В. Свойства полупроводниковых сверхрешеток, ФТТ 4, 2265 (1962).

9. Павлович В. В., Эпштейн Э. М. Нелинейная высокочастотная проводимость сверхрешетки, ФТТ 18, 1483 (1976).

10. Павлович В. В., Эпштейн Э. М. Проводимость полупроводника со сверхрешеткой в сильных электрических полях, ФТП 10, 2001 (1976).

11. Ignatov A. A., Romanov Yu. A. Nonlinear Electromagnetic Properties of Semiconductors with a Superlattice, Phys. Status Solidi B 73, 327 (1976).

12. Игнатов А. А., Романов Ю. А. Абсолютная отрицательная проводимость в полупроводниках со сверхрешеткой, Изв. вузов. Радиофизика 21, 132 (1978).

13.Басс Ф. Г., Зорченко В. В., Шашора В. И. Stark-cyclotron resonance in semiconductors with a superlattice, Письма в ЖЭТФ 31, 345 (1980).

14. Ignatov A. A., Renk K. F., Dodin E. P. Esaki-Tsu superlattice oscillator: Josephson-like dynamics of carriers, Phys. Rev. Lett. 70, 1996 (1993).

15. Романов Ю. А. О дифференциальной проводимости полупроводниковых сверхрешеток, ФТТ 45, 529 (2003).

16. Wang X. F., Vasilopoulos P. Magnetotransport in a two-dimensional electron gas in the presence of spin-orbit interaction, Phys. Rev. B 67, 085313 (2003). 17. Geisel M. C., Smet J. H., Umansky V. et al. Detection of a Landau Band-Coupling-Induced Rearrangement of the Hofstadter Butterfly, Phys. Rev. Lett. 92, 256801 (2004).

18. Demikhovskii V. Ya., Perov A. A. Hall conductance of a two-dimensional electron gas with spin-orbit coupling in the presence of a lateral periodic potential, Phys. Rev. B 75, 205307 (2007).

19. Перов А. А., Пенягин И. В. Магнитные блоховские электронные состояния и спиновая поляризация в двумерных сверхрешетках без центра инверсии со спин-орбитальным взаимодействием Рашба в электронном газе, ЖЭТФ 145, 535 (2014).

АЛГОРИТМЫ ДИНАМИЧЕСКОЙ БАЛАНСИРОВКИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ ДЛЯ МНОГОМЕРНЫХ РАСЧЕТОВ В МЕТОДИКЕ ТИМ

<u>Т. Н. Половникова</u>, А. А. Воропинов

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

Введение

Методика ТИМ [1–2] предназначена для решения многомерных нестационарных задач механики сплошных сред на неструктурированных лагранжевых сетках произвольного вида.

По методике ТИМ можно рассчитывать широкий набор процессов: газовую динамику и упругопластичность, детонацию, теплопроводность, магнитную гидродинамику с учетом диффузии магнитного поля, многопотоковую газодинамику и другие процессы.

Ячейками сетки являются в двумерном случае произвольные несамопересекающиеся многоугольники, в трехмерном случае – произвольные несамопересекающиеся многогранники, которые не обязательно выпуклые. Грани состоят из произвольного количества узлов, в узлах сетки сходится произвольное количество ребер.

Для повышения точности проводимых расчетов необходимо производить численное моделирование на сетках с большим количеством ячеек. Проведение таких расчетов требует значительного календарного времени. Один из путей сокращения сроков – проведение расчетов в параллельном режиме счета.

Эффективное выполнение счетных программ на многопроцессорных машинах с распределенной памятью требует декомпозиции данных по процессам таким образом, чтобы распределение вычислительной нагрузки было равномерным, а количество межпроцессных обменов минимальным. Получение качественной декомпозиции является актуальной проблемой особенно для методик, использующих неструктурированные сетки.

В методике ТИМ задача выполнения декомпозиции сводится к решению задачи о разрезании графа на подграфы. Вершина графа соответствует ячейке сетки, а ребро – соседству между ячейками. В качестве исходных данных используется граф, отображающий структуру сетки. Возможно использование различных весов вершин и ребер графа.

В процессе численного моделирования объем вычислений для конкретной ячейки может изменяться (за счет алгоритмов поддержания качества счетной сетки, использования различных уравнений состояний, кинетических моделей: кинетика детонации, кинетика разрушения и т. д.). На обсчет такой ячейки (или всей параобласти) может тратиться больше времени, значит, может появиться несбалансированность, а распределение вычислительной нагрузки по процессам должно быть оптимальным. Также в процессе численного моделирования по методике ТИМ в задаче могут образовываться струйные и вихревые течения, локально могут утончаться и перебиваться параобласти, параобласти могут претерпевать изломы вблизи параллельной границы, которые могут приводить к увеличению межпроцессных обменов.

Опыт проведения расчетов показал, что основная проблема заключается не в получении изначально плохой декомпозиции, а в постепенном ухудшение качества декомпозиции в процессе проведения расчета из-за работы различных алгоритмов. Таким образом, видно, что необходима балансировка вычислительной нагрузки.

Алгоритмы балансировки для сеточных методик можно классифицировать следующим образом:

1) статическая балансировка (выполняется на этапе декомпозиции, учитывая весовые функции).

2) квази-динамическая балансировка (передекомпозиция в процессе счета).

 динамическая балансировка (передача ячеек между параобластями внутри математической области).

Данная работа посвящена алгоритмам динамической балансировки.

Алгоритмы динамической балансировки

Динамическая балансировка основана на передаче ячеек между параобластями внутри математической области без выполнения операций сохранения контрольных точек и вообще каких-либо внешних данных. Динамическая балансировка лишена недостатков квази-динамической балансировки, так как она не требует выполнения дорогостоящей операции сохранения и чтения контрольной точки и полной передекомпозиции задачи.

Однако динамическая балансировка не лишена недостатков, ограничивающих ее применение. В частности, довольно часто при разбалансировке наиболее и наименее загруженные параобласти принадлежат различным математическим областям. По смыслу динамической балансировки передача ячеек в этом случае напрямую невозможна, так как между параобластями отсутствует коммуникация. Т. е. возможны ситуации, когда динамическая балансировка не может напрямую решить проблему разбалансировки или потребуется множество операций передачи ячеек. Например, в случае отсутствия прямого взаимодействия между перегруженными и недогруженными по вычислительной нагрузке параобластями одной математической области может использоваться передача ячеек через параобласти с удовлетворительной загруженностью.

Другой проблемой для динамической балансировки может являться ситуация, когда вычислительная нагрузка меняется очень резко. Такая ситуация возможна, например, когда на старте задачи первоначальная декомпозиция делается без использования весовых функций, а затем в процессе счета определяется время на расчет ячеек. В результате может оказаться, что первоначальная декомпозиция неудачна, вплоть до того, что некоторые процессы должны сменить набор ячеек полностью. В этом случае объем передаваемых данных между параобластями внутри математической области чрезвычайно большой, и оказывается, что гораздо быстрее выполнить передекомпозицию. Результаты работы алгоритмов динамической балансировки за несколько шагов представлены на рис.1, 2:

Критерии динамической балансировки вычислительной нагрузки

Набор критериев для проведения динамической балансировки вычислительной нагрузки состоит из двух частей:

1) критерии анализа необходимости выполнения операции улучшения качества декомпозиции:

 – разбалансированность по вычислительной нагрузке,

 – параобласть близка к перебитию (по типу «песочные часы»);

2) критерии выбора ячеек для переброски:

- ячейка из заданного списка,

 неоптимальное отношение по количеству внутренних и граничных ребер (2D) и внутренних и граничных граней (3D),

 неоптимальное отношение по длине внутренних и граничных ребер (2D) и по площади внутренних и граничных граней (3D),

- ячейка максимального веса,

 – ряд критериев, вырабатываемых программами поддержания качества сетки.



Рис. 1. Начальные декомпозиции: а – двумерный случай, б – трехмерный случай



Рис. 2. Полученные декомпозиции через несколько шагов в результате работы алгоритмов динамической балансировки: а – двумерный случай, б – трехмерный случай

Пользователь может управлять, какими критериями он хочет воспользоваться для улучшения качества декомпозиции и динамической балансировки.

Тестовые расчеты

Работа алгоритмов переброски ячеек лля линамической балансировки тестировалась на задаче о плоской волне на модельной трех вычислительных узлах. Для тестирования была использована четырехугольная сетка. Такая сетка позволяет не использовать алгоритмы поддержания качества сетки [5] и, благодаря этому, общий объем вычислений не зависит от вида декомпозиции. Это позволяет корректно оценить влияние алгоритмов переброски на общее время расчета, если изначально была принудительно задана несбалансированная декомпозиция. При разбалансировке больше 5% появляется необходимость в использовании алгоритмов динамической балансировки. Тестовые расчеты про-



Рис. 3. Фрагменты четырехугольной сетки с разбалансировкой 97 %



водились с использованием двух критериев: критерия разбалансировки вычислительной нагрузки и критерия неоптимального отношения внутренних и внешних ребер по их количеству. После отработки критерия разбалансировки получаются пары номеров параобластей, между которыми необходимо выполнить переброску ячеек.

На рис. 3 представлен фрагмент четырехугольной сетки с разбалансировкой 97 %. Расчет 100 шагов с такой декомпозицией занял 101,4 сек.

На рис. 4 разбалансировка по процессам составляет примерно 5 %. Расчет 100 шагов с такой декомпозицией занял по времени 90,1 сек.

Таким образом, для получения разбалансировки менее 5 % необходимо было перебросить 20 % ячеек между параобластями, что привело к ускорению счета на 11 %.

На рис. 5 представлено сравнение одного и того же фрагмента четырехугольной сетки до переброски ячеек, рис. 5а, и после, рис. 5б.



Рис. 4. Фрагмент четырехугольной сетки с разбалансировкой примерно 5 %



Рис. 5. Фрагменты четырехугольной сетки: а – до переброски ячеек, б – после переброски ячеек

Таким образом, в результате работы алгоритмов получается более ровная граница, т. е. уменьшается длина границы, что приводит к уменьшению объемов обменов между процессами.

Были проведены тестовые расчеты трехмерной задачи, которая состоит из 5 математических областей, количество ячеек и параобластей в каждой из которых представлено в табл. 1, сетка шестигранная. Задача считалась на 9 вычислительных узлах по 16 процессорных ядер в каждом.

Алгоритмы динамической балансировки дают дополнительную вычислительную нагрузку. Поэтому при хорошей сбалансированности вычислительной нагрузки между узлами в задаче данные алгоритмы могут давать замедление, т. к. работают только критерии анализаторы необходимости переброски, а сама переброска не выполняется. Тем не менее несмотря на то, что в тестовом расчете использовались декомпозиции хорошего качества, и то что в тесте рассчитывается всего 200 шагов, получено ускорение на 3,7 %.

Таблица 1

Hoven verseguerusesse é searre	L'a superso guessi	Количество параобластей			
помер математической области	количество ячеек	Тест 1	Тест 2		
1	132505	3	4		
2	61392	3	3		
3	157560	3	3		
4	4648	Параобласти не создавались			
5	533830	7	7		
Общее количество ячеек	889935				
Коэффициент разбалансировки, %		12	5		

Количество ячеек по математическим областям

В данном случае использовались критерий разбалансировки вычислительной нагрузки и критерий неоптимального отношения внутренних и внешних граней по их количеству.

В расчетах с алгоритмами динамической балансировки варьировались следующие параметры:

– коэффициент разбалансировки: 1 %, 3 %, 5 % и 10 %,

– максимальное количество перебрасываемых ячеек за шаг: 20, 50 и 100.

Реберный коэффициент был равен 0,9 (реберный коэффициент определяет отношение количества разрезанных внешних и внутренних ребер графа).

Задача считалась 200 шагов.

В табл. 2 указаны ускорения по времени при расчетах с алгоритмами динамической балансировки: Таким образом, исходя из полученных результатов видно, что для данной задачи (при расчете с реберным коэффициентом 0.9) оптимальными оказались следующие параметры: коэффициент разбалансировки 3% и количество максимально перебрасываемых ячеек за шаг равно 50.

Заключение

Работа алгоритмов, реализующих описанные критерии, была продемонстрирована на ряде методических расчетов. Применение алгоритмов динамической балансировки вычислительной нагрузки позволяет ускорить счет и эффективно загрузить процессорное поле, выделенное на задачу. Таким образом, на двумерной модельной задаче без корректировки сетки

Таблица 2

У	скорение по времени в	расчетах с алго	ритмами баланси	овки относительно	расчетов без них

Максимальное число пере-	Коэффициент разбаланси-	Ускорение, %				
брасываемых ячеек за шаг	ровки, %	Тест 1	Тест 2			
	1	1	-1,7			
20	3	3	0,6			
20	5	2,6	-2			
	10	2,1	-3			
	1	3	1			
50	3	3,7	2,3			
30	5	1	-1,6			
	10	2,1	-3			
	1	2,1	-3			
100	3	2,6	1,7			
100	5	2,1	-2,3			
	10	2.3	-3			

в результате отработки критериев балансировки было получено ускорение на 11 %, на изначально хорошо сбалансированной трехмерной модельной задаче с использованием всего аппарата поддержания качества сетки в многообластной постановке – ускорение на 3,7 %.

В дальнейшем планируется провести исследование на серии сложных расчетов для выбора оптимального набора параметров, подходящего для решения широкого класса прикладных задач.

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. Соколов С. С., Воропинов А. А., Новиков И. Г. и др. Методика ТИМ-2D для расчета задач механики сплошной среды на нерегулярных многоугольных сетках с произвольным количеством связей в узлах // Там же. 2006. Вып. 4. С. 29–43.

3. Воропинов А. А., Новиков И. Г., Соколов С. С. Распараллеливание в модели смешанной памяти для расчета задач газодинамики в методике ТИМ-2D // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. Научно-исследовательское издание. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2013. С. 84–99.

4. Воропинов А. А., Новиков И. Г., Соколов С. С. Методы мелкозернистого распараллеливания в методике ТИМ-2D // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Мат. модел. физ. процессов. 2012. Вып. 3. С. 24–33.

5. Новиков И. Г., Панов А. И., Соколов С. С. Способ коррекции нерегулярной лагранжевой сетки методом наложения дифференцируемых связей // Журнал вычисл. мат. и мат. физ. 2005. Т. 45, № 8. С. 1487–1500.

АЛГОРИТМЫ ПОСТРОЕНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ НЕСТРУКТУРИРОВАННЫХ СЕТОК НА ОСНОВЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ СЕТКИ ДЛЯ МЕТОДИКИ ТИМ

А. К. Шмелева, А. А. Воропинов

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

При решении трехмерных задач механики сплошной среды в областях сложной формы начальная геометрия часто задается в виде поверхностной сетки, а возмущения в системе – в виде граничных условий. В связи с этим наиболее важно построение качественной расчетной сетки, особенно вблизи границ. В данной работе описаны два подхода к построению трехмерных неструктурированных сеток на основе поверхностной сетки, реализованные в рамках методики ТИМ [1]:

1) построение сетки приграничного слоя;

2) построение сетки на основе диаграммы Вороного с расстановкой центров от поверхности.

Построение сетки приграничного слоя

Для построения каждого слоя требуется определять положение новых узлов сетки, рис.1, при заданном отступе *h*. Для этого для каждого узла поверхностной сетки $Vert_i$ делается смещение на величину $h_i = h\delta_i$ по направлению нормали узла. Здесь используется коэффициент сдвига узла δ_i – величина, определяющая, на какое расстояние переместится новый узел относительно положения старого узла в зависимости от углов между нормалями граней старого узла. Если брать коэффициент сдвига постоянным, рис. 1а, то на изломах поверхности может получиться сетка плохого качества, в сравнении с сеткой при переменном коэффициенте сдвига, рис. 16.

Для определения коэффициента сдвига в двумерном случае была выбрана формула:

$$\delta_i = \left(\cos\frac{\alpha_i}{2}\right)^{-1},\tag{1}$$

где α_i – угол между нормалями.

В трехмерном случае вычисления усложняются: надо знать все грани, содержащие данный узел и попарно рассматривать формулу (1) для нормалей граней, имеющих общее ребро (рис. 2). Эту формулу надо применять в плоскости, ортогональной их общему ребру – то есть нужно найти проекцию нормали на эту плоскость:

$$\delta_i = \frac{k}{\sum_{m=1}^k \Pi p_{\pi_m} \vec{n} \cos \frac{\alpha_{im}}{2}},$$
(2)

где k – количество ребер, сходящихся в узле; π_m – плоскость, ортогональная ребру $Edge_m$.

После вычисления всех коэффициентов δ_i формируется первый слой сетки. Для построения следующих слоев определяются грани трехмерной сетки, по которым производится дальнейшее наращивание. Эти грани объединяются в новую поверхность. Далее, аналогично построению первого слоя, для узлов полученной поверхности определяются нормали и коэффициенты δ_i . К текущей трехмерной сетке добавляется новый слой, сформированный от полученной поверхности.



Рис. 1. Сечение сетки: а – при постоянном коэффициенте сдвига узлов, б – при переменном коэффициенте сдвига узлов



Рис. 2. Определение коэффициента сдвига узла

Следует отметить, что на каждом шаге производится проверка сетки на предмет самопересечений. Если возникают самопересечения граней, то последний слой не учитывается и построение сетки прекращается.

На рис. 3 показан вид исходной поверхности (габаритные размеры: 254 × 255 × 254).



Рис. З.Вид исходной поверхности с различных углов обзора

Для данной поверхности была построена сетка приграничного слоя, состоящая из 10 слоев с шириной слоя h = 0,01, фрагменты которой показаны на рис. 4.

Сетка на основе диаграммы Вороного с расстановкой центров от поверхности

Напомним, что диаграмма Вороного[2] определяется следующим образом:

пусть задано множество C из n точек $\{p_1, p_2, ..., p_n\}$ в пространстве R^3 . Диаграммой Вороного V(C) множества C называется разбиение пространства на n ячеек Вороного V(i), каждая их которых характеризуется тем, что внутренние точки ячейки V(i) лежат ближе к точке p_i , чем к любой точке из C, отличной от p_i :

$$V(p_i) = V(i) = \left\{ r : r \in \mathbb{R}^3, \, d(r, p_i) \le d\left(r, p_j\right), \, j \ne i \right\}.$$
(3)

Таким образом, в данной постановке V(i) - выпуклый многогранник, являющийся пересечением полупространств $H(p_i, p_j)$, которые определяются плоскостью, такой, что отрезок $[p_i, p_j]$ делится пополам, и эта плоскость перпендикулярна отрезку.

Основываясь на этих свойствах диаграммы Вороного, можно корректно описать границу будущей сетки, расставляя центры ячеек парами на одинаковом расстоянии δ от поверхности во внешнем и внутреннем направлении.

Тогда общий алгоритм построения сетки будет следующий:

 анализ качества исходной поверхности и ее последующее изменение.

 формирование списка основных центров (полученных с использованием данных о поверхности);

 формирование списка дополнительных центров (полученных с помощью распределений);

4) построение диаграммы Вороного по набору полученных центров;

5) удаление внешнего слоя ячеек;

6) преобразования полученной сетки.

Рассмотрим подробнее каждый из этапов построения сетки.



Рис. 4. Полученная сетка приграничного слоя: а – сетка, б – фрагмент А сетки

1. Анализ качества исходной поверхности

Качество исходной сетки напрямую влияет на качество получаемой, а в некоторых случаях даже на саму возможность ее построения. На этапе анализа проводится проверка поверхностной сетки на предмет самопересечений, удаление «двойных» узлов, определение списка граней для измельчения (грани на узких участках сетки, грани большой площади и т.д.) и дробление таких граней на четырехугольники, переход к плоским граням. Также проводится определение линии излома поверхности (совокупности всех ребер поверхностной сетки, разделяющих грани, двугранный угол между которыми превосходит $\pi/3$) и вычисление нормалей для граней.

Рис. 5 и рис. 6 показывают необходимость проведения данных процедур.

На рис. 5 показана поверхностная сетка в исходном виде, рис. 5а, и то, что получилось после ее изменения, рис. 5б. Габаритные размеры: $10 \times 12.9 \times 6.5$.

На рис. 6 показаны сетки на основе диаграммы Вороного. Сетки были получены для поверхностей с рис. 5 с отступом $\delta = 10^{-4}$.

На рис. 6,а показана сетка для исходной поверхности с рис. 5а, на рис. 6б – для измененной с рис. 5б. Из рисунков видно, что без дробления поверхности построить корректно сетку на узких участках геометрии невозможно.

2. Формирование списка основных центров

Основные центры вводятся попарно и откладываются на одинаковом расстоянии от какой-либо точки исходной поверхности по направлению нормали грани, которой принадлежит эта точка. Такую точку можно выбрать несколькими способами. Лучше всего себя зарекомендовал способ вычисления координат основных центров через арифметические центры граней поверхности. Однако для построения сеток в существенно трехмерных геометриях таких центров не всегда бывает достаточно. В случае если на изломах геометрии поверхностная сетки имеет сильно вытянутые вдоль излома грани, необходимо добавить центры вдоль этой грани, иначе сетка не будет описывать геометрию корректно. Если в одном узле поверхностной сетки сходится большое число ребер, то есть возможность центры будущей сетки откладывать и от этого узла.



Рис. 5. Поверхностная сетка: а – в исходном виде, б – после изменения



Рис. 6. Полученные сетки: а – для исходной поверхности с рис. 5а, б – для измененной поверхности с рис. 5б

3. Формирование списка дополнительных центров

Чтобы вычислить координаты дополнительных центров, вначале генерируются координаты точек в параллелепипеде, обрамляющем поверхность. Далее нужно избавиться от центров, мешающих построению сетки. Во-первых, все центры должны находиться внутри поверхности. Во-вторых, дополнительные центры не должны оказывать влияние на границу будущей сетки, поэтому центры должны располагаться на некотором расстоянии от границы (поверхности). Следует отметить, что для сортировки центров применяется быстрый геометрический поиск с разбиением пространства на кубы [3].

4. Построение диаграммы Вороного

Определившись окончательно с расположением центров, строим сетку диаграммы Вороного в минимальном координатном параллелепипеде, в который можно вписать набор имеющихся центров. Для построения применяется инкрементный алгоритм, основанный на последовательном добавлении центров в текущую диаграмму.

5. Удаление внешнего слоя ячеек

После построения диаграммы Вороного по набору полученных центров удаляются все ячейки, лежащие снаружи относительно исходной поверхности.

На рис. 7 показан фрагмент диаграммы Вороного для исходной поверхности, рис. 7а, в виде эллипсоида. На рис. 76 показан тот же фрагмент сетки после удаления слоя внешних относительно поверхности ячеек.

6. Преобразование полученной сетки

Отдельное внимание хочется уделить вопросу улучшения качества сетки на границе.

При построении сетки возникают два вида проблем – некорректное построение сетки на участках излома поверхности и «ступенчатость» на гладких участках. Эти проблемы возникают из-за неравномерного расположения центров граней исходной поверхности.

Чтобы избавиться от проблемы «ступенчатости», производится сжатие малых граней полученной сетки в узел, ребро или совокупность ребер в зависимости от формы грани.

На рис. 8 показан фрагмент границы сетки до применения этих алгоритмов, рис. 8а, и после, рис. 8б.





Рис. 7. Фрагмент сетки: а – до удаления слоя внешних ячеек, б – после удаления слоя внешних ячеек



Рис. 8. Фрагмент границы сетки: а – до сжатия граней, б – после сжатия граней



Рис. 9. Фрагмент сетки: а – до преобразования, б – после преобразования

На рис. 9 показан фрагмент сетки, построенной на изломе исходной поверхности, рис. 9а. Из рис. 9а видно, что появляются зубчики и впадины. Чтобы избавиться от этого эффекта, производится описание линии излома на этапе анализа поверхности и дальнейшее отсечение или добавление фрагментов ячеек в сетку. Данный этап преобразования сетки выполняется после построения диаграммы Вороного. На рис. 9б показан фрагмент сетки после преобразований.

С помощью вышеописанного алгоритма были построены трехмерные сетки для ряда поверхностей: «трехмерного креста», несферической оболочки и поверхности поршня.

Поверхность «трехмерного креста»

Габаритные размеры области: $3 \times 3 \times 3$, отступ: $\delta = 0,01$.

На рис. 10 показана поверхность «трехмерного креста», рис. 10а, и фрагмент сетки, полученной для данной поверхности, рис. 10б.

Из рис. 10 видно, что в приграничном слое получены ячейки большого объема. Это произошло изза того, что грани поверхности не дробились и имеют достаточно большие площади. Внутренние ячейки являются телами Вороного.

Информация о том, как изменялась топология сетки, приводится в табл. 1.



Рис. 10. Поверхность «трехмерного креста» и фрагмент полученной сетки: а – исходная поверхность, б – фрагмент сетки

Таблица 1

Информация о топологии сетки	После построения диаграммы Вороного	После деления ячеек на новой границе	После удаления слоя внешних ячеек	После коррекции граничных ячеек	
Число ячеек	2660	2919	2046	2046	
Число граней	14939	16307	12520	12505	
Число узлов	10622	10874	9485	9470	

Информация о топологии полученной сетки

Поверхность несферической оболочки

Габаритные размеры области: $475 \times 276 \times 236$. Отступ: $\delta = 1,31$.

На рис. 11 показана поверхность несферической оболочки, ее исходная поверхность, рис. 11,а, и фрагмент полученной сетки, рис. 11,б.

В табл. 2 приводится информация о топологии сетки и о времени ее построения.

Поверхность поршня

Габаритные размеры: 2554 \times 255 \times 254, отступ δ = 1,8

На рис. 12 показана поверхность поршня, ее исходная поверхность, рис. 12,а, и фрагмент сетки, рис. 12,б.

Из рис. 12 видно, что внутренние ячейки являются телами Вороного. Полученная сетка хорошо описывает границу области и линии ее излома.



Рис. 11. Поверхность несферической оболочки и фрагмент полученной сетки: а – исходная поверхность, б – фрагмент сетки

Таблица 2

			•		
Данные	е о сетке	После построе- ния диаграммы Вороного	После деления ячеек на новой границе	После удаления слоя внешних ячеек	После коррекции граничных ячеек
Информация	Число ячеек	9083	9586	6283	6283
о топологии сетки	Число граней	65506	68822	53525	42243
	Число узлов	55378	57462	49426	39843
Время построения, с		28,66	0,28	0,05	0,31

Информация о топологии полученной сетки



Рис. 12. Поверхность поршня и фрагмент полученной сетки: а – исходная поверхность, б – фрагмент полученной сетки

Заключение

В рамках данной работы были разработаны и реализованы алгоритмы построения трехмерных сеток на основе поверхностной сетки для методики ТИМ. С их помощью появилась возможность построения сеток в сложных трехмерных геометриях. В качестве перспектив развития можно рассмотреть вопрос улучшения качества сетки на основе диаграммы Вороного на границах, совместное применение обоих методов при построении сеток и распараллеливание этих алгоритмов.

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. № 3. С. 37–52.

2. Вороной Г.Ф. Собрание сочинений. Т. 2. – Киев: Изд-во АН УССР, 1952.

3. Шмелева А. К., Воропинов А. А., Новиков И. Г., Шурыгин А. В. Алгоритмы построения неструктурированных сеток с использованием быстрого поиска геометрической близости точек для методики ТИМ.// «Молодежь в науке». Сборник аннотаций десятой научно-технической конференции (г. Саров, 1–3 ноября 2011 г.), С. 195.

СЕКЦИЯ 2

Экспериментальная физика

Председатели секции:

В. С. Гордеев
Н. В. Житков
В. А. Раевский

БИБЛИОТЕКА ПОГРЕШНОСТЕЙ ХАРАКТЕРИСТИК РАСПАДА РАДИОНУКЛИДОВ

<u>Д. С. Барабанова</u>, Г. М. Жердев¹

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл. ¹АО «ГНЦ РФ – ФЭИ им. А. И. Лейпунского», г. Обнинск Калужской обл.

В 2012 г. в РФЯЦ-ВНИИЭФ был создан программный модуль CRYSTAL [1] расчета выгорания ядерного топлива и остаточного энерговыделения, используемый в расчетах реакторных установок, как на тепловых, так и на быстрых нейтронах. Особенностью модуля CRYSTAL является учет наработки в топливе полного множества нуклидов (более 1300) и возможность использования модуля, как в групповых расчетах реакторных установок, так и в расчетах по методу Монте – Карло.

Классы решаемых задач:

 нестационарный расчет изменения изотопного состава топливных ячеек в нейтронном потоке на стадии критичности;

 расчет нестационарного источника запаздывающих нейтронов прямым образом на основе данных по бета-распадам на стадии критичности;

• нестационарный расчет изменения изотопного состава и энерговыделения топливных ячеек отработанных ТВС;

• нестационарный расчет источников нейтронного и гамма-излучения для отработанных ТВС.

На рис. 1 показана сложность решаемой задачи на примере схемы изотопного преобразования ⁸⁶Kr, как его наработка зависит от ядер-предшественников и от ядер-потомков. Для нахождения концентраций изотопов решается жесткая линейная система дифференциальных уравнений методом Розенброка –Ваннера.

Немаловажным фактором при численном моделировании изменения изотопного состава является учет погрешностей ядерных данных, используемых в расчетах. В данной работе описывается методика создания библиотеки погрешностей ядерных данных по радиоактивным распадам. В качестве ее возможной основы для модуля рассматривается библиотека данных по радиоактивным распадам системы констант БНАБ [2], над сопровождением и развитием которой в течение многих лет работают в АО ГНЦ РФ – ФЭИ г. Обнинск. Библиотека широко используется в РФ. В докладе описываются методики получения распадных данных в формате БНАБ.

Цель работы – комплексно оценить погрешности радиационных характеристик, спектров проникающих излучений и остаточного энерговыделения топлива, а также проанализировать результаты и продемонстрировать применение этих данных в нейтроннофизических расчетах.

В работе использовались отечественная, американская, европейская и японская библиотеки, в которых данные хранятся в едином международном формате ENDF-6 [5]. Более подробно остановимся на отечественной библиотеке, рис. 2.

БНАБ – система константного обеспечения, аттестованная Государственной Службой Стандартных Справочных Данных России в качестве рекомендованных данных. Название появилось по первым буквам фамилий авторов: И. И. Бондаренко, М. Н. Николаев, Л. П., Абагян, Н. О. Базазянц. За рубежом ее называют ABBN (по алфавиту).



Рис. 1. Неявный характер связей между ядрами-потомками и ядрами предшественниками ⁸⁶Кг



Рис. 2. Структура библиотеки

Для обработки файлов оцененных данных была использована, разработанная ранее программа [6] на языке программирования ФОРТРАН под названием DECAPRO (**Deca**y **Pro**cessing). Она извлекает распадные данные файла MF = 8 и формирует таблицы распадных¹ данных в формате БНАБ с их погрешностями (см. рис. 2). Данные содержатся в главной таблице (MF = 90), таблицах спектров (MF = 91–94). Параллельно с данными формировались таблицы БНАБ, содержащие погрешности этих данных (MT = 81). Библиотека погрешностей была сформирована отдельно, так как предполагается что погрешности несущественно зависят от оценки.

В приведенных ниже табл. 1–4 представлены полученные программой таблицы распадных данных и их погрешностей для изотопов урана из ENDF/B7.

¹ Под термином «распадные данные» подразумеваются «данные по радиоактивным распадам».

Таблица 1

Пример полученной главной таблицы распадных данных для изотопов урана из библиотеки

NAM=U	LIB=ENDF	MF= 90	MT= 0	Z =	92.			
	LT = 44	LC= 12	LS= 12	LF =	(I4,A2,	E9.0,A1,51	E7.0,3E8	.0)
* A T1/2 2170 - 2.3500 2180 - 5.4500 2190 B 4.2000	BET/)-2s)-4s)-5s	A+ BETA-	ΙT	ALFA 100. 100. 100. 9.6800	SF	E-GAM	E-LEP	E-BAR 3.15560 3.78645 9.85680
2200 - 6.0000	-8s 50	•		50.		0.44200	0.44200	5.15000
2410 - 3.0000 2420 B 1.0080 S *	+2s +3s	100. 100. 0.38943	3			0.63333 3.633-2 3.633-2	0.63333 0.38943	

Таблица 2

Пример полученной главной таблицы погрешностей распадных данных для изотопов урана из библиотеки ENDF/B7

NAM=U		LIB=EN	NDF/ MI	F= 90	MT=	81	Ζ	=	92.						
	:	LT =	43 L(C= 12	LS=	12	LΓ	=	(I4,	A2,E	9.0,A	1,5E8.	0,3	3E8.0)	
* A	T1/2		BETA+	BE	TA-	I	Г	A	LFA		SF	E-GAN	1	E-LEP	E-BAR
2170	- 1.3500	-2s													
2180	- 1.3500	-4s													
2190	3 2.3500	-5s													4.000-2
	3						4	4.0	00-2						
2200	- 6.0000	-9s													
2220	- 7.0000	-7s													
2410	-	S													
2420	3 31	0.s										3.045-	-3 (0.10564	
	5			0.10	564							3.045-	- 3		
*															
*															

Таблица 3

Фрагмент полученной таблицы спектров гамма-квантов при распаде для изотопов урана U-235, U-236, U-237, U-238 из библиотеки ENDF/B7

NAM	1=U	l	LIB=ENDF/ 1	MF= 91 M	T= 1 Z =	= 92.			
LV *	=	10	LT = 210	LC= 34 L:	S= 9 LF =	= (I4,4(E)	9.4,E10.5))	
* .	Jam	ma yiel	.d						
*									
*		AAAM	Yield	AAAM	Yield	AAAM	Yield	AAAM	Yield
		2260.	0.1287554	2270.	0.8718529	2300.	0.1560781	2310.	1.9028733
			1.61892-2		0.1134015		3.09037-3		8.56304-2
	1	0.183300	7.84519-2	0.158000	2.80000-2	7.2200-2	6.00000-3	9.3000-3	7.9104-11
	2	3.0603-3	4.49498-3	0.209000	2.80000-2	8.1000-2	4.80000-6	1.5100-2	8.4480-10
	3	1.2960-2	1.27835-2	0.247000	0.2000000	0.154230	1.25000-3	1.8070-2	6.49700-4
	4	1.3328-2	1.64248-3	0.259000	3.00000-2	0.158180	7.00000-4	2.4330-2	3.84000-8
	5	1.6137-2	1.44541-2	0.310000	3.60000-2	0.221000	5.00000-7	2.5650-2	0.1460000
9	94							0.112089	1.67735-2
9	5							0.112336	3.33028-4
9	6							0.112377	3.83324-4
9	7-								

Таблица 4

Фрагмент полученной таблицы погрешностей спектров гамма-квантов при распаде для изотопов урана U-235, U-236, U-237, U-238 из библиотеки ENDF/B7

NA	U=M		LIB=	=ENDF/	′ MF	= 91	MT=	= 81	Z	=	92.						
LV *	= 1	.0	LT =	= 210	LC	= 34	LS=	= 9	LF	=	(I4,4	(E9	.4,E10.5))			
*	Gamm	na yiel	d														
*																	
*		AAAM	Σ	lield		AAAN	1	Yi	eld		AAAM		Yield		AAAM	Yiel	d
		2260.	2.6	52234-	-2	227	0.0	5.19	429-2	2	230	Ο.	8.33502-3	3	2310.	6.1419	96-2
			4.7	19429-	• 3		1	.20	203-2	2			1.74394-	4		4.2901	8-3
	1	2.0000-	42.	61512	-2 2	2.000	0-4	1.08	3462-	2 4	4.0000)-5	4.00000-	4 1.	0000-4	1.9844	4-11
	2	3.8135-	4 5.	61888	-4	2.000	0 - 4	1.08	3462-	2 5	5.0000)-4	1.10000-	62.	0000-4	2.1193	8-10
	3	1.2033-	-3 1.	17994	-3 2	2.000	0-4	3.96	5989-	2 3	3.0000)-5	7.00000-	52.	0000-4	1.5027	78-4
	4	7.5641-	•4 9.	68511	-5 3	2.000	0-4	1.28	3160-	2 3	3.0000)-5	5.00000-	55.	0000-5	1.2320	0-8
	5	1.3056-	•3 1.	15574	-3 3	2.000	0-4	1.31	590-	2 5	5.0000)-4	1.00000-	74.	0000-5	1.1863	33-2
	94													1.	1209-3	2.0560)3-3
	95													1.	1234-3	4.0821	13-5
	96													1.	1238-3	4.6986	54-5
	97-																

Аналогично обработаны библиотеки JEFF-3.11, JENDL-4.0 и получены таблицы в формате БНАБ, что позволяет произвести анализ данных, содержащихся в библиотеках.

Рассчитано среднее значение энерговыделения и разброс по оценкам. Величина разброса находится по следующей формуле:

Разброс =
$$\sqrt{\frac{\sum\limits_{k=1}^{N} (E_k - \overline{E})^2}{N}}$$
,

где N – число источников данных, \overline{E} – среднее значение, E_k – энерговыделение *k*-той оценки. Предполагается, что данные не коррелируют.

Из табл. 5 видно, что для большинства случаев разброс меньше погрешностей или они близки.

С гамма-квантами другая ситуация: разброс и погрешности близки, но зачастую разброс незначительно превышает погрешности – это выделено жирным шрифтом в табл. 6.

На рис. 3 показаны энергии частиц при распаде U-235 и Ba-107m по различным оценкам, и их погрешности. Из рис. За видно, что погрешности существенно превышают разброс, а на рис. Зб представлена обратная ситуация.

Изотоп	БНАБ	ENDF/B-7	JEFF-3.11	Среднее	Разброс	Погр. ENDF/B-7
TH30	4,747	4,745	4,747	4,7466	0,00095	0,01488
TH32	4,077	4,066	4,077	4,0734	0,00543	0,07319
U233	4,904	4,888	4,904	4,8988	0,00741	0,02897
U234	4,842	4,841	4,842	4,8416	0,00057	0,00882
U235	4,463	4,413	4,465	4,4470	0,02381	0,16485
U236	4,564	4,550	4,572	4,5619	0,00889	0,25289
U238	4,266	4,258	4,259	4,2608	0,00372	0,15945
NP37	4,863	4,866	4,860	4,8632	0,00253	0,04625
PU38	5,580	5,579	5,580	5,5795	0,00062	0,00775
PU39	5,237	5,237	5,238	5,2373	0,00032	0,01085
PU40	5,243	5,241	5,243	5,2424	0,00088	0,00728
PU41	1,200E-4	1,220E-4	1,226E-4	1,215E-4	1,112E-6	7,954E-7
PU42	4,973	4,973	4,973	4,9730	0,00025	0,01176
AM41	5,572	5,581	5,557	5,5702	0,00976	0,03201
AM2m	0,0252	0,0244	0,0248	0,0248	0,00032	0,00062
CM42	6,200	6,205	6,206	6,2038	0,00274	0,00562
CM43	5,940	5,926	5,940	5,9354	0,00682	0,13801
CM44	5,892	5,892	5,894	5,8924	0,00087	0,00818
CM45	5,448	5,475	5,448	5,4573	0,01285	0,02883
CM46	5,492	5,513	5,514	5,5064	0,01018	0,09104

Энергия, уносимая альфа-частицами при распаде актинидов, погрешности, МэВ на распад

Таблица б

Энергия	, уносимая гамма-квантами	при распаде актинидов,	погрешности, М	ИэВ на распад
---------	---------------------------	------------------------	----------------	---------------

Изотоп	БНАБ	ENDF/B-7	ЈЕ FF-3.11 Среднее		Разброс	Погр. ENDF/B-7
TH30	0,0013	0,0013	0,0013	0,0013	0,00002	0,00009
TH32	0,0012	0,0014	0,0012	0,0013	0,00007	0,00009
U233	0,0012	0,0011	0,0012	0,0012	0,00005	0,00011
U234	0,0015	0,0018	0,0015	0,0016	0,00017	0,00013
U235	0,1678	0,1642	0,1636	0,1652	0,00185	0,00163
U236	0,0012	0,0016	0,0012	0,0013	0,00018	0,00011
U238	0,0013	0,0013	0,0011	0,0012	0,00009	0,00014
NP37	0,0335	0,0321	0,0324	0,0327	0,00060	0,00071
PU38	0,0020	0,0019	0,0015	0,0018	0,00018	0,00013
PU39	0,0007	0,0004	0,0007	0,0006	0,00016	0,00003
PU40	0,0018	0,0018	0,0014	0,0016	0,00020	0,00013
PU41	1,650E-6	1,738E-6	1,711E-6	1,700E-6	3,681E-8	6,128E-08
PU42	0,0015	0,0015	0,0013	0,0014	0,00011	0,00011
AM41	0,0282	0,0263	0,0275	0,0273	0,00077	0,00036
AM2m	0,0050	0,0054	0,0042	0,0049	0,00050	0,00037
CM42	0,0014	0,0019	0,0014	0,0015	0,00025	0,00013
CM43	0,1330	0,1275	0,1332	0,1312	0,00263	0,00327
CM44	0,0013	0,0017	0,0012	0,0014	0,00023	0,00020
CM45	0,0939	0,0992	0,0938	0,0956	0,00254	0,00411
CM46	0,0028	0,0013	0,0030	0,0024	0,00075	0,00009



Рис. 3. Энергии частиц при распаде по различным оценкам, и их погрешности: a - U-235, б - Ba-107m

Таблица 7

Энергия, уносимая гамма-квантами при распаде изотопов, в расчете остаточного энерговыделения, МэВ на распад

Изотоп	БНАБ	ENDF/B-7	JEFF-3.11	JENDL-4.0	Среднее	Разброс	Погр. ENDF/B-7
Y-91	0,0036	0,0031	0,0031	0,0031	0,0032	0,00021	0,00048 (15 %)
Zr95	0,7370	0,7321	0,7328	0,7321	0,7335	0,00203	0,002300 (0,3 %)
Nb95	0,7670	0,7645	0,7645	0,7645	0,7651	0,00109	0,00006 (0,01 %)
Ru03	0,4840	0,4958	0,4961	0,4960	0,4930	0,00518	0,00609 (1,2 %)
Rh06	0,2090	0,2061	0,2043	0,2060	0,2063	0,00169	0,00260 (1,3 %)
Cs34	1,5540	1,5544	1,5554	1,5544	1,5546	0,00053	0,00085 (0,05 %)
Ba7m	0,5970	0,5972	0,5984	0,5948	0,5969	0,00130	0,00093 (0,16 %)
Ba40	0,1830	0,1822	0,1802	0,1820	0,1818	0,00105	0,00123 (0,68 %)
La40	2,3150	2,3083	2,3126	2,3080	2,3110	0,00294	0,00389 (0,17 %)
Ce41	0,0766	0,0766	0,0765	0,0767	0,0766	0,00007	0,00047 (0,62 %)
Pr44	0,0318	0,0289	0,0338	0,0289	0,0308	0,00207	0,00036 (1,2 %)
Cm42	0,0014	0,0019	0,0014		0,0015	0,00025	0,00013 (7 %)

Для дальнейшего анализа был выбран набор изотопов, дающих более 1 % в остаточное энерговыделение одного из вариантов тестовой модели быстрого реактора¹.

Как и в предыдущих случаях, погрешности либо больше, либо соизмеримы с разбросом. Это видно из табл. 7, кроме некоторых случаев и радикально малых приписанных погрешностей (Nb-95, Cs-134).

Предлагается принять для данных средние значения. А для погрешностей – наиболее консервативную оценку (наибольшую). В случаях, когда разброс больше погрешностей, для погрешностей можно принять величину разброса.

В системе СКАЛА, разработки АО ГНЦ РФ ФЭИ, энерговыделение считается модулем SOURCE. В этом модуле расчет энерговыделения выполняется процедурой «PhotonEnergy». Модификация системы для расчета погрешностей заключалась в усовершенствовании именно этой процедуры. Расчет производится на основе данных о погрешностях MT = 81. Специально написанная процедура «FPyelds» считывает данные по погрешностям выходов продуктов деления при делении для учета компоненты погрешностей от концентраций.

В качестве примера рассматривается остаточное энерговыделение в топливе, выгруженном из быстрого реактора после отработки, в установившемся режиме перегрузок на 5-й год и выдержки 35 дней на время перегрузки.

Остаточное энерговыделение по изотопам оценивалось по данным, полученным в ФЭИ, В. Г. Проняевым и А. В. Игнатюком, и, приведенным в табл. 8. Оценивались доли, вносимые в погрешность каждым изотопом. Отдельно оценивались вклады в локальное энерговыделение (Z), отдельно – в переносное (Gam). Учитывались также погрешности «полураспада».

¹ Здесь и далее под термином «быстрый реактор» подразумевается тестовая модель реактора на быстрых нейтронах.
Вклады в погрешность энерговыделения изотопов на основе погрешностей констант энерговыделения и погрешностей периодов полураспада (на основе долей вкладов из теста)

	ФЭИ				ENDF/B7			
Изотоп	Константная составляю- щая, %		С учетом «полураспад- ной» составляющей, %		Константная состав- ляющая, %		С учетом «полурас- падной» составляю- щей, %	
	Z	Gam	Z	Gam	Z	Gam	Z	Gam
Y-91	0,01	1,05	0,01	1,05	0,01	0,69	0,01	0,69
ZR-95	0,17	0,09	0,17	0,09	0,06	0,03	0,06	0,03
NB-95	0,05	0,001	0,05	0,003	0,05	0,001	0,05	0,003
RU-103	0,22	0,24	0,22	0,24	0,18	0,10	0,18	0,10
RH-106	0,71	0,63	0,76	0,68	0,19	0,28	0,20	0,31
CS-134	0,05	0,02	0,05	0,02	0,01	0,001	0,01	0,001
BA-137m	0,12	0,01	0,12	0,01	0,01	0,002	0,01	0,002
BA-140	0,07	0,01	0,07	0,01	0,18	0,01	0,18	0,01
LA-140	0,07	0,01	0,07	0,01	0,20	0,01	0,20	0,01
CE-141	0,03	0,02	0,03	0,02	0,04	0,01	0,04	0,01
PR-144	0,05	0,15	0,06	0,15	0,05	0,14	0,06	0,14
CM-242	0,03	0,39	0,03	0,39	0,04	0,27	0,04	0,27
Суммарно	0,89	1,49	0,93	1,52	0,44	0,91	0,45	0,93

Результаты из ENDF/B7 хорошо согласуются с полученными ФЭИ, что говорит о правильности нашего подхода. Но иногда результаты расчета отличаются на порядок (Ba-137m, Cs-134), это объясняется тем, что оценки экспертов более консервативны по сравнению с оценкой ENDF/B7, но в целом достаточно близки.

Также были проведены дополнительные расчеты остаточного энерговыделения и его погрешностей для той же тестовой модели быстрого реактора. Из графика на рис. 4, видно, что погрешность на 2 порядка ниже, чем энерговыделение, и практически не меняется. На графике рис. 5 для важного периода около суток погрешность невысока и не сильно меняется, в дальнейшем растет и претерпевает резкие изменения. Это связано с накоплением продуктов деления, данные по которым менее известны. Также сравнивались различные оценки энерговыделений по отношению к БНАБ. Из графика на рис.6 видно, что результаты по данным ENDF/B7 и JEFF-3.11 отличаются менее чем на 1 %, в то время как разница с БНАБ может отличаться более чем на 3 %. Это связано с отсутствием в БНАБ данных о короткоживущих изотопах.

Эксперимент «Вспышка» много лет назад был произведен японцами и недавно перепроверен снова. Из представленных ниже графиков (рис. 7 и рис. 8) видно, что результаты расчетов, сделанные в рамках настоящей работы, несущественно отличаются от результатов других авторов и для времен более 10 секунд выдержки совпадают с экспериментом в пределах погрешностей как для U-235, так и для Pu-239.



Рис. 4. Зависимость энерговыделения и абсолютной погрешности от времени выдержки разных оценок



Рис. 5. Зависимость относительной погрешности от времени выдержки разных оценок



Рис. 6. Зависимость энерговыделений и разницы в оценках энерговыделений от времени выдержки



Рис. 7. Сравнение величины остаточного энерговыделения бенчмарк-экспериментов с расчетными значениями в области времени выдержки от 1 до 10⁵ секунд для U-235



Рис. 8. Сравнение величины остаточного энерговыделения бенчмарк-экспериментов с расчетными значениями в области времени выдержки от 1 до 10⁵ секунд для Pu-239

Заключение

 Освоена технология получения погрешностей характеристик распада радионуклидов в формате БНАБ.

• Протестирована программа перевода распадных данных из формата ENDF-6 в формат БНАБ, получены таблицы в формате БНАБ для большого числа нуклидов (обработаны данные 3-х национальных библиотек).

• На основе полученной методики создания библиотеки погрешностей ядерных данных по радиоактивным распадам предполагается создание аналогичной библиотеки в рамках системы константного обеспечения РФЯЦ-ВНИИЭФ с дальнейшей привязкой ее к модулю CRYSTAL.

• Рассчитано энерговыделение и его погрешности для тестовых моделей по системе СКАЛА/БНАБ (ФЭИ), выполнен анализ и сравнение результатов с другими авторами и экспериментами.

Литература

1. Мжачих С. В., Алексеев А. В., Гребенников А. Н., Гусев Е. А., Ермаков А. А., Ириничев Е. А., Касаткин С. С., Крутько Н. А. Расчет изотопного состава реакторных установок при моделировании процессов выгорания и остаточного энерговыделения ядерного топлива в программном комплексе CONCORD // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Математическое моделирование физических процессов. 2014. Вып. 1. С. 49–64.

2. Забродская С. В., Николаев М. Н., Цибуля А. М. Библиотека распадных данных и выходы продуктов деления в системе константного обеспечения БНАБ-93 // Вопросы Атомной Науки и Техники. Сер. Ядерные Константы. Вып. 2, 2000.

3. Жердев Г. М. SKALA – The computing system for an estimation of nuclear and radiation safety // Proc. Int. Conf. «M&C 2005», Avignon, France, September 12–15, 2005, on CD-ROM – sect. 315.

4. Власкин Г. Н., Жердев Г. М., Рогожкин В. Ю., Николаев М. Н. и др. Расчет интенсивности источников радиационных излучений (программа SOURCE) // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов, 2002, вып. 4. С. 39–60.

5. Trkov A., Herman M., Brown D. A. ENDF-102, ENDF-6 Formats Manual, Data Formats and Procedures for the Evaluated Nuclear Data Files ENDF/B-VI and ENDF/B-VII. BNL-90365-2009 Rev. 2, Nov. 2011.

 Барабанова Д. С., Жердев Г. М. Библиотека погрешностей характеристик распада радионуклидов в системе констант БНАБ // Известия высших учебных заведений, Ядерная Энергетика, 2015, № 1. С. 150–156.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ИНЖЕКЦИИ РЕЗОНАНСНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ БЕТА-8

А. Н. Беляев, А. М. Опекунов, А. В. Тельнов, И. В. Шориков

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

Аннотация

В РФЯЦ-ВНИИЭФ создается мощный резонансный ускоритель электронов БЕТА-8 [1] на основе коаксиального полуволнового резонатора. Значения выходной средней энергии электронов – 1,5; 4,5; 7,5 МэВ; максимальная средняя мощность пучка – 300 кВт.

Работа включает расчетные исследования параметров пучка до и после одного прохода в коаксиальном резонаторе ускорителя БЕТА-8. Определены оптимальные фазы эмиссии электронных сгустков в инжекторе и приемлемые фазы инжекции в резонатор ускорителя, при которых наблюдается минимальный энергетический разброс в электронных сгустках после ускорения, а также минимальные потери тока на всех участках ускорения.

Введение

Электронный ускоритель БЕТА-8 разработан на основе коаксиального полуволнового резонатора (тип колебаний Т₁, частота 100 МГц). Принцип ускорения основан на многократном прохождении электронного пучка через ускоряющие зазоры резонатора в медианной плоскости, где полностью отсутствует магнитная компонента ВЧ поля [2, 3]. Такой резонатор образован из коаксиального волновода длиной λ/2, закороченного с обоих концов, где λ – длина волны. Фактически пучком совершается N проходов через один резонатор с ускоряющим напряжением U, приводящих к увеличению энергии электронов пропорционально U · N. Радиальная компонента электрического поля E_r имеет свой максимум в серединной поперечной плоскости резонатора, а азимутальная компонента магнитного поля В_α в этой же плоскости равна нулю (рис. 1,а). Пучок вне полости резонатора возвращается в область ускорения при помощи поворотных магнитов, за счет чего обеспечивается его ускорение до заданной энергии (рис. 1,б). Ускоритель рассчитан на получение трех значений средней энергии электронов: 1.5; 4.5 и 7.5 МэВ, с максимальной средней мощностью пучка до 300 кВт.

Основной частью инжектора электронов является сеточно-управляемая термокатодная ВЧ пушка на основе высокочастотного четвертьволнового коаксиального резонатора, с резонансной частотой 100 МГц. В табл. 1 приведены основные характеристики ВЧ инжектора.



Рис. 1. Принцип ускорения: а – аксиальное сечение; б – серединное поперечное сечение ускоряющего коаксиального резонатора; Т – траектория пучка; \vec{B} и \vec{E} – компоненты поля; D – отклоняющий магнит

Г	я	б	Π	и	П	а	-1
L	u	v	11	r1	ц	u	-

Основные характеристики ВЧ инжектора

Параметр	Значение
Максимальный средний ток ВЧ инжектора, мА	40
Максимальная энергия электронов, кэВ	100
Длительность сгустков, нс	0,5–1
Максимальная частота повторения, МГц	100
Средняя ВЧ мощность генератора, кВт	16
Допустимый рабочий вакуум, Па	10^{-4}

Принцип работы ВЧ инжектора [4] состоит в том, что сеточно-катодный узел, расположенный непосредственно в ВЧ резонаторе, выпускает электронные сгустки определенной длительности и в определенной фазе ВЧ ускоряющего поля в резонаторе. Определенную длительность сгустков и привязку их к фазе ВЧ поля в резонаторе обеспечивает модулятор сеточно-катодного узла, создающий импульсы отпирающего напряжения.

На рис. 2 представлено схематическое изображение резонатора ВЧ инжектора.

Из-за высокой проектной средней мощности электронного пучка необходимо минимизировать потери электронов на стенках резонатора и в каналах транспортировки пучка. Расчеты динамических параметров электронного пучка в первую очередь должны выявить проблемные места предлагаемой схемы транспортировки и помочь оптимизировать потери тока в процессе ускорения.



Рис. 2. Схематичное изображение резонатора ВЧ инжектора с силовыми линиями ускоряющего ВЧ поля: 1 – корпус резонатора; 2 – цилиндрический электрод; 3 – термокатодный узел; 4 – фокусирующий электрод; 5 – торцевая стенка резонатора с анодным отверстием; 6 – устройство оперативной перестройки частоты резонатора; 7 – устройство фиксации электрода и предварительной настройки частоты резонатора

1. Численное моделирование электронного пучка ВЧ инжектора

1.1. Модель резонатора ВЧ инжектора

Чтобы определить динамические параметры электронных сгустков, генерируемых ВЧ инжектором, необходимо знать распределение электрического и магнитного полей в области резонатора инжектора, в которой происходит формирование, ускорение и фокусировка эмитируемых с катода частиц. Для решения этой задачи была создана трехмерная компьютерная модель, с учетом реальной геометрии основных элементов электронно-оптической системы. Геометрия такой модели обладает аксиальной симметрией (рис. 3).

Перед запуском решения задачи, связанной с нахождением собственных значений резонансных частот и соответствующих им распределений электромагнитных полей, производится сеточное разбиение геометрии модели; в зависимости от предполагаемой точности расчета устанавливается шаг сетки.



Рис. 3. Трехмерная модель резонатора ВЧ инжектора

Амплитуды напряженности электрического и магнитного полей зависят от запасенной в объеме резонаторной области энергии. При амплитуде напряжения на ускоряющем зазоре 100 кВ требуется наличие электромагнитной энергии, запасенной в объеме резонатора за один период изменения поля, равной 0,1368 Дж. На рис. 4 представлено расчетное распределение продольной компоненты напряженности электрического поля в резонаторе инжектора, взятое на его продольной оси в ускоряющем зазоре.



Рис. 4. Расчетное распределение продольной компоненты напряженности электрического поля в ускоряющем зазоре ВЧ резонатора

1.2. Моделирование эмиссии частиц с катода

В моделировании была принята Гауссова эмиссионная модель, представляющая собой такое распределение, при котором заряженные частицы эмитируются с катода с начальной скоростью, определяемой кинетическими параметрами. Модель является Гауссовой в том смысле, что испускаемый заряд каждого импульса представляет собой кривую распределения Гаусса как функцию от времени. Причем имеется возможность устанавливать различные параметры импульса (или группы импульсов), такие как полный заряд каждого импульса, ширину импульса или временного интервала между двумя последовательными импульсами.

В принятой Гауссовой модели распределения форма импульса тока источника заряженных частиц зависит от параметра «sigma» и от времени эмиссии. Зависимость формы импульса тока от параметра «sigma» представлена на рис. 5. Начиная с некоторого значения «sigma», форма этого импульса принимает вид «ступеньки».



Рис. 5. Смоделированный эмиссионный ток с катода

1.3. Расчеты динамики пучка электронов ВЧ инжектора

В процессе моделирования принимается то, что с поверхности катода постоянно и равномерно эмитируются 275000 макрочастиц, равномерно вылетающих в интервале времени 1 нс с поверхности катода.

Основные задачи, которые необходимо решить при моделировании сгустков катодного узла – это оптимально подобрать фазу и амплитуду ускоряющего поля в резонаторе, при которых обеспечивается заданный заряд в сгустке и минимальный энергетический разброс.

Численные расчеты динамики пучка в поле ускоряющего зазора ВЧ инжектора в разных режимах ускорения проводились с учетом действия импульсных отпирающих напряжений, подаваемых на катод. Импульсы приходят в момент роста ВЧ напряжения на зазоре в интервале фаз (0–90) градусов при амплитуде напряжения на зазоре 100 кВ.

Участок инжекции электронов в коаксиальный резонатор ускорителя БЕТА-8 показан на рис. 6. В этом варианте ВЧ инжектор расположен так, что катод находится на расстоянии 840 мм от внутренней стенки резонатора ускорителя, соленоид (поз. 5) расположен от катода на расстоянии 500 мм и квадрупольная линза (поз. 6) – 700 мм.

Вследствие действия пространственного заряда поперечный размер сгустков растет после выхода из ускоряющего зазора резонатора ВЧ инжектора. В случае отсутствия фокусировки, на апертуре входного отверстия ускорителя, находящемся на расстоянии 840 мм от плоскости катода, будет задерживаться до 30 % частиц. Для того чтобы все частицы проходили в ускоритель, должна быть обеспечена фокусировка пучка соленоидом.

На рис. 7 показано изменение поперечных размеров пучка в процессе его транспортировки в канале инжекции, когда соленоид помещен на расстоянии 500 мм от плоскости катода. Пучок имеет кроссовер на расстоянии 800 – 850 мм от катода, т.е., можно сказать, внутри ускорителя. Дальнейшая фокусировка пучка производится ускоряющим ВЧ полем резонатора ускорителя.



Рис. 6. Схема участка инжекции ускорителя БЕТА-8: 1 – резонатор инжектора; 2 – катодный узел с фокусирующим электродом; 3 – высоковакуумный магниторазрядный насос;
4 – высоковакуумный шибер; 5 – фокусирующий соленоид;
6 – магнитная квадрупольная линза; 7 – коаксиальный резонатор ускорителя

Из-за различия поперечных составляющих электрического ВЧ поля резонатора ускорителя вдоль траектории пучка [1], влияние их на пучок в вертикальной (вдоль оси резонатора) и в горизонтальной (медианной) плоскостях различаются. Для лучшей фокусировки пучка внутри ускорителя применяется квадрупольная линза, расположенная непосредственно перед входным отверстием ускорителя. Квадрупольная линза будет фокусировать пучок по вертикали и дефокусировать по горизонтали. Дефокусировка не должна компенсировать полностью горизонтальную фокусировку в электрическом поле ускорителя.

На рис. 8 приведены расчетные параметры сгустков на выходе из ВЧ инжектора, а на рис. 9 – расчетные параметры сгустков на входе в резонатор ускорителя.



Рис. 7. Расчетное изменение среднеквадратичного поперечного размера пучка на участке дрейфа 2 м от катода



Рис. 8. Расчетные параметры сгустков на выходе из ВЧ инжектора: а – распределение по энергии в сгустке; б – продольный профиль сгустка; в – поперечный профиль сгустка

Основываясь на проведенном анализе результатов расчетов, можно сделать выводы:

 максимальное значение энергии электронов в сгустке 100 кэВ достигается при фазе эмиссии 55° (табл. 2). Это так называемый рабочий режим ВЧ инжектора;

• при значении фазы эмиссии 55° энергетический разброс в сгустке на входе в ускоряющий резонатор имеет значение 25 кэВ (рис. 9,а). Минимальное значение в 5,5 кэВ наблюдается при фазе 31°. Распределение энергии частиц вдоль сгустка имеет форму верхней части косинусоиды, при этом максимум в распределении энергии частиц вдоль сгустка смещается от центра в сторону его «хвоста» (рис. 9,а);

• ВЧ инжектор позволяет осуществить продольную группировку сгустков путем уменьшения фазы эмиссии от рабочего режима. «Хвост» сгустка, имеющий частицы с большей энергией, будет догонять головную часть сгустка. Таким образом, длина сгустков будет сокращаться (рис. 8,6 и 9,6). Так, на входе в ускоритель, при фазе эмиссии 31°, длина сгустка 150 мм, по сравнению с 240 мм при фазе 55°;

 поперечные размеры электронного сгустка увеличиваются с уменьшением фазы эмиссии (рис. 9,в) по сравнению с рабочей фазой (55°). Так при фазе в 55°



Рис. 9. Расчетные параметры сгустков на входе в резонатор ускорителя: а – распределение по энергии в сгустке; б – продольный профиль сгустка; в – поперечный профиль сгустка

поперечный размер сгустка на входе в ускоряющий резонатор 11×9 мм, при фазе $31^{\circ} - 14 \times 12$ мм (табл. 2), однако, эти размеры не превышают апертуру канала инжекции в резонатор. Неоднородность в радиальном направлении поперечного профиля сгустка обусловлена действием фокусирующего поля квадрупольной линзы (рис. 9,в).

Для удобства, расчетные параметры сгустков сведены в табл. 2.

Таблица 2

Расчетные параметры	сгустка ВЧ инжектор	а
---------------------	---------------------	---

	Значение					
Параметр	На вых инже	коде ВЧ ктора	На входе в уско- ряющий резонатор			
Фаза эмиссии сгустков	55°	31°	55°	31°		
Максимальная энергия электро- нов в сгустке, кэВ	102,5	99	102,5	99		
Энергетический разброс, кэВ	22,5	5	25	5,5		
Продольный раз- мер сгустков, мм	170	150	240	150		
Поперечный раз- мер сгустков, мм	7,6	9,6	11 × 9	14×12		

2. Расчет динамики движения электронов внутри резонатора ускорителя

В расчетах определялась энергия электронов, энергетический разброс и размеры сгустка после однократного прохода через резонатор ускорителя при значении энергии инжекции 100 кэВ. Данные параметры рассчитывались для электронов, инжектируемых в ускоряющий резонатор в моменты времени, соответствующие фазам ВЧ поля в диапазоне от –90° до +90°, с шагом в 1°.

На рис. 10 представлены расчетные зависимости выходной энергии электронов, энергетического разброса и продольного размера сгустка от фазы ВЧ поля на входе электронов в ускоряющий резонатор (фаза инжекции).

Анализ результатов численного моделирования динамики пучка дает следующие результаты:

 функция зависимости энергетического разброса электронов в сгустке от фазы инжекции в ускоряющий резонатор имеет выраженный экстремум (рис. 10а). Так минимальный энергетический разброс в сгустке на выходе из ускорителя при фазе эмиссии в инжекторе 55° достигается при фазе инжекции –7° (141 кэВ), а при фазе эмиссии 31° достигается при фазе инжекции $+8^{\circ}$ (51 кэВ);

• во всем исследуемом диапазоне фаз эмиссии (31°–55°) электронов с катода инжектора, сгустки на выходе из ускорителя приобретают требуемую энергию за один проход в рассматриваемом диапазоне фаз инжекции в ускоритель (рис. 10б);

 продольные размеры сгустка увеличиваются с увеличением фазы инжекции как для фазы эмиссии 31°, так и для фазы эмиссии 55° (рис. 10в). Таким образом, для получения более коротких сгустков необходимо инжектировать электроны в ускоритель при меньших значениях фазы ВЧ поля в резонаторе ускорителя. Однако при фазе эмиссии 31°, сгустки на выходе из ускоряющего резонатора имеют меньшие продольные размеры по сравнению с фазой эмиссии 55° при прочих равных условиях.

Оптимальная фаза ВЧ поля в ускоряющем резонаторе – фаза в момент инжекции электронного пучка, при которой сгустки приобретают минимальный энергетический разброс, причем такой, чтобы в «крейсерском режиме работы ускорителя» на участках поворота обеспечивался энергетический разброс не более 6 % от средней энергии электронов [1].



Рис. 10. Расчетные зависимости выходных параметров сгустков от фазы инжекции в резонатор ускорителя: а – энергетический разброс в сгустке; б – максимальное значение энергии электронов; в – продольный размер сгустка

Согласно результатам моделирования (рис. 10), при фазе эмиссии 55° не удается достичь значения энергетического разброса электронов в сгустке менее 6% от средней энергии электронов. Данное обстоятельство накладывает ограничение по фазе эмиссии с катода ВЧ инжектора: необходимо уменьшать фазу эмиссии вплоть до оговоренного ранее значения в 31°. Лишь тогда можно удовлетворить требованию в получении энергетического разброса менее 6%.

Таким образом, уже на данном этапе исследования накладываются требования к режиму работы, как инжектора электронов, так и ускоряющего резонатора для обеспечения многопроходного режима и получения проектных параметров электронного пучка [1].

Расчетные параметры сгустков на выходе из резонатора ускорителя, удовлетворяющие требованию минимального энергетического разброса, представлены на рис. 11.



Рис. 11. Расчетные параметры электронных сгустков на выходе из ускоряющего резонатора (фаза эмиссии 31°, фаза инжекции 8°): а – распределение энергии в электронном сгустке; б – продольный профиль сгустка; в – поперечный профиль сгустка

В результаты численного моделирования определено что:

• оптимальная фаза инжекции, при которой достигается значение энергетического разброса в сгустке менее 6 % от средней энергии электронов в 1,5 МэВ, соответствует диапазону $0^{\circ}-15^{\circ}$. Причем минимальное значение энергетического разброса в сгустке (51 кэВ) соответствует фазе инжекции 8°;

 распределение энергии частиц вдоль сгустка имеет форму верхней части косинусоиды (рис. 11,а). Максимум в распределении энергии частиц вдоль сгустка смещается к центру при оптимальной фазе инжекции;

 поперечные размеры сгустка на выходе из ускорителя не превышают размеры апертуры пролетных отверстий в резонаторе ускорителя на всех этапах движения.

Заключение

Проведены численные расчеты динамики электронных сгустков ВЧ инжектора с учетом влияния объемного заряда. Подтверждено, что максимальная энергия электронов в сгустке (100 кэВ) достигается при фазе эмиссии 55°. Однако можно произвести продольное сжатие сгустков, выбрав фазу эмиссии меньше рабочей. Нижний предел рабочего диапазона фазы эмиссии ограничивается значением в 31°. При фазах эмиссии <31° заряд в сгустке начинает уменьшаться из-за того, что головные частицы сгустка начинают эмитироваться в отрицательной фазе и не могут вылететь за управляющую сетку ВЧ пушки.

Проведены расчетные исследования динамических параметров пучка на выходе из ускоряющего резонатора БЕТА-8 при однопроходном режиме работы. Определены оптимальные фазы эмиссии электронных сгустков в инжекторе и приемлемые фазы инжекции в резонатор ускорителя, при которых наблюдается минимальный энергетический разброс в сгустках после первого этапа ускорения. Во всем исследуемом диапазоне фаз эмиссии (31°–55°) электронов с катода инжектора сгустки на выходе из ускоряющего резонатора приобретают требуемую энергию (1,5 МэВ) за один проход.

Накладывая дополнительные условия на параметры электронных сгустков (энергетический разброс в сгустке не должен превышать 6 % от средней энергии электронов), выдвигаются требования к режиму работы, как инжектора электронов, так и резонатора ускорителя для обеспечения возможности многопроходного режима. Установлено, что выполнение таких требований к величине энергетического разброса после первого этапа ускорения, возможно лишь при фазе эмиссии электронов в ВЧ инжектор меньше рабочего в 55° (рис. 10). Так, для фазы эмиссии 31° это условие выполняется при фазах инжекции 0°–15°. Минимальный энергетический разброс (51 кэВ) соответствует фазе инжекции 8°.

На данном этапе исследований можно сказать, что определены такие режимы работы ускорителя, при которых параметры электронных сгустков после первого этапа ускорения позволят в дальнейшем осуществить пятипроходный вариант ускорения практически без потерь тока в стенках резонатора.

Литература

1. Гладышев Е. Н., Гордеев В. С., Завьялов Н. В., Кузнецова Н. Н. и др. Состояние работ по проекту создания электронного резонансного ускорителя непрерывного действия БЕТА-8 // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. Сер. Научно-исследовательское издание. 2015. Вып. 20. Ч. 1. С. 184–193.

2. Pottier J. A new type of RF electron accelerator: the Rhodotron // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. 1989. Vol. B40/41. P. 943–945.

3. Jongen Y., Abs M., Delvigne T., Herer A. et.al. Rhodotron Accelerators for Industrial Electron-beam Processing: a Progress Report // EPAC96. 1996. P. 2687.

4. Volkov V. N., Arbuzov V. S., Chernov K. N., Kurkin G. Ya. et. al. CW 100 keV electron RF injector for 40 mA average beam current // Proceeding of XXIV Russian Particle Accelerator Conference RUPAC. 2014. P. 309–311.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ КАЛИБРОВКИ ГАММА-ДЕТЕКТОРОВ В УСТАНОВКАХ МЕЧЕНЫХ НЕЙТРОНОВ

Р. Р. Бестаев

ФГУП «ВНИИА им. Н. Л. Духова», Москва

Введение

Метол меченых нейтронов нейтронно-_ радиационный метод исследования элементного состава вещества, в основе которого лежит взаимодействие 14МэВ нейтронов с веществом (рис. 1) [1, 2]. Нейтроны образуются при бомбардировке тритиевой мишени нейтронного генератора ускоренными ионами дейтерия. В результате реакции T(d, n) He⁴ совместно с нейтронами образуются альфа-частицы. Угол разлета нейтронов и альфа-частиц имеет фиксированное значение, близкое к 180°. Взаимодействие испущенных нейтронов с исследуемым образцом инициирует характеристическое ответное гамма-излучение. Регистрация альфа-частицы позиционно-чувствительным альфа-детектором определяет время t_{start} и направление испускания нейтрона. Таким образом, нейтрон становится меченым. Размеры альфа-детектора и его расположение относительно мишени определяют телесный угол вылета меченых нейтронов. В аппаратуре регистрации заложена процедура временного слежения ответного гамма-излучения после момента инициирования нейтрона t_{start}. Размеры альфа-детектора, его положение относительно мишени и временное окно слежения определяют область исследуемого пространства (инспектируемый воксель).



Рис. 1. Схема измерениямечеными нейтронами

Взаимодействие нейтронов с ядрами исследуемого вещества приводит к испусканию активационного гамма-излучения с характеристической для данного вещества энергией. Регистрация этого излучения позволяет провести элементный анализ вещества. В установках меченых нейтронов для регистрации ответного излучения применяются сцинтилляционные гамма-детекторы в силу их высокой эффективности регистрации по сравнению с другими типами детекторов. Измерение на установке меченых нейтронов сопровождается регистрацией фона случайных совпадений. Фон случайных совпадений представляет собой зарегистрированные сигналы на гамма-детекторе во временном окне слежения, источником которых не являются ядерные реакции меченых нейтронов с ядрами инспектируемого вещества.

На рис. 2 представлены характерные спектры измерения методом меченых нейтронов образца полиэтилена в течение 3 часов. Можно выделить области фона случайных совпадений и ответного гамма-излучения образца время пролетного спектра. Области подъема и спада времяпролетного спектра вне временного окна слежения связаного со спецификой работы аппаратуры. Фон случайных совпадений вычитается из интересующей области отклика образца. Энергетический спектр полиэтилена имеет характерный пик полного поглощения в области 4,44 МэВ и пик первого аннигиляционного вылета. Спектр фона случайных совпадений содержит линии элементов (алюминий, углерод, кислород и др.), окружающих установку. Для представленного примера статистика спектра случайных совпадений в 30 раз превосходит статистику спектра образца.

Метод меченых нейтронов получил применение в различных областях техники: обнаружение взрывчатых веществ в багаже, поиск неразорвавшихся боеприпасов в грунте и на морском дне, поиск алмазов в горной породе [3, 4].

Существующие методы температурной стабилизации отклика гамма-детектора

При эксплуатации сцинтилляционных гаммадетекторов необходимо учитывать зависимость световыхода и времени высвечивания кристалла от температуры. При изменении температуры кристалла от 0 до 40 °C длительность сцинтилляционной вспышки детектора BGO уменьшается от 400 до 200 нс, а световыход падает более, чем в два раза [5]. Значение температурного коэффициента изменения световыхода зависит от типа и качества кристалла и лежит в интервале от 0.1 до 2 % °C (наибольшие значения для детектора BGO) [6]. Температурный эффект без специальных мер компенсации приводит к неверной калибровке и значительному повышению погрешности результатов.



Рис. 2. Спектры метода меченых нейтронов: а – времяпролетный, б – энергетические

Были предприняты различные подходы к разработке алгоритма обработки данных измерения, учитывающего температурную зависимость световыходагамма-детектора. В досмотровом комплексе EURIT-RACK [7] реализована автоматизированная калибровка гамма-детектора по характерным линиям спектра образца. Такой подход имеет ряд недостатков: статистика небольших образцов может быть недостаточной для точной калибровки, характерные линии спектра могут иметь низкую интенсивность по сравнению с комптоновской подложкой для точной калибровки.

В досмотровой системе SENNA [8] реализован алгоритм автоматизированной калибровки по характерным линиям спектра фона случайных совпадений. Регистрация фона случайных совпадений в методе меченых нейтронов является сопутствующим процессом каждого измерения. Использование этого спектра целесообразно из-за его высокой статистики (по сравнению со спектром образца). Калибровка осуществляется по характерным линиям железа и углерода - веществ, используемым в конструкции установки. В досмотровой системе УВП-1103 [9] реализован двухэтапный алгоритм калибровки. На первом этапе по спектру фона случайных совпадений проводится «грубая» калибровка. На втором этапе по характерным линиям кислорода и кремния в спектре фона случайных совпадений рассчитываются коэффициенты калибровки. Таким образом, для реализации алгоритма требуется наличие в установке маркерных элементов (кислород и кремний). Данные подходы имеют недостаток, связанный с возможным наложением на интересующие линии углерода и железа (SENNA) или кислорода и кремния (УВП-1103) линий меди, цинка, кальция и других элементов, содержащихся в окружающих установку конструкциях, что приведет к повышению погрешности калибровки.

Автоматическая система компенсации температурного изменения световыхода была реализована в установке PELAN [10]. Постоянство отклика детектора достигалось за счет изменения коэффициента усиления канала регистрирующей электроники в зависимости от температуры кристалла с учетом измеренной зависимости его световыхода [11]. Точность стабилизации отклика в данном методе составила 7 % при изменении температуры от −5 до 45 °C. Недостатком данного способа является методическая сложность. Она заключается в необходимости проведения предварительных климатических исследований и вычисления поправочной функции, а также в необходимости измерения температуры детектора при эксплуатации установки меченых нейтронов. Кроме того, данный способ не является универсальным по отношению к различным типам сцинтилляторов. Зависимость световыхода от климатических условий специфична для типа сцинтиллятора. Поэтому использование различных детекторов гаммаизлучения потребует методического сопровождения для каждого детектора. Известен метод компенсации климатических эффектов на основе амплитудной поправки [12]. В этом методе температурная поправка реализуется на программном уровне: с помощью поправочной функции пересчитываются значения зарегистрированных амплитуд откликов. При этом методическая сложность реализации сохраняется. Температурная компенсация отклика на основе амплитудной поправки реализована в досмотровом комплексе ДВиН [13]. Погрешность стабилизации в данной установке составляет 1 % в диапазоне температур от 16 до 30 °С [12].

Существующие подходы автоматизации калибровки, учитывающие изменения температуры детектора, имеют ряд ограничений, связанных с точностью и методической сложностью реализации.

Алгоритм калибровки гамма-детекторов на основе спектра случайных совпадений

Спектр – это дискретное представление числа отсчетов по шкале каналов Asc или энергий Esc. Подготовительным этапом алгоритма калибровки является предварительное измерение энергетического спектра фона случайных совпадений высокой статистики (стандартный спектр). Статистика стандартного спектра должна быть на порядок выше статистики спектров, набираемых в ходе рутинных измерений. Для этого спектра следует реализовать кусочно-линейную интерполяцию (вид интерполяции, при которой значения между соседними дискретными точками спектра задается отрезком, соединяющим эти точки) и, таким образом, определить кусочнолинейную <u>функцию случайных совпадений</u> F(E). Под функцией здесь понимается непрерывное представление числа отсчетов для значения энергии Е.

При эксплуатации установки в ходе каждого измерения определяется аппаратный спектр фона случайных совпадений R(Asc).Для пересчета аппаратного спектра в энергетический спектр требуется знать значения коэффициентов калибровки. Алгоритм вычисления коэффициентов калибровки гаммадетекторов основан на аппроксимации измеренного спектра R(Asc) функцией F(E) (1). Результатом аппроксимации являются коэффициенты (k, b) пересчета каналов аппаратного спектра в энергию, которые представляют собой коэффициенты калибровки.

$$\sum_{i} \left(R_{i} - F\left(k \cdot Asc_{i} + b\right) \right)^{2} \to \min,$$
(1)

где, Asc – шкала аппаратного спектра в каналах, F – функция энергетического спектра случайных совпадений, R – аппаратный спектр фона случайных совпадений, k, b – коэффициенты аппроксимации.

В связи с тем, что температурные условия эксплуатации установки могут отличаться от условий измерения стандартного спектра, перед аппроксимацией требуется определить нижнюю и верхнюю границы аппаратного спектра, в пределах которых следует проводить аппроксимацию. Эта процедура необходима в силу смещения аппаратного спектра вдоль шкалы при изменении температуры регистрирующей аппаратуры.

Расчет верхней и нижней границы аппаратного спектра основан на сопоставлении статистики аппаратного спектра R и функции случайных совпадений F. Статистика спектра представляет собой нормированное число зарегистрированных отсчетов и задается формулой:

$$S = \frac{Nt}{I^2 \Delta \tau},\tag{2}$$

где, N – число зарегистрированных отсчетов во временном окне фона, t – время измерения, I – число испущенных генератором нейтронов во время измерения (определяется по числу зарегистрированных альфа-частиц), $\Delta \tau$ – ширина временного окна фона случайных совпадений.

Далее вычисляется параметр невязки:

$$p_S = \frac{S_1 - S_2}{S_1},\tag{3}$$

где S_1 , S_2 – статистика стандартного спектра и аппаратного спектра соответственно. Параметр невязки является количественной оценкой изменения статистики за счет смещения аппаратного спектра. В случае соответствия температур данного измерения и стандартного измерения статистики S_1 и S_2 равны, а невязка $p_S = 0$.

По параметру невязки рассчитывается нижняя граница аппаратного спектра:

$$L_{S2} = L(p_N = p_0 + p_S), \tag{4}$$

где L – значение нижней границы (в каналах) спектра фона случайных совпадений. Параметр p_0 вводится для устранения около пороговой области спектра, так как в близи порога спектра возможны значительные статистические флуктуации отсчетов (задается на уровне $p_0 = 10-20$ %). Условие вычисления нижней границы ($p_N = p_0 + p_s$) заключается в вычислении такого значения канала L, при котором доля отсчетов p_N спектра фона ниже этой границы L по отношению к общему количеству отсчетов станет равной доле $p_0 + p_s$. Таким образом, стандартный спектр охватывает более широкую область низкоэнергетических откликов.

Верхняя граница стандартного спектра определяется из условия отсечения некоторой доли высокоэнергетических откликов (на уровне 1 % от общего количества), не представляющих интерес. Верхняя граница спектра фона случайных совпадений определяется из условия отсечения не меньшей доли по сравнению со стандартным спектром высокоэнергетических откликов. Последнее условие связано с требованием обеспечения более широкого охвата откликов для стандартного спектра по сравнению со спектром фона случайных совпадений. Требование более широкого охвата откликов стандартного откликов стандартным спектром связано с обеспечением возможности сопоставления значений спектров при варьировании коэффициентов аппроксимации k, b.

На рис. 3 представлен пример аппроксимации спектра фона случайных совпадений для измерения длительностью 0,5 мин. Характерные линии и комптоновская подложка спектров удовлетворительно согласуются. Погрешность аппроксимации для данного примера составляет 0,14 % для коэффициента калибровки *k*.

Апробация алгоритма калибровки

Испытания автоматизированной системы калибровки гамма-детекторов проведены на досмотровой системе меченых нейтронов. Условия проведения испытаний представлены в табл. 1. Геометрия эксперимента представлена на рис. 4. Для испытания



Рис. 3. Аппроксимация спектра фона случайных совпадений стандартной функцией

выбраны четыре типа образцов, которые располагаются перед досмотровой системой в определенных инспекционных вокселях. В табл. 1 указаны номера вокселей, в которых располагаются образцы. Образцы размещены таким образом, что каждый из них находится в области одного инспектируемого вокселя. Для проведения испытания при низкой и высокой температурах детектора, он в течение 2 часов выдерживался в термостатическом состоянии, после этого устанавливался в досмотровую систему. Совокупное время измерений заданной температуры детектора составляло 15 мин.

Таблица 1	
-----------	--

У	словия	проведения	испытаний	системы	калибровки
---	--------	------------	-----------	---------	------------

Параметр	Значение		
Источник нейтронов	ИНГ-27		
Поток нейтронов, н/с	$5 \cdot 10^7$		
Детектор	BGO, H × Ø =5.08× 5,08 см		
Значения температуры детектора	14 °C 28 °C 40 °C		
Время измерения, мин	0,5		
Число измерений для заданной температу- ры детектора	30		
Список веществ, масса, номер α пикселя	Полиэтилен 0,6 кг, α = 4 Меламин 0,55 кг, α = 9 Вода 0,5 кг, α = 7 Имитатор тетрила 0,3 кг, α = 6		

Для каждого измерения получен аппаратный спектр фона случайных совпадений. Далее по стандартному спектру проводится аппроксимация. На основе серий измерений при различных температурах гамма-детектора оценены средние значения коэффициента калибровки *k*. Коэффициенты калибровки при разных температурах детектора представлены в табл. 2.



Рис. 4. Геометрия испытаний алгоритма калибровки

Таблица 2

Коэффициенты калибровки при разных температурах детектора

Температура детектора	14 °C	28 °C	40 °C
Коэффициент калибровки	3,788 ± 0,006	4,056 ± 0,015	4,538 ± 0,006

На основе коэффициентов калибровки вычисляется энергетический спектр образца. На рис. 5 представлены спектры исследуемых образцов для серии климатических испытаний. Статистика спектров полиэтилена и воды выше имитатора тетрила и меламина в силу более близкого расположения образцов к гамма-детектору. Спектры образцов различных температур детектора хорошо согласуются.

Спектр углерода используется для оценки погрешности температурной компенсации разработанного метода. На рис.6 представлены положения пика углерода для серии климатических измерений. Значительная погрешность в определении положения пика углерода связана с низкой статистикой спектра за 0,5 мин измерения. По результатам оценки положения пика углерода оценены взвешенные средние и погрешности среднего для данной температуры. Погрешность температурной компенсации (среднеквадратическое отклонение) не превышает 0,3 %.



Рис. 5. Спектры образов серии климатических испытаний (объединение спектров данной температурной серии измерений)



Рис. 6. Положение пика углерода в серии климатических испытаний

Заключение

Разработан алгоритм автоматизированной калибровки гамма-детекторов по спектру фона случайных совпадений. Проведены температурные испытания системы калибровки. Погрешность температурной компенсации разработанной система составляет 0.3%. Погрешность температурной компенсации определяет минимально достижимую ширину шага энергетической шкалы:

$$\Delta E = \delta E \cdot 4,44 \, M \ni B \tag{5}$$

где, δE_0 – погрешность температурной компенсации. Ширина шага определяется по гамма-линии 4,44 МэВ углерода.

В табл. 3 представлены достижимые ширины энергетической шкалы различных систем температурной стабилизации.

Минимально достижимая ширина энергетической шкалы

Таблица 3

Система	PELAN	ДВиН	Аппроксимация фона случайных совпадени	
ΔE , кэ B	310	44	13	

В качестве критерия применимости температурной стабилизации отклика детектора можно принять предельную ширину энергетической шкалы ΔE_{npeden} . Для детектора BGO энергетическое разрешение составляет $\eta = 10 \%$ для линии 662 кэВ ¹³⁷Cs [14]. Предельную ширину энергетической шкалы можно определить через число интервалов для описания пика полного поглощения гамма-линии углерода 4,44 МэВ. Если задать 10 интервалов для описания пика, предельная ширина энергетической шкалы составит:

$$\Delta E_{\text{предел}} = \Pi \coprod \Pi B_{4,44\text{M}3\text{B}}/10 = 17 \text{ к3B}$$
(6)

Исходя из значений ΔE и $\Delta E_{предел}$ следует, что допустимым способом температурной компенсации является разработанный алгоритм калибровки на основе аппроксимации спектра случайных совпадений стандартным спектром.

Литература

1. Хасаев Т. О. и др. Нейтронный генератор ИНГ-27 – малогабаритный источник меченых нейтронов для аппаратуры элементного анализа. Сборник докладов международной научно-технической конференции Портативные генераторы нейтронов и технологии на их основе. –М.: ВНИИА им. Н. Л. Духова, 2013.

2. Chichester D. L., Lemchak M., Simpson J. D. The API 120: A portable neutron generator for the associated particle technique. NIM B, T. 241, P. 753–758, 2005.

3. Smith R. C., Hunvitz M. J., Tran K.-C. System to detect contraband in cargo containers using fast and slow neutron irradiation and collimated gamma detectors. NIM B, 1995.

4. Perot B. et. al. Materials Characterisation with the Associated Particle Technique. 2012 IEEE Nuclear Science Symposiwnand Medical Imaging Conference Record (NSS/MIC).

5. Globus M., Grinyov B., Kim J. K. Inorganic Scintillators for Modern and. Kharkiv: Institute for Single Crystals, 2005.

6. http://www.gammadata.se/assets/Uploads/BGO -data-sheet.pdf

7. Carascoet C. et al. In-field tests of the EURIT-RACK tagged neutron inspection system. NIN A, T. 588, P.397–405, 2008.

8. Kuznetsov et. al. SENNA – Device for Explosives' Detection Based on Nanosecond Neutron Analysis.Proc. of SPIE Vol. 6213, 621306-1. 2006.

9. Бабин Г. В., Халимов В. И. Программный комплекс для получения и анализа данных в измерительных системах с использованием источника меченых нейтронов. С.-П. : V научно-техническая конференция студентов, аспирантов, молодых ученых, приуроченная к 80-летию проф. кафедры органической химии СПбГТИ (ТУ) Б. И. Ионина и открытию НИЛ «Каталитические технологии», 2015.

10. Sullivan R. An Advanced ESTCP PELAN System for Surface and Nearsurface. 2007.

11. Womble P. C. et. all. PELAN 2001: Current Status of the PELAN Explosive. Proceedings SPIE conference on Hard X-Ray and Gamma-Ray Detector Physics, 2001.

12. Быстрицкий В. М. и др. Гамма-детекторы в установках по обнаружению взрывчатых и наркотических веществ // Сборник докладов международной научно-технической конференции. Портативные генераторы нейтронов и технологии на их основе. 2013.

 В. М. Быстрицкий и др. Стационарный досмотровый комплекс ДВиН-2. Письма в ЭЧАЯ. 2009.

14. BGO Bismuth Germanate Scintillation Material. BGO-Data-Sheet.pdf. www.detectors.saint-gobain.com.

ИЗМЕРИТЕЛЬНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ

<u>Е. В. Бодров</u>, Н. В. Невмержицкий, Е. А. Сотсков, Е. Д. Сеньковский, Е. В. Левкина, О. Л. Кривонос, А. С. Кучкарева, К. В Анисифоров, С. В.Фролов

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

Введение

Гидродинамические неустойчивости (ГН) Релея – Тейлора, Рихтмайера – Мешкова, Кельвина – Гельмгольца [1–4] и вызванное ими турбулентное перемешивание (ТП) являются одним из препятствий при попытках достижения высоких плотностей энергии при инерциальном термоядерном синтезе.

Для описания развития этих неустойчивостей применяются численные методы и различного рода полуэмпирические модели. Все они требуют калибровки по результатам экспериментов. Для верификации и валидации современных численных методик необходимы тестовые экспериментальные данные:

• о распределениях фрагментов в зоне ТП по размерам и скоростям;

• о взаимном влиянии турбулентности и ударных волн;

• о времени перехода возмущений в стадию ТП;

• о характере развития ГН и ТП на микроповерхностях и т. д.

Такие данные можно получить лишь с применением аппаратуры, имеющей пространственное микронное и временное наносекундное разрешение. Аппаратура должна быть объединена в специальный лабораторный экспериментальный комплекс. Результаты, полученные на данной аппаратуре должны проходить высокоточную обработку. В докладе представлены оборудование, принцип работы и некоторые экспериментальные результаты такого комплекса по исследованию ГН и ТП с применением такого комплекса.

Принцип работы комплекса основан на регистрации течения цифровой аппаратурой с большим (до 50 раз) коэффициентом оптического увеличения и малой (4 нс) экспозицией [5].

Состав комплекса

Система лазерной подсветки:

- импульсный лазер;
- пульт управления;
- телескоп-рассеиватель.

Оптическая система:

• теневая установка ИАБ-451;

 короткофокусные объективы и окуляры от микроскопа типа ИМЦ-50-100;

- эндоскоп;
- светофильтры.

Система цифровой видеорегистрации:

- видеокамеры;
- персональный компьютер.

Система измерения параметров ударной волны (УВ) и давления:

- осциллограф;
- усилитель заряда;
- источник бесперебойного питания;
- пьезокерамические датчики давления.

Система синхронизации аппаратуры:

- осциллограф t;
- блок формирования синхроимпульса;
- генератор синхроимпульсов.

Система обработки данных:

- персональный компьютер;
- сканер;
- принтер;

 программное обеспечение (программы «Autoview» [6], Origin, Microsoft Excel, Word).

Экспериментальное оборудование:

- ударные трубы;
- ускорительные каналы

Все измерительно-вычислительное оборудование связано между собой по схеме определенным образом.

1. Режимы работы комплекса

Комплекс работает в режиме шлирен-метода, в режиме регистрации течения при рассеянном лазерном излучении и в режиме эндоскопа. В режиме шлирен-метода регистрируются ударные волны, волны разрежения в течении, структура зоны перемешивания. Этот режим используется для исследования ГН и ТП, как правило, в газах.

В режиме рассеянного лазерного излучения регистрируются течения на границе газ-жидкость, жидкость-жидкость регистрируется зона перемешивания, ее структура, развитие возмущений и т. д.

Режим эндоскопа используется, как правило, для регистрации внутренней структуры течения: тонкий зонд эндоскопа позволяет проникнуть вглубь зоны ТП. На рис. 1 показано пространственное разрешение комплекса в этих режимах.

Общий вид некоторых элементов комплекса представлен на рис. 2.



Рис. 1. Видеокадры тест-объектов: а – изображение проволоки толщиной 0,15 мм, зарегистрированное шлирен-методом; б – изображение 25-ого элемента МИРА № 1 с расстоянием между линиями 5,2 мкм, зарегистрированное в рассеянном лазерном излучении; в – изображение МИРА № 2 с расстояниями между линиями 10 мкм, зарегистрированное через эндоскоп







В

Рис. 2. Некоторые элементы комплекса: а – режим шлирен-метода, б – режим рассеянного лазерного излучения, в – режим эндоскопа

2. Результаты отработки комплекса

Исследования неустойчивости Релея – Тейлора на границе газ-жидкость

Комплекс отрабатывался на экспериментах по исследованию структуры зоны турбулентного перемешивания, развивающегося при неустойчивости Релея-Тейлора на границе газ-жидкость. В этих экспериментах слой воды массой ~20 грамм ускорялся сжатым гелием в оптически прозрачном канале с поперечным размером 40 × 40 мм. Величина давления в гелии варьировалась от 2 до 35 атм, что позволило получить величину ускорения жидкого слоя от 10^2g_0 до 10^5g_0 . Регистрация проводилась в режиме рассеянного лазерного излучения.

На рис. 3 представлен видеокадр микроструктуры зоны турбулентного перемешивания гелия и воды при $g = 10^3 g_0$.



Рис. 3. Структура ЗТП на границе газ-жидкость

На рис. 4–5 представлены видеокадры аналогичного течения при различных g.

При исследовании структуры струй и пузырей, впервые было обнаружено, что на границе раздела газ-жидкость могут возникать кумулятивные микроструи жидкости (рис. 4).



Рис. 4. Проникновение струй жидкости в газ

На рис. 5 видно, как ускорение слоя влияет на структуру зоны: чем выше ускорение, тем меньше частицы.

Исследование неустойчивости Кельвина – Гельмгольца

Проведена отработка комплекса по исследованию развития зоны ТП (ЗТП) на границе газ-жидкость при скольжении ударной волны по поверхности слоя воды

В этих опытах слой жидкости в виде лужицы $(100 \times 10 \times 10$ мм) располагался на нижней стенке оптически прозрачной измерительной секции ударной трубы. Касательно к поверхности жидкости пропускалась воздушная ударная волна с числом Маха 1,3. Под действием этой волны развивалась неустойчивость Кельвина – Гельмгольца, которая приводила к перемешиванию веществ. На рис. 7 представлены видеокадры данного процесса – макрорежимы регистрации (пространственное разрешение ≈ 100 мкм), рис. 7а, и микрорегистрация, рис. 7б. В режиме микрорегистрации разрешаются частицы диспергированной воды размером от 7 мкм.

Исследование неустойчивости Рихтмайера – Мешкова

Отработка комплекса проводилась и на экспериментах, в которых неустойчивость Рихтмаейра – Мешкова развивалась на границе двух газов разной



Рис. 5. Микроструктура ЗТП при Р-Т неустойчивости: а – опыт 1267, ускорение – g = 4,6 · 102g₀; б – опыт 1265, ускорение – g = 1,2 · 103g₀; в - опыт 1269, ускорение – g = 3,5 · 104g₀; ↓g – направление ускорения слоя воды; ↑H – направление роста струй; размер видеокадра ≈(11 × 11) мм (смещение контактной границы ≈35 мм)

На рис. 6 показано распределение частиц (R) по размерам (d) в опытах 1269, 1265, представленных на рис. 5.



Рис. 6. Распределение частиц по размерам

плотности. Данные эксперименты проводились на ударной трубе в режиме регистрации шлирен-методом. Воздушная ударная волна с числом Маха $M \approx 2,3$ ускоряла контактную границу воздуха и аргона. На границе развивалась неустойчивость Рихтмайера – Мешкова, которая приводила к турбулентному перемешиванию веществ. Затем ударная волна отражалась от жесткой стенки и проходила через образовавшуюся зону перемешивания. На комплексе регистрировались зоны перемешивания до и после прохождения ударной волны и структура самой волны

Опыты по исследованию микроструктуры ЗТП на границе газ-газ после прохождения через нее УВ показали, что зона перемешивания может стремиться к однородной (рис. 8), структура самой волны может изменяться (рис. 9).



Рис. 7. Развитие зоны ТП (ЗТП) на границе газ-жидкость при неустойчивости Кельвина – Гельмгольца (двухкадровый режим регистрации при рассеянном лазерном излучении): а – макрорежимы регистрации (пространственное разрешение ≈100 мкм), б – микрорегистрация



Рис. 8. Структура ЗТП на границе воздух-аргон: а – опыт № 1338 (аргон); б – однородная турбулентность за решеткой (фото Thomas Corke, Hassan Nagib)



Рис. 9. Структура ЗТП на границе газов: а – изображение УВ до прохождения ЗТП, б – изображение УВ после прохождения ЗТП

Исследование микроструктуры распавшихся капель и струй жидкости

Исследование микроструктуры капли и струи жидкости при их разрушении под воздействием воздушной ударной волны дают качественное представление о возможностях комплекса.



Рис. 10. Фрагментация капли воды

На рис. 10 представлена фрагментация капли воды диаметром 2 мм после воздействия на нее воздушной ударной волны с числом Маха M = 1,3. Регистрация течения проводилась видеокамерой в режиме рассеянного лазерного излучения. На видеокадре хорошо просматривается множество микрочастиц жидкости. На рис. 11 представлены видеокадры диспергирования струи воды под действием такой же ударной волны с регистрацией течения через эндоскоп в проходящем и отраженном свете. На видеокадрах также хорошо разрешаются частицы жидкости размером от 17 мкм.

Измерение давления

Измерение давления в газодинамическом течении производится пьезокерамическими датчиками давления и определяется по осциллограммам, записанным при помощи этих датчиков, рис. 12.

На рис. 12а представлены применяемые в комплексе пьезокерамические датчики давления. На рис. 12б – осциллограммы, записанные при помощи этих датчиков в экспериментах на ударной трубе при воздействии ударной волны (УВ) на ЗТП.

Осциллограммы позволяют по временным показаниям датчиков Д1, Д2, Д3 и расстоянию между ними определить скорость ударной (отраженной) волны.



Рис. 11. Эндоскопия струи воды: а – в проходящем свете, б – в отраженном свете



Рис. 12. Измерение давления в газодинамическом течении: а – пьезокерамические датчики давления, б – осциллограммы, записанные при помощи этих датчиков

Обработка результатов экспериментов

Обработка результатов экспериментов проводится на персональном компьютере по программе Searcher. Эта программа позволяет по видеокадрам проводить измерения размера частиц и их скорости в зоне перемешивания или диспергированной жидкости капель и струй. Диаметр частиц при обработке эквивалентен площади ее изображения. Масштабирование размеров проводится по известному размеру репера (обычно проволочки диаметром 0,1–0,3 мм), введенного перед опытом в центр поля изображения. Скорость частиц определяется при использовании двух импульсной лазерной подсветки течения, разнесенной во времени. На рис. 13 представлен процесс измерения размеров частиц жидкости в одном из опытов и график распределения частиц R по размерам d.



Рис. 13. Процесс измерения частиц: а - график распределения частиц по размерам, б - окно программы по измерению частиц

Погрешности измерений:

- диаметра фрагментов $3T\Pi \Delta d \le \pm 4$ мкм;
- скорости фрагментов ЗТП, УВ $\Delta U \le 10$ %;
- давления в газодинамическом потоке $\Delta P \leq 19$ %;
 - времени $\Delta t \le 0,2$ мкс.

3. Выводы

Создан и сдан в эксплуатацию комплекс для исследования микроструктуры турбулентного перемешивания.

Комплекс позволяет исследовать течения с пространственным разрешением от 7 мкм и временным – от 4 нс. Получены новые результаты:

• из зоны ТП выбрасываются тонкие микрокумулятивные струи жидкости;

 после прохождения УВ по зоне ТП газов зона стремится к однородной, структура фронта УВ изменяется.

• получено распределение микронных частиц в зоне турбулентного перемешивания на контактной границе газ-жидкость.

Литература

1. *Taylor G. I.* The instability of liquid surfaces when accelerated in a direction perpendicular to their planes. I. Proc. Roy. Soc., 1950. V. A201. P. 192.

о стиц по размерам, б – окно программы по измерению частиц 2. *Richtmyer R. D.* Taylor instability in shock acceleration of compressible fluids. Commun.Pure Appl.Math., 1960. V. 13. P. 297.

3. *Мешков Е. Е.* Неустойчивость границы раздела двух газов, ускоряемой ударной волной. Изв. АН СССР, МЖГ, 1969, № 5. С.151–158.

4. *Helmholtz H. L. F.* Uber discontinuirlish Flussigkeits-Bewegungen. Monatsberichte Konigl. Preus. Akad. Wiss. Berlin. 1868. P. 215.

5. Абакумов С. А., Кривонос О. Л., Невмержицкий Н. В., Руднев А. В., Сотсков Е. А., Сеньковский Е. Д., Точилина Л. В., Фролов С. В. Устройство для регистрации микронных частиц в газодинамическом потоке. Патент на полезную модель № 139204. 2014.

6. Poduvalov A. N. Software for TMZ image processing. The Proc of the 6th IWPTCM, Marseille, France, 1997, P. 411.

О ВОЗМОЖНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ СЕЧЕНИЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНЫХ ПРОТОНОВ С ВЕЩЕСТВОМ МЕТОДОМ ПРОТОННОЙ РАДИОГРАФИИ

А. А. Агапов, Е. И. Валекжанина, А. А. Городнов, С. А. Картанов, К. Л. Михайлюков, М. В. Таценко

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

Высокоэнергетичная протонная радиография является перспективным методом исследования в области физики быстропротекающих процессов и высоких плотностей энергии. Важным этапом протонографических исследований является моделирование процесса прохождения высокоэнергетичных протонов через исследуемый объект. Для проведения корректных расчетов необходима информация о сечениях ядерного взаимодействия протонов с энергией 50-70 ГэВ с простыми элементами и сложными материалами. Имеющихся справочных данных не всегда достаточно для проведения модельных расчетов, в то же время, система формирования и регистрации изображений, входящая в состав протонного радиографического комплекса ПРГК-100, созданного на базе синхротрона У-70, потенциально может быть использована для измерения сечений ядерного взаимодействия. В работе приводятся расчетные оценки возможности проведения таких измерений и результаты пробных экспериментов по измерению сечений ядерного взаимодействия для свинца, стали и сплава дюралюминия марки Д16.

Основными процессами взаимодействия протонов с веществом объекта, которые участвуют в формировании протонного изображения, являются ядерное и электромагнитное (кулоновское) взаимодействия [1]. Поскольку протонное изображение теневое, т. е. формируется за счет выбывания из пучка частиц, прошедших через объект, то количество зарегистрированных протонов зависит от количества их взаимодействий с ядрами, в результате которых угловое отклонение протонов от оси превышает апертуру магнитооптической системы (величину угла захвата системы), формирующей протонное изображение. Комплекс ПРГК-100 имеет магнитооптическую систему с полем обзора, представленным на рис. 1 [2].

Поле обзора определяет поперечный размер объекта и угол рассеяния протонов на выходе из него, при котором протоны достигают плоскости регистрации без потерь.

Из рис. 1 видно, что для объекта радиусом 20 мм, расположенного вдоль оси магнитной системы, апертура магнитной оптики допускает рассеяние протонов в объекте на угол до 5-ти мрад.

Оценим углы, которые приобретает протон при ядерном и кулоновском взаимодействиях. При ядерном взаимодействии происходят два процесса: неуп-

ругое столкновение, приводящее к образованию новых частиц, и упругое рассеяние.



Рис. 1. Зависимость радиуса поля обзора магнитооптической системы ПРГК-100 от среднеквадратического угла рассеяния протонов в объекте

При неупругом ядерном взаимодействии, в результате которого протон передает нуклонам энергию, достаточную для протекания в ядре реакций с образованием вторичных частиц и осколков, импульс налетающего протона меняется настолько сильно, что частица не захватывается магнитной оптикой и выбывает из потока.

При упругом рассеянии угловая зависимость рассеяния имеет сложную форму, однако подавляющее большинство протонов, рассеянных по механизму упругого взаимодействия, согласно расчетным оценкам, имеют угловое отклонение, не превышающее апертуры магнитооптической системы, поэтому угловую зависимость, в нашем случае, можно не принимать во внимание.

Многократное кулоновское рассеяние протонов на ядрах вещества приводит к отклонению протонов на углы, значения которых распределены по нормальному закону со среднеквадратичным отклонением [3]:

$$\vartheta = \frac{13,6}{\beta c p} \sqrt{\frac{\rho_i}{X_0}} \left[1 + 0,038 \cdot \ln\left(\frac{\rho_i}{X_0}\right) \right],\tag{1}$$

где X_0 – радиационная длина вещества, p – импульс протонов (МэВ/с), ρ_i – плотность вещества, $\beta = \frac{v}{c}$,

v – скорость протонов, *с* – скорость света в вакууме.

На рис. 2 представлен график зависимости угла рассеяния от толщины вещества (в радиационных длинах).



Рис. 2. Зависимость среднеквадратичного угла многократного кулоновского рассеяния θ от толщины вещества в радиационных длинах для протонов с энергией 50 ГэВ

Из рис. 2 видно, что с учетом величины поля обзора (рисунок 1), при прохождении протонов через объект толщиной 40 радиационных длин, 95,8 % протонов, рассеянных в объекте при многократном кулоновском взаимодействии, достигнут плоскости регистрации.

Таким образом, при радиографировании объектов толщиной менее 40 радиационных длин протоны будут выбывать из пучка, достигающего плоскости регистрации, только за счет ядерного неупругого взаимодействия.

Длина неупругого ядерного взаимодействия λ определяется формулой:

$$\lambda \sim \frac{1}{\sigma_{_{Heynp}} \frac{\rho}{M} N_A},$$
 (2)

где σ_{heynp} – сечение неупругого ядерного взаимодействия, ρ – плотность вещества, M – молярная масса, N_A – число Авогадро.

Ослабление интенсивности потока описываются следующей функцией:

$$\frac{N}{N_0} = e^{\frac{\rho l}{\lambda}},\tag{3}$$

где N_0 – число частиц в налетающем потоке, N – число частиц, прошедших через слой вещества толщиной l, λ – длина неупругого ядерного взаимодействия (г/см²), ρ – плотность вещества (г/см³).

Из формулы (3) легко получить выражение для длины ядерного взаимодействия:

$$\lambda = -\frac{\rho l}{\ln\left(\frac{N}{N_0}\right)}.$$
(4)

Исходя из всего вышесказанного, измерив распределение протонов до объекта и после и применив к полученным данным формулу (4), получим экспериментальное значение длины ядерного взаимодействия.

Когда объект состоит из нескольких элементов (сплав), формула пропускания будет выглядеть так:

$$\frac{N}{N_{0}} = e^{-\frac{l_{1}}{\lambda_{1}/\rho_{1}}} \cdot e^{-\frac{l_{2}}{\lambda_{2}/\rho_{2}}} \cdot \dots \cdot e^{-\frac{l_{n}}{\lambda_{n}/\rho_{n}}} = \left(\frac{l_{1}}{\lambda_{1}/\rho_{1}} + \frac{l_{2}}{\lambda_{2}/\rho_{2}} + \dots + \frac{l_{n}}{\lambda_{n}/\rho_{n}}\right),$$
(5)

где $l_1, l_2, ..., l_n$ – толщины каждого элемента, $\rho_1, \rho_2, ..., \rho_n$ – плотности элементов.

При известных процентных соотношениях элементов в сплаве формулу (5) можно переписать следующим образом:

$$\frac{N}{N_{0}} = e^{-l \left(\frac{t_{1}}{\lambda_{1}/\rho_{1}} + \frac{t_{2}}{\lambda_{2}/\rho_{2}} + \dots + \frac{t_{n}}{\lambda_{n}/\rho_{n}}\right)},$$
 (6)

где $t_1, t_2, ..., t_n$ – процентные содержания веществ.

На рис. 3 представлена схема проведения эксперимента на ПРГК-100. Магнитные линзы 2 формируют пучок протонов с заданными фазовыми характеристиками и пространственным распределением N₀. Сцинтиллятор 1 конвертирует распределение протонов в оптическое изображение протонного пучка Nomcy0, которое фиксируется цифровым регистратором 3 в виде матрицы отсчетов аналогово-цифрового преобразователя (АЦП). Магнитооптический квартет 4 переносит распределение протонов из плоскости пучка в плоскость расположения исследуемого объекта 6 по принципу «-1» оптики N'_{прП}. Таким образом, регистрируя пучок N_{o} , мы получаем изображение, соответствующее распределению протонов, падающих на объект. Проходя через объект 6, протоны выбывают из пучка за счет ядерного взаимодействия, или, потеряв часть энергии на ионизацию атомов вещества и рассеявшись при многократном кулоновском взаимодействии, захватываются магнитооптическим квартетом 5. Магнитооптический квартет формирует протонное изображение объекта в плоскости регистрации, где расположен сцинтилляционный конвертер 9. Регистратор 8 фиксирует оптическое изображение в виде матрицы отсчетов АЦП - N_{omcuOE}

Полученные на регистраторы 3 и 8 изображения, после учета шума и неравномерности чувствительности регистраторов, можно использовать для определения длинны ядерного взаимодействия λ . Согласно выражению (4) для расчета λ необходимо регистрировать изображение объекта, содержащего набор известных значений ρl . В качестве таких объектов в экспериментах были использованы клинья (рис. 4) с девятью градациями ρl из следующих веществ: сплав дюралюминия Д16, сталь марки Ст3 и свинец.



Рис. 3. Схема эксперимента на комплексе ПРГК-100: 1 – сцинтиллятор, 2 – зеркало, 3 – регистратор, 4 – первый магнитооптический квартет, 5 – второй магнитооптический квартет, 6 – объект, 7 – коллиматор, 8 – регистратор, 9 – сцинтиллятор, 10 – зеркало, 11 – реперные объекты



Рис. 4. Схематичное изображение одного из исследуемого клина

На рис. 5а и 5б представлены изображения исходного и скорректированного изображения объекта. В местах перепада толщин взяты профили (рис. 5в и 5г). Очевидно, что форма профиля полностью зависит от формы пучка. Нормирование на входной пучок позволяет избавиться от данного влияния, и на рис. 5г хорошо видно выравнивание профиля на ступенях клина.

Для получения расчетных значений радиационной длины использовались допущения в составе материалов. В стали СтЗ основное вещество – железо. Вкладом остальных веществ при расчетах можно пренебречь. В дюралюминии марки Д16 наибольшее влияние вносят алюминий и медь. Процентные соотношения алюминия и меди по справочным данным колеблются, что, естественно, влияет на значения длины ядерных взаимодействий. Из формулы (6) были рассчитаны длины ядерного взаимодействия для сплава дюралюминия. Это значение использовалось для сравнения с расчетами по экспериментальным данным.



Рис. 5. Протонографические изображения клина и профили, взятые в местах перепадов толщин: а – исходное протонографическое изображение, б – скорректированное на пучок изображение, в – профиль исходного изображения, г – профиль скорректированного изображения

После коррекции протонограмм проведено измерение величины пропускания в каждой секции клиньев.

Полученные наборы значений для каждого вещества использовали для расчета длин ядерного взаимодействия по формуле (4). Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Длину ядерного взаимодействия можно получить, аппроксимируя экспериментальные значения пропускания ступеней клина в координатах {пропускание, толщина}, функцией вида:

$$y = A_0 \cdot e^{-t1x},\tag{7}$$

После аппроксимации численное значение параметра t_1 будет соответствовать значению длины ядерного взаимодействия, поскольку вид данной функции определяется выражением (3).



Рис. 6. Экспериментальные значения и аппроксимационная кривая пропускания для клина из стали Ст3

Таблица 1

Длины ядерного взаимодействия, рассчитанные по формуле

Исследуемое вещество	Табличное значение длины ядерного взаимодействия [3], г/см ²	Экспериментально полу- ченное значение длины ядерного взаимодействия, г/см ²	Отклонение экспери- ментального значения от расчетного, %
Сталь Ст3	132,1	126 ± 5	4,3
Дюралюминий Д16	108,8	105 ± 5	3,2
Свинец	199,6	206 ± 12	3,3

Таблица 2

Длины ядерных взаимодействий, полученные аппроксимацией

Исследуемое вещество	Табличное значение длины ядерного взаимодействия [3], г/см ²	Экспериментально полу- ченное значение длины ядерного взаимодействия, г/см ²	Отклонение экспери- ментального значения от расчетного, %
Сталь Ст3	132,1	133 ± 6	0,9
Дюралюминий Д16	108,8	107 ± 3	1,3
Свинец	199,6	195 ± 3	2,5

На рис. 6 представлены экспериментальные значения, полученные для клина из стали, и аппроксимирующая кривая.

В табл. 2 представлены значения длин ядерного взаимодействия, рассчитанные данным методом.

Как видно из табл. 1 и 2, меньшие погрешности в измерениях возникли при определении λ путем аппроксимации данных.

На основе проделанной работы можно сделать вывод, что метод протонной радиографии, реализованный на комплексе ПРГК-100, позволяет измерять длину ядерного взаимодействия для различных веществ с погрешностью 2,5–3 % (0,95). Для измерений необходимо использовать объекты толщиной не более 40 радиационных длин.

Литература

1. Мухин К. Н.. Экспериментальная ядерная физика. – М.: Энергоатомиздат, 1983.

2. Антипов Ю. М. и др. Радиографическая установка ускорителя протонов с энергией 70 ГэВ ГНЦ ИФВЭ. – Приборы и техника эксперимента. 2010, № 3, С. 5–12.

3. Weinberg E. J., Nordstrom D. L. Physical Review D. – The American Physical Society. 2002, T. 3, P. 84.

РЕАКЦИЯ ВВ НА ОСНОВЕ ОКТОГЕНА И ТАТБ НА ДИНАМИЧЕСКОЕ НАГРУЖЕНИЕ МЕТОДОМ СОСТАВНОГО СТЕРЖНЯ ГОПКИНСОНА

А. М. Васильев, А. В. Юрлов, В. А. Пушков, Т. Г. Найданова, А. Н. Цибиков

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

Введение

Вопросы, связанные с изучением возможности инициирования взрывчатых превращений (ВП) во взрывчатых веществах (ВВ) при низкоскоростном воздействии, имеют большое практическое значение, в частности при моделировании аварийных ситуаций. В деятельности ЯОК используются ВВ, например, для исследовательских целей или в составе конструкций. При хранении, транспортировке и работе с ВВ могут возникать аварийные ситуации с воздействием на ВВ динамических нагрузок (падение самолета на склад ВВ, транспортная авария, теракт и т. п.). Для обеспечения технической безопасности необходимо знать свойства ВВ при воздействии различных нагрузок, включая динамические.

Из анализа имеющихся экспериментальных данных можно сделать вывод, что наиболее вероятным механизмом инициирования ВП является образования очагов реакции в результате диссипации энергии при пластической деформации в твердых ВВ. Очаги формируются сдвиговыми деформациями, приводящими к образованию трещин и относительному скольжению материала ВВ по границе трещины. При этом, в процессе деформирования, происходит локализация адиабатического сдвига. В полосе сдвига реализуется сильный разогрев ВВ и возникает очаг реакции взрывчатого превращения.

Исследованиями механического воздействия на ВВ при различных скоростях нагружения активно занимаются в различных лабораториях, в частности в Российских и Американских [1–6]. Однако на сегодня для создания более адекватных моделей инициирования взрывчатого превращения необходим больший объем экспериментальных данных [3, 7–8]. В настоящем докладе приведены результаты исследования методом составного стержня Гопкинсона (ССГ) динамического сжатия и локализованного адиабатического сдвига в образцах из ВВ на основе октогена и триаминотринитробензола (ТАТБ). Скорости деформаций в опытах составили (0,2–3,7)·10³ с⁻¹.

1. Методика исследований

1.1. Эксперименты на динамическое сжатие

Метод ССГ исследователи используют для изучения поведения ВВ и тестирования численных моделей деформирования, например [9]. На рис. 1 приведена схема проведения опытов на динамическое сжатие материалов методом ССГ.

Образец (диаметр 20 мм, высота 10 мм), как в классическом варианте метода ССГ, размещается между нагружающим и опорным стержнями (рис. 1).

Устройство для создания импульсов нагружения (рис.1) с примерно постоянной амплитудой состоит из стального ударника 3 с наклеенным на его свободном торце слоем пластического BB 2, перфокрешера из алюминиевого сплава 4 и переходного стального диска 5. Инициирование ПВВ осуществлялось с помощью электродетонатора 1. Нагружающий 6 и опорный 9 мерные стержни (Ø20×1000 мм) изготовлены из титана ВТ20. Обработкой сигналов (импульсов деформаций) от тензодатчиков 7 строилась диаграмма напряжение-деформация σ-ε при сжатии и определялась скорость деформации.

1.2. Эксперименты по исследованию локализованного сдвига

Схема исследований локализованного сдвига в ВВ приведена на рис. 2. Узел взрывного нагружения, стержни Гопкинсона, методика измерений деформаций были такие же, как в опытах по изучению динамического сжатия (см. рис. 1). Отличался лишь узел крепления образца (рис. 2)



Рис. 1. Схема установки составного стержня Гопкинсона в редакции опытов на сжатие: 1 – электродетонатор; 2 – слой ПВВ; 3 – стальной ударник; 4 – перфокрешер (*Al*); 5 – стальной переходник; 6 – нагружающий стержень; 7 – тензодатчик; 8 – образец; 9 – опорный стержень



Рис. 2. Схема испытаний ВВ на локализованный сдвиг: 1 и 2 – нагружающий и опорный стержни, 3 – образец, 4 – корпус, 5 – опора

Здесь образец (диаметр 30 мм, высота 20 мм) помещается в специальную обойму, состоящую из корпуса и опоры. Средняя часть образца выдавливается внутрь опоры 5, при этом между выдавливаемой и остающейся частью должен формироваться локализованный сдвиг.

2. Результаты исследований

2.1. Эксперименты по изучению динамического сжатия ВВ на основе октогена

Опыты проведены при скоростях деформации $\dot{\epsilon} = (0,3 \div 2,0) \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ (скорость нагружения $V_{\text{нагр}} = -$ =2,5–20 м/с), амплитуда нагружающих импульсов давлений составила $\sigma_i = 45-560$ МПа или усилий (14,1–175,8) $\cdot 10^3$ Н. В экспериментах при $\dot{\epsilon} = -(0,3 \div 0,6) \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ наблюдалось отсутствие разрушения, а при $\dot{\epsilon} = (0,7 \div 2,0) \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ полное разрушение образцов. В сохранившихся после опытов образцах отсутствовала пластическая деформация, т. е. деформация была только упругой. В указанных условиях взрывчатого превращения не происходило. На рис. 3 приведена характерная диаграмма «напряжение–деформация» для разрушенного образца.



Рис. 3. Характерная диаграмма «напряжение – деформация» σ-ε разрушенного образца, έ = 850 с⁻¹

В целом полученные диаграммы сжатия σ-ε имеют вид, характерный для хрупких материалов: за упругим участком следует очень короткий участок пластического деформирования, где достигается напряжение разрушения и затем следует резкий спад напряжения.

В табл. 1 приведены результаты экспериментов по сжатию ВВ на основе октогена.

Из результатов опытов с разрушением образцов следует, что величина напряжения, при котором происходит разрушение образцов ВВ, составляет 60-80 МПа. Практически сразу после приложения нагрузки из-за хрупкости ВВ происходило растрескивание образца и образец по макротрещинам разрушался на мелкие фрагменты и порошок. Значительного скольжения материала ВВ по границам трещин не происходило из-за быстрого разлета фрагментов, и очаги реакции взрывчатого превращения не успевали сформироваться.

Таблица 1

Результаты экспериментов по исследованию динамического сжатия ВВ на основе октогена

№ оп.	Давление нагру- жающего импульса, МПа	Усилие в нагру- жающем импульсе *10 ³ Н	Скорость деформации, c ⁻¹ (скорость нагруже- ния V _{нагр} , м/с)	Состояние образца
1	45	14,0	250 (2,5)	Образец не разрушился
2	96	30,0	290 (2,9)	Образец не разрушился
3	96	31,0	470 (4,7)	Образец не разрушился
4	100	31,5	370 (3,7)	Появилась трещина и небольшой откол на торце
5	110	35,0	600 (6,0)	Образец не разрушился
6	110	34,5	710 (7,1)	Образец разрушился
7	115	36,1	750 (7,5)	Образец разрушился
8	120	37,6	850 (8,5)	Образец разрушился
9	125	39,3	820 (8,2)	Образец разрушился
10	130	40,8	1200 (12,0)	Образец разрушился
11	470	147,6	1700 (17,0)	Образец разрушился
12	445	139,7	1720 (17,2)	Образец разрушился
13	560	175,8	2000 (20,0)	Образец разрушился

2.2. Эксперименты по изучению локализованного сдвига в ВВ на основе октогена

Опыты проведены при скоростях деформации $\dot{\epsilon} = 200-2500 \text{ c}^{-1}$ (скорость нагружения $V_{\text{нагр.}} = 4,8-50 \text{ м/с}$). Амплитуда нагружающих импульсов давлений составила $\sigma_i = 100-625 \text{ МПа}$ или усилий $P = (31,4-196,3)\cdot 10^3 \text{ H}$. На рис. 4 приведено фото сборки со стержнями и обоймой, где размещен образец BB.



Рис. 4. Сборка со стержнями, вставленными в стальную обойму, где размещен образец ВВ: 1 и 2 – нагружающий и опорный стержни, 3 – образец, 4 – обойма (из двух частей)

В опытах при $\acute{\epsilon} = 200-550 \text{ c}^{-1}$ (скорость нагружения $V_{\text{нагр.}} = 4,8-10,0 \text{ м/с}$), также как в опытах на динамическое сжатие, взрывчатого превращения не происходило.

В экспериментах при $\ell = 200-240$ с⁻¹ образцы деформировались без разрушения, происходило небольшое выдавливание на ~0,5–0,8 мм одной части образца относительно другой, а также появление трещин в основном на образующей поверхности. На рис. 5 приведено фото диаметрального сечения одного из не разрушенных образцов.

Из рис. 5 следует, что разрушение образцов происходило под воздействием сдвиговых и осевых напряжений. При этом в процессе разрушения образца по полосе сдвига появляются трещины в поперечном направлении. По образцам была оценена ширина полосы сдвига, которая составляла ~50–100 мкм. В процессе нагружения полосы сдвига развились в трещины.



Рис. 5. Диаметральное сечение образца ВВ после опыта на локализованный сдвиг:опыт № 1, P = 31,4 кH, $\epsilon = 200$ с⁻¹ ($V_{\text{нагр.}} = 4,0$ м/с)

При $\acute{\epsilon} = 400-550 \text{ c}^{-1}$ ($V_{\text{нагр.}} = 8,0-9,0 \text{ м/с}$) наблюдалось разрушение образцов, при этом в процессе разрушения выдавливание одной части образца относительно другой происходило на сдвиговых деформациях. В целом характер разрушения образцов был хрупкий

Были проведены опыты и при более высоких скоростях деформации $\dot{\epsilon} = 1000-2500 \text{ c}^{-1}$ (скорость нагружения $V_{\text{нагр.}} = 20-50 \text{ м/c}$). Взрывчатого превращения в двух опытах при скоростях деформации $\dot{\epsilon} \sim 1000-1750 \text{ c}^{-1}$ (давление 275–430 МПа) не происходило, образцы разрушались. В трех опытах при скоростях деформации $\dot{\epsilon} \sim 2100-2500 \text{ c}^{-1}$ (давление 520–625 МПа) взрывчатое превращение происходило.

На рис. 6 приведены записи деформаций на стержнях Гопкинсона одного из опытов со взрывчатым превращением. Для наглядности записи ограничены и представлены только в первой волне, проходящей через тензодатчики 7 (см. рис. 1).

Из рис.6 следует, что в этом опыте при взрывчатом превращении амплитуда возникающего давления составляет 715 МПа. Аналогичные записи наблюдались и в двух других опытах со взрывчатым превращением, где амплитуда возникающего давления составляла 815 и 710 МПа. В описанной постановке время от момента удара до начала взрывчатого превращения составляет 110–170 мкс.



В табл. 2 приведены результаты экспериментов.

Рис. 6. Импульсы деформаций на стержнях Гопкинсона в одном из опытов со взрывчатым превращением

№ оп.	Давление нагру- жающего им- пульса, МПа	Усилие в нагру- жающем импульсе *10 ³ Н	Скорость нагружения (стержня) м/с	Состояние образца	Амплитуда дав- ления взрывчато- го превращения, МПа	
1	100	31,4	4,0	Выдавливание центральной части образца, трещины	_	
2	110	34,5	4,8	То же	_	
3	180	56,5	10,0	Разрушение образца	-	
4	150	47,1	9,0	То же	_	
5	130	40,8	11,0	То же	-	
6	130	40,8	8,0	То же	_	
7	275	86,3	20,0	То же	-	
8	430	135,0	35,0	То же	_	
9	625	196,3	50,0	Взрывчатое превращение	715	
10	550	172,7	44,0	То же	710	
11	520	163,3	40,0	То же	815	

Результаты экспериментов по исследованию локализованного сдвига в ВВ из октогена

Полученные данные соответствуют широко применяемой теории о возникновении взрывчатого превращения. В отличие от постановки опытов на сжатие здесь ограничение деформирования образца в радиальном направлении (см. рис. 2) способствовало формированию локализованного сдвига и скольжению материала ВВ по границам микротрещин. Представленные экспериментальные данные будут полезны при разработке моделей инициирования взрывчатого превращения.

2.3. Эксперименты по изучению динамического сжатия BB на основе ТАТБ

Было проведено четыре опыта. Интервал скоростей деформации составил $\dot{\epsilon} = (2,2 \div 3,7) \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ (скорость нагружения $V_{\text{нагр.}} = 22-37 \text{ м/c}$), амплитуды нагружающих импульсов давлений составили $\sigma_i = 275-540 \text{ МПа}$ или усилий (86,4–169,6) $\cdot 10^3 \text{ H}$.

Во всех опытах происходило разрушение образцов на мелкие фрагменты размером 0,5–3,5 мм и пылеобразные частицы ВВ, часть которых осела на установке ССГ в области размещения образца. Часть фрагментов, образовавшихся в одном из опытов, приведена на рис. 7. В указанных условиях взрывчатого превращения не происходило.



Рис. 7. Часть фрагментов образца из ВВ на основе ТАТБ после одного из опытов на динамическое сжатие

На рис. 8 приведены диаграммы «напряжение– деформация», построенные по результатам этих опытов.

Диаграммы динамического сжатия BB на основе ТАТБ в целом имеют вид, характерный для материалов, обладающих пластичностью. По сравнению с BB на основе октогена в близких условиях нагружения BB на основе ТАТБ обладает большей пластичностью: если в опытах деформация разрушения для ТАТБ составляет 3,0–7,5 %, то для BB на основе октогена она составляет 0,5–2,5 % (по средним значениям отличие составляет 3,5 раза). По имеющимся данным для BB на основе ТАТБ при статическом сжатии деформация разрушения тоже выше, чем для BB на основе октогена (~4,5 % против ~1,8 %, т. е. различие в 2,5 раза).

В табл. 3 приведены результаты экспериментов по сжатию ВВ на основе ТАТБ.



Рис. 8. Диаграммы «напряжение – деформация» б-є динамического сжатия ВВ на основе ТАТБ при $\dot{\epsilon} = 2200-3700 \text{ c}^{-1}$ ($V_{\text{нагр.}} = 22-37 \text{ м/с}$): Опыт 1 – $\dot{\epsilon} = 3500 \text{ c}^{-1}$, Опыт 2 – $\dot{\epsilon} = 2200 \text{ c}^{-1}$, Опыт 3 – $\dot{\epsilon} = 3700 \text{ c}^{-1}$, Опыт 4 – $\dot{\epsilon} = 2500 \text{ c}^{-1}$

Результаты экспериментов по исследованию динамического сжатия ВВ на основе ТАТБ

№ оп.	Давление на- гружающего импульса, МПа	Усилие в на- гружающем импульсе *10 ³ Н	Скорость деформации, с ⁻¹ (скорость нагружения V _{нагр} , м/с)	Состояние образца
1	415	130,3	3500 (35,0)	Разрушение образца
2	275	86,4	2200 (22,0)	Разрушение образца
3	430	135,0	3700 (37,0)	Разрушение образца
4	540	169,6	2500 (25,0)	Разрушение образца

Из результатов опытов следует, что величина напряжения, при котором происходит разрушение образцов ВВ на основе ТАТБ, составляет 22–27 МПа, что меньше, чем для ВВ на основе октогена (60–80 МПа) в ~2,5 раза. Эти данные согласуются с данными для статического сжатия ВВ на основе ТАТБ и для ВВ на основе октогена (31 МПа против 58 МПа).

Относительно отсутствия взрывчатого превращения в ВВ на основе ТАТБ можно отметить следующее. Очевидно, в описанной постановке при скоростях нагружения 22–37 м/с энергии нагружения не хватало на формирование очагов взрывчатого превращения, происходила диссипация энергии в процессе деформирования образца без образования локализованного течения. Далее происходило растрескивание образца и его разрушение на мелкие фрагменты и пылеобразные частицы. Это коррелируется с данными [10], где взрывчатое превращение в ВВ на основе ТАТБ при его нагружении сферическим осколком массой 12гр. достигалось лишь при скоростях не ниже ~1000 м/с.

2.3. Эксперименты по изучению локализованного сдвига BB на основе ТАТБ

Проведено четыре опыта на образцах размерами $Ø 30 \times 20$ мм. Скорости нагружения составили $V_{\text{нагр.}} = 38,0-46,4$ м/с. Амплитуда нагружающих

импульсов давлений составила $\sigma_i = 450-555$ МПа или усилий (141,6–174,6)·10³ Н. Взрывчатого превращения в опытах не происходило, образцы разрушались, разрушение носило вязкий характер. В трех опытах при $V_{\text{нагр.}} = 38,4-44,8$ м/с часть образца вдавливалась в полость опоры обоймы, а часть образца оставалась в корпусе обоймы (схема опоры и корпуса обоймы приведена на рис. 2). Характер разрушения в этих опытах виден на рис. 9.



Рис. 9. Характер разрушения ВВ на основе ТАТБ при $V_{\rm harp.}$ = 38,4–44,8 м/с

На рис. 10 для иллюстрации приведены типичные импульсы деформаций стержней, зарегистрированные в одном из опытов (V_{нагр.} = 41,0 м/с).

Известно, что импульс деформации на опорном стержне $\varepsilon_i(t)$ характеризует реакцию ВВ на динамическое нагружение. Исходя из этого, можно отметить следующее. По импульсу $\varepsilon_t(t)$ видно, что процесс деформирования и разрушения имеет сложный характер. После роста сопротивления ВВ сдвиговым



Рис. 10. Деформации, зарегистрированные на стержнях Гопкинсона в опыте при V_{нагр.} = 41,0 м/с

напряжениям и достижения максимума (за время 40– 60 мкс) начинается разрушение образца. При этом рост сопротивления сдвиговым напряжениям имеет ступенчатый характер (см. рис. 10). Указанные особенности деформирования, по-видимому, связаны со значительной вязкостью ВВ и сложным характером диссипации энергии в узкой зоне деформирования (в зоне сдвига одной части образца относительно другой, смотри рис. 2). Сложный характер диссипации энергии, очевидно, обусловлен тем, что структура ВВ состоит из гранул и связующего материала, повышающего пластичность и вязкость ВВ. В табл. 4 приведены результаты опытов.

Взрывчатого превращения в ВВ на основе ТАТБ в описанных условиях нагружения не происходило, очевидно, по той же причине, что и в опытах на сжатие. Хотя локализованное течение материала и имело место, однако энергии нагружения не хватало на формирование очагов взрывчатого превращения и происходила лишь диссипация энергии в процессе деформирования образца.

Как отмечено выше, для возникновения взрывчатого превращения в ТАТБ необходима энергия нагружения сферическим осколком массой 12гр. со скоростью ~1000 м/с [10], что составляет ~12 кДж. В опытах с ВВ на основе ТАТБ на локализованный сдвиг максимальная величина энергии составила лишь ~2 кДж (в опытах на сжатие максимальная величина энергии составила 3,5 кДж).

Заключение

1. По методу ССГ проведены эксперименты по изучению динамического сжатия двух ВВ на основе октогена и на основе ТАТБ в диапазоне амплитуд давлений нагружающих импульсов 45–560 МПа и скоростей деформации $\dot{\varepsilon} = (250 \div 3700)$ с⁻¹. Получены диаграммы «напряжение – деформация» σ - ε .

В указанных условиях нагружения ВВ на основе ТАТБ в 3,5 раза пластичнее, чем ВВ на основе окто-

гена (в среднем 5,5 % против 1,5 %) и в 2,5 раза менее прочнее (в среднем 65 МПа против 26 МПа).

В опытах на сжатие ВП не выявлено, что, повидимому, связано с разрушением образцов по макротрещинам без скольжения берегов трещин в случае с ВВ на основе октогена и диссипацией энергии в вязком материале без образования локализованного течения в процессе деформирования образцов ВВ на основе ТАТБ. В этих условиях энергии нагружения не хватало на формирование очагов ВП.

2. По модернизированному методу ССГ проведены эксперименты по исследованию локализованного сдвига в двух ВВ на основе октогена и на основе ТАТБ при скоростях нагружения 4,0–50 м/с и усилии 100–625 кН.

В ВВ на основе октогена ВП проявлялось при скоростях нагружения 40–50 м/с. По зарегистрированным сигналам выявлены особенности инициирования ВП. В частности, пред началом ВП происходит деформирование образцов в течение 110– 170 мкс, нагружающий стержень внедряется в образец на 5–6,5 мм, амплитуды давления взрывчатого превращения в опытах составили 710–815 МПа, что выше, чем амплитуды нагружающих импульсов. Последние перечисленные данные получены впервые.

Взрывчатого превращения в опытах с ВВ на основе ТАТБ не происходило, образцы разрушались, разрушение носило вязкий характер.

3. Полученные данные будут полезны в деятельности ЯОК, в частности для выработки критериев безопасности в аварийных ситуациях. Полезны они будут и для моделирования поведения ВВ при воздействии динамических нагрузок, а также для дальнейшей расчетно-теоретической разработки механизма развития взрывчатых превращений от очагов реакции, вызванных сдвиговыми деформациями с образованием трещин и скольжением материала ВВ по границе трещины.

Таблица 4

№ оп.	Давление на- гружающего импульса, МПа	Усилие в нагру- жающем импульсе *10 ³ Н	Скорость нагруже- ния (стержня) м/с	Состояние образца
1	450	141,6	38,4	Разрушение образца (см. рис. 9)
2	505	158,6	41,0	Разрушение образца (см. рис. 9)
3	535	168,0	44,8	Разрушение образца (см. рис. 9)
4	555	174,6	46,4	Разрушение образца с отделением срединой части образца

Результаты экспериментов по исследованию локализованного сдвига в ВВ на основе ТАТБ

Литература

1. Белов Г. В., Базаров Ю. Б., Екимчев С. Н., Жиембетов А. К., Кудашов А. В., Олейников И. В., Шишканов А. В., Шустова Н. И. Влияние скорости ударника на параметры взрыва образцов из двух типов бризантных ВВ // Сборник тезисов докладов XV Харитоновских Чтений, Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013, С. 56.

2. Pushkov V. A., Abakumov A. I., Yurlov A. V., Kal'manov A. V., Sedov A. A. and Rodionov A. V. Response of HMX-based HE to low-velocity loading by steel cylindrical impactor. Proceedings of the AIP Conference, 1426, Part one, 2011, Pp. 418–421.

3. Abakumov A. I. et al. Numerical-experimental research of deformation of energetic materials in conditions of low-velocity loading in tests with split Hopkinson pressure bar. Proceedings of the IX Khariton's Readings. RFNC-VNIIEF, Sarov, Russia, 2007, Pp. 215–226.

4. Chidester S. K., Tarver C. M., DePiero A. H., and Garza R. G. Single and multiple impact ignition of new and aged high explosives in the Stiven impact test. AIP Conf. Proc. 505, 663–666 (2000).

5. Vandersall K. S. et al. Experimental and modeling studies of crush, puncture, and perforation scenarios in the steven impact test. 12^{th} Int. Det. Sym., 131-139 (2002).

6. Idar, D. J., et al. Low amplitude insult project: PBX 9501 high explosive violent reaction experiments. 11th Int. Det. Sym., 101–110 (1998).

7. Belov G. V. et al. Numeral simulation of experiments on the low-velocity impact on octogen-based HE using the explosive transformation initiation kinetics. Abstracts of 7th International Meeting on New Models and Hydrocodes for Shock Waves Processes in Condensed Matter. Estoril, Portugal, 2008, Pp. 37–38.

8. Джексон Р., Грин Л., Барлетт Р., Хоуфер У., Крамер П., Ли Р., Нидик-мл. Э., Шоу Л., Вейнгарт Р. Закономерности инициирования и распространения детонации во взрывчатом веществе ТАТБ // Сборник «Детонация и взрывчатые вещества». – М.: Мир, 1981, С. 323–342.

9. Mas E. M., Clements B. E., Blumenthal W. R., Cady C. M., Gray III G. T. Applying micro-mechanics to finite element simulations of split Hopkinson pressure bar experiments on high explosives. Shock Compression of Condensed Matter-2001. Pp. 539–542.

10. Белов Г. В., Базаров Ю. Б., Екимчев С. Н, Жиембетов А. К., Кудашов А. В., Олейников И. В., Шишканов А. В., Шустова Н. И. Влияние скорости ударника на параметры взрыва образцов из двух типов бризантных ВВ // Сборник докладов XV Харитоновских Чтений, Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013. С. 111–118.

СИСТЕМА ПОДДЕРЖАНИЯ И КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ РАДИАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСПЫТАНИЙ

<u>Н. Н. Веденеев</u>, Д. В. Грачев, Ф. К. Киселев, М. А. Корочкин, О. С. Кротова, М. С. Миронов

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

Введение

Надежность ядерных энергетических установок, срок активного существования космических аппаратов напрямую связаны с характеристиками стойкости применяемой электронной компонентной базы (ЭКБ) и приборов на ее основе к ионизирующим излучениям (ИИ). За последние десятилетия электронные узлы и компоненты военной, космической и других видов техники претерпели качественные изменения, связанные с ростом их функциональной сложности и использованием микросхем высокой степени интеграции. Проведенные к настоящему времени исследования выявили существенную зависимость показателей радиационной стойкости электронной аппаратуры и ее компонентов от их режима работы и условий эксплуатации. Данные условия прописываются в нормативной документации и технических условиях. Для большинства изделий ЭКБ диапазон рабочих температур составляет от -60 °C до 125 °С. Так как изменение температуры существенно влияет на подвижность носителей заряда [1], время жизни носителей заряда, отжиг радиационных эффектов, то стойкость приборов и ЭКБ должна подтверждаться в условиях, максимально приближенных к реальным условиям эксплуатации. Также актуальны исследования механизмов накопления и отжига радиационно-стимулированных зарядовых состояний в окислах и на границах раздела окисел полупроводник (поверхностные состояния) микросхем при различных температурных воздействиях.

Зависимость показателей радиационной стойкости ЭКБ и аппаратуры от температурных режимов привело к необходимости разработки системы, обеспечивающей проведение радиационных исследований и испытаний в широком диапазоне температур. Существующие на сегодняшний день климатические камеры не позволяют работать в условиях воздействия ИИ, поскольку при испытаниях система управления камер находится в зоне воздействия ИИ, что влияет на ее функционирование и приводит к катастрофическому отказу. Целью данной работы стала разработка радиационно-стойкой системы поддержания и контроля температуры (СПиКТ) для проведения испытаний на радиационную стойкость ЭКБ и исследований свойств полупроводниковых материалов в условиях комплексного воздействия ИИ и температуры.

Описание и принцип работы СПиКТ

Система состоит из экспериментальной камеры объемом 6 л (термостабилизируемый бокс) с креплениями для объектов испытаний, системы термостатирования с нагревательными и охлаждающими элементами, кабельными линиями и датчиками температуры, автоматизированного рабочего места (APM) на базе компьютера со специализированным программным обеспечением, источниками питания и измерительными модулями. Особенность системы заключается в том, что все управляющие элементы, APM и измерительные модули с помощью кабельных линий вынесены из зоны воздействия ИИ, а в экспериментальном зале располагаются только термостабилизируемый бокс камеры и система регулировки температуры, не чувствительные к воздействию ИИ.

Структурная схема СПиКТ представлена на рис. 1. На рис. оснастка СПиКТ 1 состоит из термостабилизируемого бокса и системы термостатирования с нагревательными и охлаждающими элементами, кабельными линиями и датчиками температуры. На рис. 2 приведен эскиз оснастки для СПиКТ. Образцы ЭКБ располагаются в термостабилизируемом боксе 1 объемом 6 литров. Бокс устанавливается на стальную раму 2, на которой закрепляется система трубопроводов с шаровыми кранами, сопловыми герметичными хомутовыми нагревателями 3 и термовоздуходувкой 4, а также сосуд Дьюара LD5 5 и баллон для азота 5л-200У 6. Охлаждение экспериментального объема термостабилизируемого бокса обеспечивается регулируемым испарением жидкого азота, а нагревание - прокачкой воздуха через сопловые нагреватели.

В соответствии с нормативными документами при проведении радиационных испытаний при пониженных температурах не допускается образования влаги и инея (проводящих элементов) в рабочем объеме и на испытуемом объекте. Баллон со сжатым азотом 5л-200У предназначен для предварительной продувки внутреннего объема бокса перед его заполнением парами азота с температурой ниже 15 °С для предотвращения образования инея. Регулировка расхода азота производится с помощью редуктора A-30-KP1-M.



Рис. 1. Структурная схема СПиКТ: 1 – источник ИИ; 2 – ИИ; 3 – коллиматор; 4 – испытываемый объект; 5 – оснастка СПиКТ; 6 – комплект кабелей и разъемов: термопарные кабели – 8 шт., сигнальный кабель типа «витая пара», силовые линии питания нагревателя; 7 – панель коммутации для кабельных соединений; 8 – контрольно-измерительная аппаратура; 9 – система мониторов;10 – компьютер



Рис. 2. Оснастка для системы поддержания и контроля температуры: 1 – термостабилизируемый бокс; 2 – силовая рама; 3 – сопловые герметичные хомутовые нагреватели; 4 – термовоздуходувка Steinel; 5 – сосуд Дьюара LD5; 6 – баллон для азота 5л-200У

На рис. 3 приведена система трубопроводов системы поддержания и контроля температуры с кранами и потоковыми нагревателями.

Для создания температуры в боксе в диапазоне от -60 °C до температуры помещения используется магистраль с жидким азотом. В этом режиме кран 3 открыт, а краны 4 и 5 перекрыты. Начальная температура паров жидкого азота в сосуде Дьюара -195 °C. Регулировка расхода жидкого азота производится путем изменения электрической мощности, подаваемой к нагревателю 6. Величина сопротивления нагревателя 12,7 Ом. Контроль нижнего уровня азота осуществляется с помощью двух термопар. Первая термопара (поз. 7) предназначена для контроля уровня жидкого азота и подачи сигнала на отключение нихромового нагревателя. Вторая термопара располагается на 5 см выше первой и предназначена для предупреждения о критически низком уровне азота, сигнализируя о необходимости своевременно добавить жидкий азот в систему без отключения нагревающего элемента испарителя. Добавление азота в сосуд Дьюара производится через специальное заливное отверстие. Отключение нагревателя и срабатывание сигнализации низкого уровня азота происходит в автоматическом режиме, сообщение о низком уровне жидкого азота выводится с помощью специализированного программного обеспечения (ПО) на экран компьютера.



Рис. 3. Система трубопроводов системы поддержания и контроля температуры: 1, 2 – сопловые герметичные хомутовые нагреватели; 3,4,5 – кран шаровой; 6 – нихромовый нагреватель; 7 – термопара

Для создания температуры в боксе в диапазоне от температуры в помещении (18–23 °C) до 125 °C используется магистраль с термовоздуходувкой. В этом режиме кран 5 открыт, а краны 3 и 4 перекрыты. Начальная температура воздуха, подаваемого термовоздуходувкой, не превышает 230 °C, но может быть кратковременно повышена для ускорения выхода на стационарный режим поддержания температуры.

При разработке конструкции системы поддержания и контроля температуры для подтверждения правильности выбранных решений были выполнены тепрасчеты. лофизические Расчеты выполнялись в приложении Flow Simulation к CAD-продукту Solid-Works [2]. Для выполнения расчетов построена модель СПиКТ. При выполнении расчетов проведена оценка рабочих параметров камеры в диапазоне температур от плюс 125 °С до -60 °С при изменении потока газа (азота), проходящего через теплообменники, и в зависимости от мощности потоковых нагревателей, установленных на теплообменниках. Мощность нагревателей изменялась от 30 до 105 Вт. Скорость потока газообразного азота менялась за счет изменения массового расхода жидкого азота. Расход жидкого азота задавался от 0,1 до 0,3 г/с. Температура жидкого азота принята равной –195°С. На рис. 4 показана часть расчетной модели (теплообменник) с результатом проведения одной итерации расчета со следующими

параметрами: расход жидкого азота 0,1 г/с, мощность поточного нагревателя 30 Вт.

Для дополнительного нагрева воздуха, подаваемого термовоздуходувкой, предусмотрены сопловые герметичные хомутовые нагреватели типа Z.11 (поз. 1 и 2 рис. 3), предназначенные для увеличения скорости изменения температуры в рабочем объеме бокса и уменьшения времени выхода на термостатированный режим.

На рис. 5 представлен термостабилизируемый бокс, который состоит из внутренней и внешней камер. Внутренняя термоизолированная камера объемом 6 л имеет крепления для образцов и систему рассеивания поступающего воздуха или азота. Внешняя камера предназначена для механической защиты теплоизоляции и крепления панелей с разъемами типа СР-50: 4 на верхней панели и 21 на боковой панели. Впускное окно бокса не закрывается теплоизоляцией и имеет крепеж для сменных конверторов ИИ различной толщины и состава. В пробных экспериментах термостабилизируемый бокс имел впускное окно для прохождения ИИ из стали толщиной 4 мм. Вид оснастки СПиКТ со снятым впускным окном представлен на рис. 6.



Рис. 4. Теплообменник



Рис. 5. Термостабилизируемый бокс: 1 – верхняя панель разъемов; 2 – выпускной клапан; 3 – впускное окно; 4 – боковая панель разъемов



Рис. 6. Оснастка СПиКТ со снятым впускным окном

Электрическая схема системы поддержания и контроля температуры представлена на рис. 7. Измерение температуры в контрольной точке термостатированного бокса проводится с помощью ХКтермопары по «0»-каналу 8-ми канального аналогового измерительного модуля i7018P [3]. Если требуемая температура выше температуры испытательного объема с помощью модуля i7063D [4] замыкается цепь реле К1 и включается термовоздуходувка, нагнетающая горячий воздух во внутреннюю камеру термостатированного бокса. При достижении требуемой температуры модуль i7063D выключает реле термовоздуходувки. Если требуемая температура ниже температуры испытательного объема с помощью модуля i7063D замыкается цепь реле K2 и включается нихромовый нагреватель в сосуде Дьюара, что приводит к интенсивному выбросу азота во внутреннюю камеру термостатированного бокса. При достижении требуемой температуры i7063D выключает реле нихромового нагревателя. С помощью i7063D можно включить через реле K3 сопловые герметичные хомутовые нагреватели, что позволяет ускорять процесс прогрева внутренней камеры термостатированного бокса.



Рис. 7. Упрощенная электрическая схема СПиКТ: ИБП – источник бесперебойного питания; ПК – персональный компьютер; D540A – источник питания 24 B; i7520 – конвертер интерфейсов RS232/485; i7018P – модуль аналогового ввода; i7063D – модуль ввода/вывода; K1, K2, K3 – реле МКУ48-С; R1, R1, R3 – нагреватели
Контроль уровня жидкого азота осуществляется по показаниям термопары «7»-канала. При резком повышении температуры модуль i7063D должен отключать реле нихромового нагревателя в сосуде Дьюара, предотвращая его перегрев.

Управление модулями СПиКТ осуществляется с помощью компьютера из состава автоматизированного рабочего места (АРМ) со специализированным программным обеспечением (ПО) по последовательному интерфейсу RS232. Модули серии i7000 не поддерживают RS232 непосредственно, поэтому в схеме предусмотрен автоматически настраиваемый преобразователь интерфейсов RS232/RS485 - i7520 [5]. Специализированное ПО СПиКТ с закрытым кодом построено на основе свободно распространяемого производителем модулей серии i7000 ActiveX компонента DCON X (www.icpdas.com) на языке программирования Object Pascal [6], разработанном компанией Borland, для операционной системы MS Windows XP, Windows 7, Windows 8 и Windows 8.1 с 32х или 64х битной архитектурой.

Главное окно программы, имеющей стандартный, интуитивно-понятный интерфейс (SDI), представлено на рис. 8. Верхнюю часть окна программы занимает автоматически масштабируемый график зависимости температур, регистрируемых с помощью i7018P, и требуемой температуры от времени. В нижнем левом углу главного окна программы в разделе «Общие настройки» расположены органы

«Дополнительно» расположены органы задания требуемой температуры, температуры помещения, сигнализатор уровня жидкого азота и периода опроса измерительного модуля i7018P. С помощью кнопки «Поиск» проводится инициализация начального состояния модулей i7018Р и i7063D, кнопкой «Пуск» запуск и остановка считывания значений температуры включенных измерительных каналов и вывод информации в виде графика зависимости этих температур от времени на экран и в файл автоматически создаваемого протокола, кнопкой «Сохранить» сохранение считанных данных в текстовый файл типа Comma Separated Values (*.csv). Кнопки «О программе» и «Выход» выполняют стандартные для SDI функции. В нижней полосе программы показываются данные о работе модулей: наличие связи, температура холодных спаев термопар, время регистрации температуры, текущее время.

Испытания СПиКТ

Испытания проводились с целью проверки работоспособности СПиКТ, а также для определения точности поддержания температуры для крайних значений диапазона температур -50° С и 120° С.

Характеристики СПиКТ проверены экспериментально в условиях воздействия ИИ установок комплекса «Пульсар» [7]. Оснастка СПиКТ была размещена в экспериментальном зале ОК «Пульсар»



Рис. 8. Интерфейс специализированного ПО

настройки последовательного порта компьютера: адрес порта, скорость порта и строчный терминал последовательного порта. В разделе «i7018P» находятся настройки измерительного модуля i7018P: адрес устройства, диапазон измерений и включение или отключение измерительных каналов. В разделе «i7063D» находятся настройки измерительного модуля i7063D: адрес устройства и включение или отключение релейных выходов. Другие настройки модулей могут быть осуществлены с помощью DCON-Utility, разработанной ICPDAS CO, Ltd. В разделе и с помощью 80 м экранированного жгута кабелей состыкована с АРМ, размещённым в «измерительной» ОК «Пульсар». Силовая, релейная часть СПиКТ и АРМ подключались непосредственно к сети общего питания 220 В.

Во внутреннюю камеру термостабилизируемого бокса была установлена типовая плата с ЭКБ. Горячий спай термопары «0»-канала был закреплен на поверхности ЭКБ. Горячие спаи двух других термопар были закреплены в произвольных местах платы. В сосуд Дьюара был залит жидкий азот. После запуска программы выставлена требуемая температура -50 °C. Контрольная температура в точке в термостабилизируемом боксе установилась за 40 минут и автоматически поддерживалась в течение 2-х часов. На рис. 9 представлены показания термопар при измерениях. Красным цветом на графике указана внешняя температура бокса. Броски значений температуры связаны с наличием электромагнитных помех экспериментальном зале. Оранжевым цветом обозначена установившаяся температура в контрольной точке. Желтым и зеленым цветом обозначены температуры на образце платы в термостабилизируемом боксе. Бирюзовым цветом на графике обозначена температура в сосуде Дьюара. Видно, что после 100 минут работы уровень жидкого азота снизился до критического.

рующая реальный объект испытаний. Термопара располагалась непосредственно на плате. На рис. 12 приведены показания температуры печатной платы при работе СПиКТ во время рабочего импульса установки ЛИУ-30. Рабочая тем-пература в камере составляла 125 °С. На впускном окне располагался стальной фильтр толщиной 1 мм. Уровень экспозиционной дозы на переднем фланце впускного окна составил 1,5 кР. Измерения дозы внутри рабочего объема камеры не проводилось, так как температура внутри превышала рабочую температуру детекторов.



Рис. 9. Показания термопар при измерениях

На рис. 10 представлены результаты измерения контрольной температуры. Температура в течение 2-х часов поддерживалась на уровне –49,98 ± 0,05 °C.



Рис. 10. Измерения контрольной температуры -50 °С

Аналогичные эксперименты проведены для температуры 120 °С. Выход на режим составил 1 час. Установившаяся температура в контрольной точке в течение 2-х часов составляла 119,99 \pm 0,12 °С. На рис. 11 представлены результаты измерения контрольной температуры 120 °С.

На следующем этапе проверки работоспособности СПиКТ были проведены испытания в условиях облучения на установке ЛИУ-30 [8]. В рабочем объеме камеры располагалась печатная плата, имити-



Рис. 11. Измерения контрольной температуры 120 °С



Рис. 12. Температура печатной платы в рабочем объеме СПиКТ при воздействии И И ЛИУ-30

Заключение

Во ВНИИЭФ создана радиационностойкая система поддержания и контроля температуры для исследований и испытаний ЭКБ и малогабаритных приборов в условиях воздействия импульсного гамма-излучения.

Экспериментально подтверждена работоспособность СПиКТ по заданию и поддержанию температур в диапазоне от -50 °C до 125 °C

Литература

1. Модель космоса: Научно-информационное издание: В 2 т. /Под ред. М. И. Панасюка, Л. С. Новикова. – Т.2: Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. – М.: КДУ, 2007. С. 1144.

2. Тику Ш. Эффективная работа: SolidWorks 2004. – СПБ.: Питер, 2005 г. С. 768.

3. I-7017/18/19, M-7017/18/19 User's Manual, Rev: B1.3 7PH-020-B13.

4. I-7000 DIO Manual Rev: B1.3.

5. 7000 Bus Converter User's Manual (Version 1.8 Jan/2006, 7PH-006-10).

6. Миллер, Тодд, Пауэл, Дэвид и др. Использование Delphi 3. Специальное издание. :Пер. с англ. – К. :Диалектика, 1997. С. 768. – Парал. Тит. Англ.

7. Пунин В. Т., Савченко В. А., Завьялов Н. В. и др. Мощные линейные индукционные ускорители электронов и облучательные комплексы на их основе для радиационных исследований // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. – Саров. Вып. 1. 2001. С. 356–363.

8. Павловский А. И., Босамыкин В. С., Герасимов А. И. и др. Мощный линейный импульсный ускоритель пучка электронов на радиальных линиях ЛИУ-30 // ПТЭ. 1998. № 2. С. 13–25.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ СПЕКТРАЛЬНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОГО НF/DF-ЛАЗЕРА

Э. А. Газизова, А. В. Бурцев, С. Д. Великанов, Р. В. Порубов, В. В. Щуров

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

Уникальный спектр излучения HF/DF-лазера, состоящий из нескольких десятков отдельных спектральных линий, позволяет рассматривать такой лазер для мониторинга атмосферы. В области спектра излучения данного лазера присутствуют полосы поглощения таких веществ как HCl, N₂O, SO₂, углеводороды, поэтому данный лазер может, в частности, применяется для контроля утечек природного газа и нефтепродуктов из магистральных трубопроводов.

Эффективным методом измерения концентрации углеводородов в воздухе является бесконтактный метод дифференциального поглощения с использованием лазерного источника.

Для дальнейшего совершенствования методов применения химических лазеров в области мониторинга атмосферы, важно иметь полное представление о богатом спектральном составе излучения HF/DF-лазера.

В ходе данной работы были проведены экспериментальные исследования по измерению расходимости лазерного излучения электроразрядного импульсно-периодического химического HF/DF-лазера.

С использованием внешнего неустойчивого резонатора проведены исследования спектрального состава лазерного излучения электроразрядного химического лазера.

Также представлено распределение энергии по полосам и спектральным линиям в процентах от общей энергии излучения. На основании полученных данных представлено распределение энергии по спектральным областям.

Измерение расходимости лазерного излучения проводилось методом калиброванных диафрагм. Схема измерения приведена на рис. 1 [1].



Рис. 1. Схема измерения расходимости лазерного излучения: 1 – лазер, 2 – зеркала резонатора, 3 – сферическое зеркало *F* = 10000 мм, 4 – клин из CaF₂, 5 – диафрагма, 6 – измеритель полной энергии, 7 – измеритель энергии, прошедшей через диафрагму

Излучение лазера *1*, рис.1, сформированное неустойчивым резонатором *2*, подавалось на длиннофокусное зеркало *3*. С помощью клина *4* излучение делилось на две части. Одна часть попадала на измеритель *6*, который фиксировал полную энергию лазерного импульса, вторая – на диафрагму *5*, находящуюся в фокусе зеркала *3*. Измеритель *7* регистрировал энергию, прошедшую через диафрагму.

По соотношению показаний измерителей определялась доля энергии, прошедшая через диафрагму. Эксперименты проводились с десятью разными диафрагмами с размером отверстия от 0,66 мм до 5,06 мм.

Расходимость излучения θ оценивалась по формуле:

$$\theta = d/F,\tag{1}$$

где *d* – диаметр диафрагмы, *F* – фокус зеркала.

Результаты измерения расходимости приведены на рис. 2. Там же даны расчетные кривые, выполненные по программе «Fresnel» [2].



Рис. 2. Зависимость энергии от расходимости излучения: точки – эксперимент, кривые – расчет

Отличие экспериментальных значений от расчетных кривых может быть обусловлено неточностью изготовления поверхности зеркал резонатора лазера. Тем не менее, для обоих типов лазера половина энергии лежит в угле менее 100 мкрад.

На рис. З приведены экспериментально зарегистрированные ближняя и дальняя зоны лазерного излучения.

Как видно, максимальный диаметр пятна в дальней зоне излучения, находящейся в фокальной плоскости сферического зеркала с F = 10000 мм, не превышает 2 мм, что соответствует расходимости 200 мкрад.



Рис. 3. Фотографии зон лазера: а – ближняя зона, б – дальняя зона

На рис. 4 приведено распределение энергии в дальней зоне излучения, снятое с помощью клина Рогульского, образованного алюминированным зеркалом и пластиной с интерференционным диэлектрическим покрытием, имеющим коэффициент пропускания порядка 50 %.



Рис. 4. Распределение энергии в дальней зоне, снятое с клина Рогульского

Сравнение двух распределений показывает, что диаметры пятен во всех порядках отражения примерно одинаковы, независимо от того, покоится рабочая смесь или движется. Следовательно, можно сделать вывод о малом влиянии неоднородностей плотности рабочей среды на расходимость излучения.

Изучение спектрального состава излучения электроразрядного химического лазера с неустойчивым резонатором (коэффициент увеличения M = 2,5) проводилось по схеме, приведенной на рис. 5 [1].

Часть излучения отводилась клином 4, рис. 5, на реплику дифракционной решетки 5. От реплики на сферическое зеркало 6 подавалась требуемая часть спектра (для HF-лазера это область между пятым и шестым порядками отражения, для DF-лазера между седьмым и восьмым). В фокусе зеркала 6 устанавливалась щелевая диафрагма, вырезавшая отдельную линию спектра лазерного излучения. Спектральная линия ослаблялась диффузно рассеивающим экраном 8 и регистрировалась фотоприемником 10. Для регистрации всего лазерного импульса применялся приемник 11, на который попадало излучение, отраженное диффузным экраном 9. Сравнение сигналов с двух фотоприемников позволяло определить задержку генерации на определенном переходе относительно начала импульса излучения.



Рис. 5. Схема измерений спектрального состава излучения:
1 – лазер; 2, 3 – зеркала резонатора, 4 – клин из CaF₂,
5 – реплика дифракционной решетки 100 штр/мм, 6 – зеркало сферическое, 7 – щелевая диафрагма шириной 3 мм;
8, 9 – диффузно рассеивающий экран; 10, 11 – измеритель формы лазерного импульса Vigo System PD-3, 12 – юстировочный лазер, λ = 527 нм; 13 – поворотное зеркало

Для определения энергии линии излучения в схему вместо диффузно рассеивающего экрана устанавливался измеритель энергии Molectron. Так как длина оптического пути от выходного зеркала резонатора до приемника излучения составляла примерно 13 м, то для HF- лазера вводилась соответствующая поправка на поглощение излучения парами воды, содержащимися в атмосфере.

Типичные интегральные импульсы мощности излучения HF- и DF-лазеров приведены на рис. 6, там же дано распределение во времени энергии импульсов.



Рис. 6. Распределение мощности и энергии импульсов HF- и DF- лазеров во времени

Видно, что при общей длительности лазерных импульсов порядка 500 нс (по уровню 0,1 интенсивности) 80 % энергии выделяется за время порядка 300 нс. Увеличение длительности лазерного импульса по сравнению с импульсом тока объясняется протеканием химической реакции. В целом формы лазерных импульсов практически идентичны. Длительность импульсов по уровню 0,1 максимальной амплитуды составляет для HF-лазера $t_{0,1}^{HF} \approx 480$ нс и для DF лазера $t_{0,1}^{DF} \approx 460$ нс, но по полувысоте импульс излучения HF-лазера длиннее примерно на 50 нс.

Средняя мощность импульсов может быть рассчитана по формуле [3]:

$$W = \sum_{i=1}^{N} \frac{W_i}{N}.$$
 (2)

Для HF-лазера $W_{\rm HF} \approx 83$ Отн. ед., для DF-лазера $W_{\rm DF} \approx 64$ Отн. ед. Пиковые мощности в отдельные моменты времени гораздо выше.

Спектральный состав излучения DF-лазера приведен на рис. 7.

Распределение энергии по полосам и спектральным линиям в процентах от общей энергии излучения приведено в табл. 1.



2

Таблица 1

Распределение энергии генерации по спектру DF-лазера

Поло- са	Линия	Длина волны, мкм	Энергия линии, %	Энергия полосы, %
	P1(6)	3,612182	1,0	
	P1(7)	3,644939	1,8	
	P1(8)	3,678932	3,1	
1 - 0	P1(9)	3,714186	3,7	22,7
	P1(10)	3,750755	4,1	
	P1(11)	3,788654	7,5	
	P1(12)	3,827927	1,5	
	P2(4)	3,666334	0,5	
	P2(5)	3,697897	1,6	
	P2(6)	3,730689	2,1	
	P2(7)	3,764763	0,9	
2 - 1	P2(8)	3,800143	7,2	42,6
	P2(9)	3,836842	9,9	
	P2(10)	3,874933	11,9	
	P2(11)	3,914431	7,0	
	P2(12)	3,955368	1,5	
	P3(5)	3,820323	1,9	
	P3(6)	3,854441	2,2	
	P3(7)	3,8899	4,8	
3 - 2	P3(8)	3,926743	6,6	30,0
	P3(9)	3,964966	6,6	
	P3(10)	4,004645	5,9	
	P3(11)	4,045798	1,9	
	P4(3)	3,88152	0,6	
	P4(6)	3,983969	1,0	
4 – 3	P4(7)	4,020893	1,5	4,7
	P4(8)	4,059249	0,9	
	P4(9)	4,099083	0,6	

Видно, что спектр состоит из 28 линий излучения, сосредоточенных в области длин волн от 3,6 до 4,1 мкм. Наиболее энергетичной является полоса 2-1, в ней сосредоточено 42,6 % всей лазерной энергии. В этой же полосе находятся и наиболее сильные линии излучения – $P_2(9)$ и $P_2(10)$, на них приходится свыше 20 % энергии [4].

В табл. 2 приведено распределение лазерной энергии по различным спектральным диапазонам.

Таблица 2

Распределение энергии по с	спектральным диапазонам
----------------------------	-------------------------

Диапазон, мкм	Энергия лазерного излучения в диапа- зоне, отн. ед.	Доля энер- гии от об- щей, %	
3,6 - 3,7	2,6	8,1	
3,7 - 3,8	5,8	18,3	
3,8 - 3,9	12,8	40,0	
3,9-4,0	7,3	22,7	
4,0-4,1	3,5	10,9	

Из данных табл. 2 следует, что около 40 % всей лазерной энергии сосредоточено в диапазоне длин волн от 3,8 до 3,9 мкм, около 80 % энергии лежит в диапазоне от 3,7 до 4,0 мкм.

На рис. 8 и в табл. 5 приведены результаты экспериментального исследования спектрального состава излучения НГ-лазера. Данные пересчитаны на торец лазера, учтено поглощение излучения в атмосфере. Данные по коэффициентам поглощения отдельных линий были взяты из базы данных Hitran, значения их приведены в табл. 4.



Рис. 8. Спектральный состав излучения HF-лазера

Таблица 4

К	юэф	фициенты	поглощения
---	-----	----------	------------

Коэффициент погло- щения, 1/атм × км	Длина волны, мкм	Переход
431,2265	2,639658	$P_1(4)$
0,646727	2,70752	$P_1(6)$
1612,604	2,744129	$P_1(7)$
5483,211	2,782642	$P_1(8)$
491,0698	2,823136	$P_1(9)$
24,2752	2,957267	$P_1(12)$
2006,789	2,760364	P ₂ (4)
3160,98	2,795271	P ₂ (5)
8022,77	2,83181	$P_2(6)$
314,4386	2,870568	$P_2(7)$
29,63291	2,911064	P ₂ (8)
844,4047	2,953913	$P_2(9)$
2123,584	2,854044	$P_{3}(3)$

Таблица	6
---------	---

		-	-		
Поло-		Длина	Энергия	Энергия	
110,10-	Линия	волны,	линии,	полосы,	
Ca		мкм	%	%	
	P1(4)	2,639658	0,06		
	P1(6)	2,70743	0,12		
1 - 0	P1(7)	2,744041	4,67	41,48	
	P1(8)	2,782562	18,32		
	P1(9)	2,823064	18,31		
	P2(3)	2,727471	0,19		
	P2(4)	2,760433	0,30		
	P2(5)	2,795217	3,27		
2 - 1	P2(6)	2,83189	20,48	51,06	
	P2(7)	2,870519	14,45		
	P2(8)	2,911174	10,65		
	P2(9)	2,953948	1,72		
	P3(4)	2,888979	1,30		
	P3(5)	2,925696	2,40		
2 2	P3(6)	2,964421	1,90	7 46	
5-2	P3(7)	3,00525	1,39	7,40	
	P3(8)	3,048241	0,14		
	P3(9)	3,093495	0,33		

Распределение энергии генерации по спектру HF-лазера

Из экспериментальных данных видно, что основная энергия генерации (\approx 82 %) сосредоточена в пяти линиях: P₁(8), P₁(9), P₂(6), P₂(7), P₂(8), находящихся в спектральном диапазоне от 2,78 до 2,91 мкм [4].

В табл. 6 приведено распределение лазерной энергии по различным спектральным диапазонам HF лазера.

Из данных табл. 6 следует, что свыше 50 % всей энергии НF-лазера сосредоточено в диапазоне длин волн от 2,8 до 2,9 мкм, около 98 % энергии лежит в диапазоне от 2,7 до 3,0 мкм.

Распределение энергии по спектральным диапазонам

Диапазон, мкм	Энергия лазерного излучения в диапа- зоне, отн. ед.	Доля энергии от общей, %
2,6-2,7	0,03	0,1
2,7 - 2,8	11,6	26,9
2,8 - 2,9	23,4	54,4
2,9-3,0	7,2	16,7
3,0-3,1	0,8	1,9

По данным табл.2 и табл.6 можно построить график распределения энергии по спектральным областям, он приведен на рис.9.



Рис. 9. Распределение энергии HF- и DF- лазеров по спектральным областям

В табл. 7 и табл. 8 приведены временные и энергетические характеристики линий излучения HFи DF- лазера.

Табл. 7 и табл. 8 дают наглядное представление о временном распределении энергии по спектральным линиям.

Таблица 7

Спектральные, энергетические и временные характеристики линий излучения НF-лазера

	Линия	Длина волны, мкм	Энергия линии, Отн.ед.	Время, нс			
Молекула				Задержка генерации	Длительность по уровню 0,1 амплитуды	Длительность по уровню 0,5 амплитуды	От начала до максимума
	P1(4)	2,639658	0,03	50	35	15	22
	P1(6)	2,70743	0,05	75	80	45	30
	P2(3)	2,727471	0,08	25	60	30	20
	P1(7)	2,744041	2,00	70	330	200	60
	P2(4)	2,760433	0,13	25	130	70	60
	P1(8)	2,782562	7,88	90	600	250	100
	P2(5)	2,795217	1,41	60	210	120	80
	P1(9)	2,823064	7,84	200	600	260	80
UE	P2(6)	2,83189	8,81	0	560	250	170
пг	P2(7)	2,870519	6,21	30	700	370	150
	P3(4)	2,888979	0,56	45	70	50	30
	P2(8)	2,911174	4,58	140	550	200	60
	P3(5)	2,925696	1,03	65	140	80	50
	P2(9)	2,953948	0,74	140	500	220	50
	P3(6)	2,964421	0,82	110	300	140	50
	P3(7)	3,00525	0,6	175	280	180	60
	P3(8)	3,048241	0,06	280	220	140	70
	P3(9)	3,093495	0,14	120	200	130	30

	Линия		Энергия линии, Отн.ед.	Время, нс			
Молекула		Длина вол- ны, мкм		Задержка генерации	Длительность по уровню 0,1 амплитуды	Длительность по уровню 0,5 амплитуды	От начала до максимума
	P1(6)	3,612182	0,33	80	70	35	25
	P1(7)	3,644939	0,54	70	140	30	20
	P2(4)	3,666334	0,16	30	70	50	55
	P1(8)	3,678932	1,00	70	280	140	30
	P2(5)	3,697897	0,50	40	90	45	45
	P1(9)	3,714186	1,15	80	500	280	30
	P2(6)	3,730689	0,68	40	150	50	45
	P1(10)	3,750755	1,30	30	550	300	110
	P2(7)	3,764763	0,29	35	170	60	55
	P3(4)	3,787506	0,20	0	150	90	90
	P1(11)	3,788654	2,33	80	700	310	100
	P2(8)	3,800143	2,3	40	360	200	60
	P3(5)	3,820323	0,67	20	130	60	60
	P1(12)	3,827927	0,47	0	700	500	300
DE	P2(9)	3,836842	3,11	40	600	300	100
DF	P3(6)	3,854441	0,80	0	480	60	75
	P2(10)	3,874933	3,80	40	700	400	140
	P4(3)	3,88152	0,21	55	80	50	25
	P3(7)	3,8899	1,70	30	270	150	70
	P2(11)	3,914431	2,22	55	600	450	50
	P3(8)	3,926743	2,31	30	480	270	110
	P4(5)	3,948449	0,10	40	60	20	30
	P2(12)	3,955368	0,46	130	400	250	50
	P3(9)	3,964966	2,36	40	700	340	140
	P4(6)	3,983969	0,31	55	80	50	35
	P3(10)	4,004645	2,10	50	750	480	160
	P4(7)	4,020893	0,49	80	220	150	70
	P3(11)	4,045798	0,65	80	680	250	100
	P4(8)	4,059249	0,30	140	330	200	100
	P4(9)	4,099083	0,20	250	380	240	90

Литература

1. Ананьев Ю. А. Оптические резонаторы и проблема расходимости лазерного излучения – М.: 1979.

2. Серов Р., Малютин А. и др. FRESNEL 4.8 – М.: 2010.

3. Степанов Б. Н. Методы расчета оптических квантовых генераторов. Минск. Т. 1. 1966.

4. Гросс Р., Ботт Д. Химические лазеры. – М.: 1980.

НОРМАЛИЗУЮЩЕЕ ДЕЙСТВИЕ НИЗКОЧАСТОТНОГО ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ВЕГЕТАТИВНУЮ НЕРВНУЮ СИСТЕМУ КРЫС

<u>О. В. Глухова,</u> В. В. Баркин, К. Ю. Краюхина, Е. П. Лобкаева

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

Введение

В последние годы большое внимание уделяется разработке и внедрению в биологию и медицину современных технологий, основанных на эффектах низкоинтенсивного электромагнитного поля (ЭМП) различных частотных диапазонов [1]. Биологические эффекты низкоинтенсивных полей, согласно гипотезе Пресмана [2], обусловлены, информационным воздействием. Биологические отклики при этом не сопровождаются нагревом тканей и структурными изменениями в организме.

Имеются доказательства высокой чувствительности к действию низкоинтенсивного магнитного поля вегетативной нервной системы [3–6]. Одним из наиболее показательных методов исследования состояния вегетативной нервной системы (ВНС) является оценка вариабельности сердечного ритма (ВСР). Анализ ВСР является важным звеном на пути выявления биологических эффектов и поиска механизмов действия слабых магнитных полей (МП) [7, 8].

Наблюдаемая у нелинейных крыс в условиях свободного бодрствования гетерогенность по напряженности механизмов регуляции сердечного ритма заставляет исследователей уделять пристальное внимание зависимости отклика организма животных от нейровегетативного статуса [9]. В ряде работ было показано, что импульсное магнитное поле снижает тонус вегетативной нервной системы животных с высоким исходным вегетативным статусом до уровня нормотонии [5, 6, 10]. Наряду с этим, важной детерминантой реактивности вегетативной нервной и сердечно-сосудистой систем на экзогенное воздействие является половая принадлежность.

Целью данной работы является исследование воздействия низкочастотного импульсного магнитного поля (НЧ ИМП) на состояние вегетативной нервной системы крыс, самцов и самок с различным вегетативным статусом.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования являлись нелинейные белые крысы – самки и самцы массой от 200 до 250 граммов. Животные содержались в условиях лабораторного вивария при комбинированном освещении и свободном доступе к корму и воде. В качестве корма использовали стандартный гранулированный полнорационный комбикорм ГОСТ Р 50258-92, производства Тураково. Источником МП являлась магнитотерапевтическая установка УМТИ-3Ф, генерирующая вихревое НЧ ИМП. Воздействующий сигнал НЧ ИМП представлял по форме затухающую синусоиду частотой 100 Гц, частота следования импульсов 1 Гц. Параметры МП соответствовали режиму МП1 (табл. 1) [5]. Общее время экспозиции составляло 30 минут.

Таблица 1

Параметры воздействия низкочастотного импульсного магнитного поля

Продолжительность экспонирования, мин	Максимальное значение модуля магнитной индук- ции в центе контейнера (B _{max}), мТл
10	1,40
10	3,15
10	1,40

Оценку влияния НЧ ИМП проводили на основе результатов исследования ВСР животных. В анализе использовали интегральные показатели ВСР, относящиеся к разным методам: стресс-индекс (вариационной пульсометрии Р. М. Баевского), коэффициент вариации (временной анализа), общая мощность спектра (спектральный анализа) – являющиеся маркерами функционального состояния организма. Стрессиндекс (SI, у. е.) показывает степень централизации управления сердечным ритмом, позволяет судить о степени напряжения регуляторных систем. Коэффициент вариации (CV, %) характеризует вариабельность сердечного ритма в целом. Общая мощность спектра (TP, мс²) отражает суммарную активность вегетативных влияний на сердечный ритм.

Регистрацию кардиосигнала осуществляли с помощью лабораторного кардиографа во втором стандартном отведении. Использовали подкожные электроды в виде миниатюрной английской булавки, изготовленной из диамагнитного металла (бронза). Места установки электродов (холка) обезболивали введением 0,5 мл раствора лидокаина.

Оценивали реакцию на действие НЧ ИМП самцов и самок с разным типом вегетативной регуляции. Животных фиксировали по одному в специальном пенале из оргстекла и в течение 15 минут проводили адаптацию к условиям эксперимента. Затем в течение 1 минуты регистрировали кардиосигнал, обрабатывали его и определяли исходный вегетативный статус (ИВС). Критерием идентификации ИВС являлось значение стресс-индекс (SI): ваготония – SI \leq 2429 у.е., нормотония – 2429 \leq SI \leq 5463 у.е., симпатотония – 5463 \leq SI \leq 8500 у.е. и гиперсимпатотония – SI \geq 8500 у.е. [5, 11].

Для оценки отклика организма на действие НЧ ИМП осуществляли регистрацию кардиосигнала на 1-й, 15-й и 30-й минутах после экспонирования, а также спустя трое суток.

Статистическую обработку результатов проводили с использованием t-критерия Стьюдента и критериев Манна – Уитни и Уилкоксона [12, 13]. Значимыми считали различия при уровне р ≤ 0,05.

Результаты и их обсуждение

Анализ результатов показал, что массив животных отличался разбросом значений стресс-индекса, и, соответственно, гетерогенностью нейровегетативного статуса. Как среди самцов, так и самок были выделены животные с нормотоническим, симпатотоническим и гиперсимпатотоническим типами вегетативной регуляции (рис. 1).



Рис. 1. Процентное распределение животных обоих полов по исходному типу вегетативной регуляции: а – самцы, б – самки

Полученные средние значения показателей SI, ТР и CV в соответствии с типом вегетативной регуляции представлены в табл. 2.

Животные с симпатотоническим и гиперсимпатотоническим типом вегетативной регуляции характеризовались высокими значениями SI и низкими значениями TP, CV, что свидетельствует об исходном отчетливом превалировании адренергических механизмов регуляции сердечного ритма. Значения показателей ВСР, зарегистрированные в группе животных с нормотоническим типом вегетативной регуляции, свидетельствовали об отсутствии такого отчетливого превалирования (значения SI у данной группы животных были на 31 % ниже, а значения TP и CV- на 50 % и 45 % выше, чем у симпатотоников).

Таблица 2

Значения показателей (M ± m) SI, TP и CV, соответствующие типу вегетативной регуляции экспериментальных групп

Тип вегета- тивной регу- ляции	SI, y. e.	TP, мc ²	CV, %		
	Самцы (п	Самцы (n = 28)			
Нормотония	4629 ± 176	3,82 ± 0,47	2,63 ± 0,13		
Симпатотония	6694 ± 321	$2{,}54\pm0{,}56$	$1{,}81\pm0{,}12$		
Гиперсимпато- тония	9823 ± 681	1,86 ± 0,21	1,43 ± 0,20		
	Самки (n	= 27)			
Нормотония	4182 ± 220	5,61 ± 1,07	2,81 ± 0,12		
Симпатотония	6294 ± 751	3,05 ± 1,17	1,82 ±0,21		
Гиперсимпато- тония	10112 ± 528	1,45 ± 0,22	1,33 ± 0,10		

Результаты исследования реакции ВНС самцов

Результаты исследования реакции ВНС крыссамцов с различным типом вегетативной регуляции представлены на рис., и .

Анализ динамики SI самцов с нормотоническим типом вегетативной регуляции, подвергавшихся воздействию НЧ ИМП, показательных изменений относительно ИВС не выявил. У животных-симпатоников непосредственно после воздействия НЧ ИМП наблюдали снижение значения SI на 25 % относительно ИВС ($p \le 0,05$). Дальнейшее наблюдение показало устойчивость выявленных отклонений, в течение 30 минут после окончания воздействия значения стресс-индекса оставались на уровне 18–21 % ниже



Рис. 2. Динамика стресс-индекса (SI) крыс-самцов после воздействия НЧ ИМП: *, *** – статистически значимое отличие от исходного уровня p ≤ 0,05, p ≤ 0,001; ______ – граница диапазона нормотонии (от 2429 до 5463 у. е.)



Рис. 3. Динамика коэффициента вариации (CV) крыс-самцовпосле воздействия НЧ ИМП: *, *** – статистически значимое отличие от исходного уровня $p \le 0.05$, $p \le 0.001$



Рис. 4. Динамика общей мощности спектра (ТР) крыс-самцов после воздействия НЧ ИМП: *, *** – статистически значимое отличие от исходного уровня р ≤ 0,05, р ≤ 0,001

исходного (р \leq 0,05). Через трое суток после воздействия НЧ ИМП значение показателя SI находилось на уровне ниже ИВС на 19 % (р \leq 0,05). Воздействие НЧ ИМП привело у животных с исходным гиперсимпатотоническим вегетативным статусом к значительному (в 2,1 раза, р \leq 0,05) снижению значения SI относительно ИВС. Тенденция к снижению данного показателя сохранялась в течение всего периода наблюдения, к 30-й минуте после воздействия значение стресс-индекса находилось на уровне в 3,2 раза (р \leq 0,001) ниже ИВС. Спустя трое суток после экспонирования эффект сохранялся, о чем свидетельствовало нахождение значения SI на уровне в 2,5 раза ниже исходного (р \leq 0,001).

Согласно Баевскому [7], показатель SI отражает функциональное состояние организма и характеризует степень преобладания тонуса симпатического отдела BHC и уровень напряженности регуляторных систем организма [14]. Таким образом, наблюдаемое нами после воздействия НЧ ИМП снижение данного показателя у симпато- и гиперсимпатотоников свидетельствует о снижении активности симпатического отдела BHC и значительном снижении уровня напряженности регуляторных систем. Следует подчеркнуть, что воздействия НЧ ИМП привело к формированию у животных устойчивого состояния нормотонии.

Результаты временного анализа также свидетельствовали об изменения в состоянии ВНС крыс. Причем, у самцов с нормотоническим типом вегетативной регуляции после воздействия НЧ ИМП существенных изменений значений коэффициента вариации (CV) не отмечали. У самцов-симпатотоников сразу после воздействия НЧ ИМП наблюдали возрастание значения CV на 38 % относительно ИВС $(p \le 0.05)$. Спустя 3-е суток значение CV находилось на уровне выше исходного на 23 %. У гиперсимпатотоников наблюдали более заметный рост CV. Сразу после воздействия НЧ ИМП значение CV превысило уровень ИВС в 2,4 раза (p ≤ 0,05), данная реакция сохранялась до окончания 30-минутного наблюдения после окончания экспонирования ($p \le 0,001$). На третьи сутки обнаружили сохранение эффекта, значение СV находилось на уровне, превышающем ИВС на 57 % (p \leq 0,05).

Устойчивое статистически значимое увеличение параметра CV, отражаещего суммарный вариабельность сердечного ритма в целом, регистрируемое после воздействия у симпатотоников и гиперсимпатотоников, свидетельствует о возрастании в регуляции сердечного ритма роли автономного контура и парасимпатического звена регуляции.

Спектральный анализ показал, отсутствие v самцов-нормотоников, подвергшихся воздействию НЧ ИМП выраженных изменений общей мощности спектра (ТР). У симпатотоников сразу после окончания воздействия НЧ ИМП зарегистрировали увеличение значения ТР на 46 % относительно ИВС. Данный показатель оставался на том же уровне в течение 30 минут после воздействия, а также спустя 3 суток. Однако отклик не был статистически значимым. У самцов-гиперсимпатотоников сразу после окончания воздействия НЧ ИМП зафиксировали возрастание ТР в 3,8 раза (р ≤ 0,05). К 30-й значение ТР превысило уровень ИВС в 5 раз (p ≤ 0,001). Спустя 3-е суток после воздействия НЧ ИМП значение ТР снизилось, но продолжало оставаться на уровне более высоком относительно ИВС (на 39 %, $p \le 0.05$). При этом величина ТР соответствовала значению данного параметра для животных с нормотоническим типом вегетативной регуляции.

Известно, что общая мощность спектра отражает активность высших вегетативных центров гипоталамо-гипофизарного уровня [15]. При этом, увеличение ТР приводит к активации нижележащих уровней управления, что в свою очередь говорит об усилении активности автономного контура регуляции. Поэтому увеличение общей мощности спектра у самцов с симпатотоническим и гиперсимпатотоническим типами вегетативной регуляции под влиянием НЧ ИМП, по-видимому, связано с активацией парасимпатического звена и уменьшением влияния на сердечный ритм центрального контура регуляции.

Вместе с тем, известно, что чем выше общая мощность спектра, тем более выражены адаптационные возможности организма [16]. Поэтому можно сделать вывод, что под влиянием НЧ ИМП происходит увеличение адаптационных возможностей организма крыс-самцов с симпатотоническим и гиперсимпатотоническим типами вегетативной регуляции. Полученные нами после воздействия НЧ ИМП изменения интегрального показателя спектрального анализа – ТР согласуются с результатами полученные при анализе интегральных показателей вариационной пульсометрии (SI) и временного анализа (CV). Это может быть обусловлено возрастанием адаптационного потенциала организма животных с исходно нарушенным вегетативным балансов (несбалансированным типом вегетативной регуляции) под действием НЧ ИМП.

Результаты исследования реакции ВНС самок

Результаты исследования реакции ВНС крыссамок с различным типом вегетативной регуляции представлены на рис. 5, и



Рис. 5. Динамика стресс-индекса (SI) крыс-самок после воздействия НЧ ИМП: *,** – статистически значимое отличие от исходного уровня p ≤ 0,05, p ≤ 0,001; ______ – граница диапазона нормотонии (от 2429 до 5463 у. е.)



Рис.6. Динамика коэффициента вариации (CV) крыс-самокпосле воздействия НЧ ИМП



Рис. 7. Динамика общей мощности спектра (ТР) крыс-самокпосле воздействия НЧ ИМП

Анализ динамики SI крыс-самок с нормотоническим типом вегетативной регуляции после воздействия НЧ ИМП показательных изменений не выявил. У самок с исхолно симпатотоническим типом вегетативной регуляции в течение 30 минут после воздействия НЧ ИМП наблюдали постепенное снижение SI. К 30-й минуте отклонение значения SI от ИВС достигло максимума и соответствовало уровню на 31 % ниже ИВС. Спустя 3-е суток после значение SI снова достигло уровня ИВС. У самок-гиперсимпатотоников сразу после окончания воздействия НЧ ИМП зарегистрировали снижение SI на 26 % (р≤0,05). В течение последующих 30 минут происходило дальнейшее снижение данного показателя, достигшее в итоге уровня почти в двое ниже ИВС (р≤0,01). Однако, спустя 3 суток значение SI вернулось к уровню ИВС. Таким образом, воздействие НЧ ИМП вызывало у самок с симпатотоническим и гиперсимпатотоническим типом вегетативной регуляции снижение активности симпатического отдела вегетативной нервной системы, регистрируемое в течение 30 минут, но, в отличие от самцов, не сохранявшееся спустя 3 суток.

У самок с нормотоническим типов вегетативной регуляции после воздействия НЧ ИМП изменение значения показателя СV (временной анализ) не было выявлено. У самок-симпатотоников в течение 30 минут после окончания воздействия НЧ ИМП наблюдали тенденцию к возрастанию CV, уровень отклонения от ИВС находился в диапазоне 24–44 %. Спустя трое суток значение CV вернулось к уровню ИВС. У самок-гиперсимпатотоников в течение 30 минут после воздействия НЧ ИМП наблюдали последовательное возрастание CV, достигшее к 30-й минуте уровня в 2 раза превышающем ИВС. Спустя 3 суток значение показателя находилось на уровне исходного.

Результаты спектрального анализа подтвердили наличие кратковременных изменений вариабельности сердечного ритма у крыс-самок, вызванных воздействием НЧ ИМП. У животных с симпатотоническим и гиперсимпатотоническим типами вегетативной регуляции в течение 30 минут после воздействия наблюдали последовательное возрастание ТР, не наблюдавшиеся спустя трое суток. По-видимому, данные изменения вызваны активацией парасимпатического звена регуляции и уменьшением влияния центрального контура регуляции на сердечный ритм.

Выводы

1. Воздействие НЧ ИМП не нарушает вагосимпатический баланс крыс, как самцов, так и самок, с нормотоническим типом вегетативной регуляции.

2. Воздействие НЧ ИМП обладает нормализующим действием на работу вегетативной нервной системы крыс обоих полов с симпатотоническим и гиперсимпатоническим типами вегетативной регуляции. У животных формируется состояние нормотонии.

3. Нормализующий эффект НЧ ИМП у самцов сохранялся в течение, по крайней мере, трех суток после воздействия. У самок состояние нормотонии сохранялось в течение 30 минут после воздействия.

 Самцы отличаются более устойчивой реакцией вегетативной нервной системы на воздействие НЧ ИМП в нормализующем режиме, чем самки.

Литература

1. Чуян Е. Н. Изменение показателей вариабельности сердечного ритма под влиянием низкоинтенсивного миллиметрового излучения / Е. Н. Чуян, И. Р. Никифоров, М. Ю. Раваев и др. // Физиология живого. – 2009. Т. 17, № 2. С. 206–213.

2. Presman A. S. Electromagnetic fields and life. N.Y. Plenum press, 1968. 332 p.

3. Леднев В. В. Регуляция вариабельности сердечного ритма человека с помощью крайне слабых переменных магнитных полей / В. В. Леднев, Н. А. Белова, Е. Б. Ермаков и др. // Биофизика сложных систем. – 2008. Т. 53, Вып. 6. С. 1129–1137.

4. Ошевенский Л. В. Влияние магнитного поля, модулированного кардиоритмом, на сердечный ритм крыс / Л. В. Ошевенский, В. Н. Крылов, Е. В. Стручкова // Человек и электромагнитные поля. Сборник материалов международной конференции. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2010. С. 49–58. 5. Краюхина К. Ю., Лобкаева Е. П., Девяткова Н. С. Влияние низкоинтенсивного импульсного магнитного поля на состояние вегетативной нервной системы животных // Биофизика. 2010, Вып. 4. С. 720–726.

6. Мишагина М. Н. Влияние сложномодулированного магнитного поля на вегетативную нервную систему крыс при гипотермии / М. Н. Мишагина, Е. П. Лобкаева // Молодежь в науке. Сборник докладов девятой научно-технической конференции. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2011. С. 280–283.

7. Баевский Р. М. Современное состояние исследований по вариабельности сердечного ритма в России / Р. М. Баевский, Г. Г. Иванов, Г. В. Рябыкина // Вестник аритмология. 1999. № 14. С. 71–75.

8. Псеунок А. А. Вариабельность сердечно ритма / А. А. Псеунок // Вестник Адыгейского государственного университета. 2006. № 2. С. 222.

9. Надареишвили К. Ш. Исходная вариабельность сердечного ритма и радиочувствительность кроликов / К. Ш. Надарешвили, И. И. Месхишвили, Д. К. Надареишвили и др. // Радиационная биология. Радиоэкология. 2005. Т. 45 № 2. С. 133–144.

10. Федотов В. Д. Влияние низкочастотной импульсной магнитотерапии с индивидуальными параметрами воздействия на вариабельность сердечного ритма у пациентов с эссенциальной артериальной гипертензией / В. Д. Федотов // Кардиология. – 2012. № 1 (20). С. 186–188. 11. Абрамова Н. В. Модификация функционального состояния вегетативной нервной системы крыс низкоинтенсивным электромагнитным полем / Н. В. Абрамова, Л. В. Ошевенский, В. Н. Крылов // Человек и электромагнитные поля, Сборник материалов международной конференции. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2005. С. 112–121.

12. Лапч С. Н. Статистические методы в медикобиологических исследованиях с использованием Excel / С. Н. Лапач, А. В. Чубенко, П. Н. Бабич. // Киев. 2001. С. 319.

13. Реброва О. Ю. Статистический анализ медицинских данных. Применение пакета прикладных программ STATISTICA. – М.: Медиа Сфера. 2002. С. 312.

14. Чуян Е. Н. Изменение показателей вариабельности сердечного ритма под влиянием низкоинтенсивного миллиметрового излучения / Е. Н Чуян, И. Р. Никифоров, М. Ю. Раваева и др. // Физика живого. Т. 17, № 2. 2009. С. 206–213.

15. Баевский Б. М. Анализ вариабельности сердечного ритма: история и философия, теория и практика // Р. М. Баевский // Клиническая информатика и телемедицина. 2004. Т. 1. С. 54–64.

16. Хаспекова Н. Б. Оценка симпатических и парасимпатических механизмов регуляции при вегетативных пароксизмах / Н. Б. Хаспекова, Х. К. Алиева, Г. М. Дюкова // Советская медицина. 1989. № 9. С. 25–28.

ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ НАСТРОЙКИ МИШЕНИ В ТРАНСПОРТНОМ ПРОСТРАНСТВЕННОМ ФИЛЬТРЕ

<u>М.С. Глушков,</u> И. И. Соломатин, А. В. Виноградов, А. В. Андраманов, Д. В. Бакайкин

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

Лазерная установка нового поколения на основе неодимового стекла рассчитана на облучение мишеней излучением второй гармоники (2ω) [1]. Конструкция финального оптического модуля (ФОМ) включает клиновый элемент, предназначенный для разведения второй гармоники и остатков первой гармоники (ш), поэтому наведение лазерных пучков на мишень должно осуществляться на частоте второй гармоники. Для наведения на мишень настроечные источники излучения 20 будут вбрасываться в фокальные плоскости 2ю выходных линз транспортных пространственных фильтров (ТПФ) каждого из каналов. В качестве настроечных источников 200 предполагается использовать лазерные диоды с расходимостью порядка нескольких градусов или лазеры. Трудности в совмещении направлений распространения лазерного излучения основной гармоники и настроечного излучения второй гармоники вызваны наличием диагностического клина величиной 3' (0,000873 рад), установленного под углом 41°12′ за выходной линзой ТПФ. Необходимо так вбрасывать настроечное излучение, чтобы после диагностического клина оно распространялось по пути излучения основной гармоники.

Вбрасываемый источник излучения 2ω входит в состав системы транспортировки излучения к камере взаимодействия. На рис. 1 представлена принципиальная оптическая схема стенда вбрасываемого источника излучения второй гармоники. Стенд включает два источника излучения ω и 2ω, выходную линзу ТПФ, диагностический клин, цифровую камеру с зеркальным объективом, стойку управления со специальным программным обеспечением.



Рис. 1. Принципиальная оптическая схема стенда вбрасываемого источника излучения второй гармоники

Стенд был создан для экспериментальной проверки расчетных значений величины поперечного сдвига hисточника 2 ω , при котором пучки лучей ω и 2 ω за клином распространяются параллельно друг другу.

Лазерные диоды источника ω установлены в отверстия на горизонтальной планке. Центральное отверстие предназначено для предварительной настройки стенда. Диоды источника ω расположены симметрично относительно центрального отверстия и направлены на лизну ТПФ. Источник излучения ω находится в фокальной плоскости выходной линзы ТПФ на расстоянии f_{ω} ТПФ = 14228 мм. При этом после линзы ТПФ излучение каждого из двух лазерных диодов ω становится плоскопараллельным. Собственно источники излучения ω является виртуальным и находится в центре отрезка, соединяющего два лазерных диода.

Источник излучения 2 ∞ выполнен в виде вертикальной планки с отверстием (в середине), установленной на трехкоординатный линейный транслятор, позволяющий осуществлять перемещения с точностью 10 мкм. В отверстие установлен лазерный диод с излучением 2 ∞ направленный на линзу ТПФ. Источник излучения 2 ∞ находится в фокальной плоскости 2 ∞ линзы ТПФ на расстоянии $f_{2\omega}$ ТПФ = 13918 мм. Излучение источника 2 ∞ после линзы ТПФ так же становится плоскопараллельным.

Диагностический клин расположен за линзой ТПФ. Клин экспериментального стенда из стекла К8 имеет угол при вершине 0,0071 рад. Клин заклонен в горизонтальной плоскости на угол 45°. Вершина клина ориентирована так, чтобы лучи проходящие через клин отклонялись в горизонтальной плоскости (плоскости рис. 1).После прохождения клина лучи источников ω и 2 ω остаются плоскопараллельными. Диагностический клин отклоняет лучи ω и 2 ω на разные углы. Поэтому для того, чтобы на выходе из клина пучки лучей ω и 2 ω распространялись параллельно друг другу необходимо, чтобы источник 2 ω был сдвинут относительно прямой, проходящей через центр ТПФ4 (источник ω) и центр выходной линзы ТПФ, как показано на рис. 1, при этом $\alpha_{пад2\omega} > \alpha_{пад\omega}$.

На стенде используются цифровая камера PixeLINK B741EG имеющая следующие характеристики: разрешение – 1280×1024 пикселей; размер матрицы – 8,6 × 6,8 мм; размер пикселя – 6,56 мкм; глубина «цвета» – 256 градаций серого. Цифровая камера подключена к управляющему компьютеру. Специальное программное обеспечение описано в отдельной главе.

Цифровая камера служит для определения величины угла между падающими на зеркало пучкамию и 2ю. После клина размещено измерительное вогнутое сферическое зеркало с f изм = 1193 мм. В фокальной плоскости зеркала, установлена цифровая камера. Между клином и сферическим зеркалом установлены два плоских поворотных зеркала системы транспортировки (не показаны на рис. 1).

Стандартный способ определения угла между двумя пучками лучей состоит в измерении расстояния между геометрическими серединами световых пятен в фокальной плоскости линзы или зеркала [2]. Диаметр каждого из пятен будет характеризовать собственную расходимость пучков. Середина фокального пятна будет соответствовать оси пучка. Так как по условиям задачи длины волн в пучках различаются (пучки лучей ω и 2 ω), то в экспериментах в качестве диагностического объектива выбрано именно вогнутое зеркало. Линза может исказить результаты из-за собственной дисперсии.

Выставление изображений пучков с точностью до 1-го пикселя по камере при фокусном расстоянии вогнутого зеркала 1193 мм – будет соответствовать углу между пучками лучей ω и 2 ω за клином – 5,6 · 10⁻⁶ рад (запланированная по техническому проекту лазерной установки точность настройки по углу составляет ~2,6 · 10⁻⁶ рад)[1]. Использование вогнутого зеркала с большим фокусным расстоянием позволит увеличить разрешение при диагностике угла между пучками лучей ω и 2 ω .

Оптическая система, состоящая из линзы ТПФ и измерительного сферического зеркала, перестраивает изображение источника ω с уменьшением ~12 раз, а изображение источника 2 ω с уменьшением ~11,7 раз. Получаем, что по камере разрешение величины поперечного сдвига Δh источника 2 ω составляет ~80 мкм на пикселей, что сравнимо с требованиями проекта – 75 мкм. Последняя оценка так же указывает на необходимость использование вогнутого зеркала с большим фокусным расстоянием в создаваемой установке.

Программа обработки данных с цифровой камеры позволяет регистрировать изображения лазерных диодов, задающих положения источников, и вычислять их координаты.

На рис. 2 представлено окно программы, с помощью которой проводилась регистрация изображений лазерных диодов источников ω и 2 ω на камере и определение координат изображений источников. Алгоритм определения координат центров изображений диодов основан на вычислении «центра тяжести», поэтому точность определения может быть меньше одного пикселя. Измеренная дисперсия в условиях данного стенда не превышает 0,3 пикселя.

В левом окне программы зафиксировано изображение 3-х маркеров. Крайние горизонтальные диоды излучают на частоте основной гармоники, в середине – диод источника 2ω.В правом окне программы предусмотрены кнопки «источник ω » и «источник 2 ω » для вычисления координат источников. Под этими кнопками расположены окошки с координатами центров в пикселях камеры. На рисунке видно, что расхождение по горизонтали составляет 0,1 пиксель (0,656 мкм), что означает совмещение направлений распространения пучков с ω и 2 ω в горизонтальном направлении.

На рис. 3 представлена схема распространения световых лучей через клин величиной ϕ с коэффициентом преломления n.



Рис. 2. Окно программы регистрация изображений диодов источников ω и 2ω на камере и вычисления координат источников



Рис. 3. Ход лучей через клин

В соответствии с законом преломления

$$\sin \alpha_{\rm BXOII} = n \sin \beta_{\rm BXOII} \tag{1}$$

$$\sin\beta_{\rm BMX} = n\sin\alpha_{\rm BMX} \tag{2}$$

Углы β_{вход}, α_{вых}, φ рис. 2 связаны соотношением

$$\alpha_{\rm Bbix} = \beta_{\rm BXOJ} - \phi \tag{3}$$

Тогда

$$\beta_{\text{B}} = \arcsin\left[n \cdot \sin\left(\arcsin\frac{\sin\alpha_{\text{B}XOB}}{n}\right) - \varphi\right] \quad (4)$$

Введем обозначения углов падения на клин для разных длин волн:

α_{вход ω} – угол падения «оси» пучка с частотой ω на клин – известен и задается по проекту лазерной установки или по условию проведения эксперимента;

 $\alpha_{\text{вход 2}\omega}$ – угол падения «оси» пучка с частотой 2 ω на клин.

Требуется, чтобы углы выхода из клина для пучков лучей с о и 2о совпадали

$$\beta_{\rm Bbix}\omega = \beta_{\rm Bbix}\,2\omega,\tag{5}$$

Поэтому при заданном угле падения основной гармоники можно вычислить необходимый угол падения для излучения второй гармоники (пучок 2 ω)

$$\alpha_{\text{BXOA}_{2\omega}} = \arcsin\left[n_{2\omega} \cdot \sin\left\{\varphi + \arcsin\right] \times \left\{\frac{n_{\omega}}{n_{2\omega}} \sin\left(\arcsin\left(\frac{1}{n_{\omega}}\sin\alpha_{\text{BXOA}_{\omega}}\right) - \varphi\right)\right\}\right]$$
(6)

Для обеспечения нулевого угла между пучками лучей с ω и 2 ω за клином требуется сдвинуть источник 2 ω относительно прямой, проходящей через центр ТПФ4 и центр выходной линзы ТПФ на величину *h*, как показано на рис. 1. На основании построений рис. 1

$$\alpha_{\rm BXOJ2\omega} - \alpha_{\rm BXOJ\omega} = tg(h/f_{2\omega T\Pi\Phi})$$
(7)

Откуда

$$h = f_{2\omega T\Pi \Phi} \cdot \operatorname{arctg} \left(\alpha_{\text{вход} 2\omega} - \alpha_{\text{вход} \omega} \right)$$
(8)

Подставляя (6) в (8) получаем выражение для h, которое в результате зависит от $\alpha_{\text{вход}_{\omega}}$, n_{ω} , $n_{2\omega}$ и ϕ (угла при вершине клина).

На рис. 4 представлены зависимости величины сдвига настроечного источника 2ω от угла падения излучения первой гармоники на диагностический клин, когда угол между пучками лучей ω и 2ω за клином равен 0. Угол падения *а* задается в радианах. Величина сдвига h(a) представлена в мм.



Рис. 4. Зависимость величины сдвига источника 2∞ от угла падения излучения первой гармоники на диагностический клин: 1 – лазерная установка нового поколения, 2 – экспериментальный стенд

По проекту лазерной установки угол падений луча первой гармоники на клин составляет a = ,719076 рад — $41^{\circ}12'$. Для этого значения угла падения «*a*» величина сдвига источника *h* составляет 0,363 мм. Это искомое значение сдвига вбрасываемого источника 2 ω на лазерной установке нового поколения относительно прямой - центр диафрагмы ППФ4 — оптический центр выходной линзы ППФ, когда угол между пучками лучей ω и 2 ω за клином равен 0.

Угол при вершине клина экспериментального стенда $\approx 0,007$ рад. В случае падения излучения основной гармоники на клин под углом 45° (0,785 рад) пучки лучей ω и 2 ω после клина будут распространяться параллельно друг другу, когда сдвиг источника 2 ω в фокальной плоскости линзы ТПФ составит h = 2,175 мм.

Зависимость h от разности коэффициентов преломления для разных длин волн и от величины клина ϕ более простые – близкие к линейным в интервале разумных величин.

В таблице представлены параметры диагностического клина и результаты расчета величины сдвига h источника излучения 2 ω относительно оптической оси, при которых за клином угол между пучками ω и 2 ω равен 0°.

	Макет	Лазерная установка нового поколения		
Угол клина, Ф	0,0071 рад (24,4')	0,000873 рад (3´)		
α _{пад} 1054 (задается)	0,7853 рад (45°)	0,7190 рад (41°12´)		
$n_{ m \kappaлинa}$	= 1,508 1,522	= 1,4507 1,4606		
h	2,175 мм	0,385 мм		

Параметры диагностического клина и результаты расчетов

Проведение эксперимента включало 3 основных этапа.

Этап 1. Калибровка стенда:

 продольным перемещением камеры добиваемся минимального пятна изображения источника ω;

 продольным перемещением источника 2ω добиваемся минимального пятна изображения источника 2ω в камере;

• при помощи микрометрической подвижки сдвигаем источник излучения 2ω в поперечном направлении на 20 мм;

 измеряем величину смещения в пикселях изображения источника 2ω на камере;

• вычисляем поперечное увеличение оптической системы для источника 2ω.

<u>Этап 2. Фиксация нулевого положения источни-</u> ка 2ω:

• выводим клин из оптического тракта системы транспортировки лазерного излучения и транспортными поворотными зеркалами корректируем положение источника 2ω на измерительном зеркале и камере;

 при помощи микрометрических подвижек сдвигаем источник в поперечных горизонтальном и вертикальном направлениях до совмещения координат изображений источников излучения ω и 2ω на камере. При этом центр источника ω – центр источника 2ω и оптический центр выходной линзы ТПФ оказываются на одной прямой.

<u>Этап 3. Определение величины сдвига источни-</u> ка 2ю обусловленного диагностическим клином:

 устанавливаем клин под необходимым углом за линзой ТПФ и транспортными поворотными зеркалами корректируем положение источника 2ω на измерительном зеркале и камере;

 при помощи микрометрических поперечных подвижек перемещаем источник 2ω до совмещения координат центров изображений источников ω и 2ω на камере. По лимбам микрометрических подвижек измеряем перемещения hx и hy;

• величину h, равную корню квадратному от суммы квадратовhх и hy, будем сравнивать с теоретически вычисленной по формулам. Графики, представленные на рис. 4, показывают, что удобно провести измерения расчетных величин для двух ориентаций клина при фиксированном положении источника 20:

• угол падения излучения основной гармоники на клин - 45° (0,785 рад);

 угол падения излучения основной гармоники на клин ~0,1 рад – в диапазоне углов падения 0– 0,1 рад расстояние между изображениями пучков лучей ω и 2ω на камере 2 слабо зависит от точности выставления угла падения излучения на клин.

Расчетным путем было найдено, что при угле падения излучения основной гармоники на клин равном 45° (0,785 рад) пучки лучей ω и 2ω после клина будут распространяться параллельно друг другу в случае сдвига источника 2ω в фокальной плоскости линзы ТПФ на величину h = 2,175 мм (график 2 на рис 4). Реальные измерения при установке клина под углом 45° (0,785 рад) дали результат h = 2,15 мм (измерения микрометра), что на 25 мкм отличается от расчетного значения (определенная в разделе 1 точность позиционирования – лучше 80 мкм).

По расчетам в случае установки первой грани клина по нормали к падающему пучку лучей ω (угол падения излучения основной гармоники на клин равен 0) пучки лучей ω и 2 ω после клина будут распространяться параллельно друг другу, когда источник 2 ω в фокальной плоскости линзы ТПФ сдвинут на h = 1,364 мм. Реальные измерения дают значение h = 1,38 мм (измерения микрометра), что находится в пределах погрешности наших измерений.

Итак, экспериментальная проверка расчетных значений величины сдвига источника 2ω показала, хорошее согласие расчетных и экспериментальных значений. Поэтому величина сдвига источника $2\omega - h = 385$ мкм, относительно прямой - центр диафрагмы ТПФ4 – центр выходной линзы ТПФ в реальном лазерном канале лазерной установки нового поколения – обоснована. То есть на основании этих результатов можно проводить разработку конструкции узла вбрасываемого источника.

Было показано, что в канале лазерной установки нового поколения центр источника 2ω будет сдвинут в горизонтальном направлении на расстояние ≈0,385 мм от прямой – центр диафрагмы ТПФ4 – центр выходной линзы ТПФ. Для определения конструкции это несущественная величина. Конструкция определяется другими факторами:

• вбрасываемый источник 2ω должен быть размещен в фокальной плоскости $f_{2\omega}$ ТПФ на расстоянии 700 мм от диафрагмы ТПФ4;

• источник должен устанавливаться на систему из трех линейных трансляторов, один из которых обеспечивает функцию вбрасывания с расстояния, на котором элементы конструкции источника находятся вне зоны рабочего излучения;

• мощный лазерный диод с λ ≈ 520 нм требует наличия теплоотвода. Во время экспериментов было

выяснено, что для обеспечения требуемого температурного диапазона для рассеивания тепла лазерного диода достаточна алюминиевая полоска 5×60 мм. Так как источник 2ω будет находиться в вакууме, то размер теплоотвода требуется уточнять;

• элементы конструкции источника 2ω не должны закрывать излучение источника ω при калибровке в канале точной диагностики;

• лазерные диоды источников ω и 2ω не должны попадать в поле зрения камеры в канале точной диагностики.

На рис. 5 показан эскиз расположения лазерных диодов на фрагменте настроечного диска диафрагменного узла ТПФ4 (источник ω) и пластины источника 2 ω .

Лазерные диоды $T\Pi \Phi 4$ установлены на планке ориентированной под 45^0 к горизонту.

Диаметр силового лазерного пучка в плоскости источника 2ω не будет превышать 10 мм. Таким образом, чтобы полностью выводить пластину источника 2ω из тракта распространения силового лазерного луча, достаточно использовать транслятор с диапазоном перемещения ~ 25 мм.



Рис. 5. Вид диафрагменной пластины ТПФ4 и источника 2 ω

На рис. 6 представлена оптическая схема системы транспортировки излучения к мишени одного канала лазерной установки нового поколения в режиме настройки.



Рис. 6. Система транспортировки лазерного излучения к мишени

По ходу лазерного луча четвертого прохода, выходящего из усилительного канала, в режиме настройки системы транспортировки последовательно расположены следующие элементы:

 источник излучения ω, находящийся в плоскости диафрагмы ТПФ4;

 источник излучения 2ω, находящийся в фокусе 2ω выходной линзы ТПФ;

- выходная линза ТПФ;
- диагностический клин;

 поворотные зеркала системы транспортировки 3T1 – 3T3;

• кристалл преобразователя частоты;

 поворотное зеркало системы транспортировки 3T4;

• финальный оптический модуль (ФОМ).

Наведение лазерных пучков на мишень в лазерной установке нового поколения будет осуществляться на частоте второй гармоники при помощи дополнительного настроечного лазера, вбрасываемого в ТПФ. Поэтому требуется совмещение лазерного пучка основной гармоники с лазерным пучком настроечного лазера. Совмещение усложняется наличием двух диспергирующих элементов - выходной линзы ТПФ и диагностического клина. Совмещение лазерных пучков необходимо осуществлять до преобразователя частоты и контролировать с помощью сферического зеркала и камеры, установленных в канале точной диагностики. Излучение в канал точной диагностики должно заводиться при помощи вбрасываемого плоского зеркала. В кристалле преобразователе, даже если он имеет клин, не произойдет нарушения совмещения из-за совпадения коэффициентов преломления. Разделение произойдет в элементах ФОМа. ФОМ включает клиновый элемент, предназначенный для разведения второй гармоники и остатков первой гармоники. Здесь важно совмещение настроечного излучения2ши преобразованного во вторую гармонику рабочего излучения.

Наличие дополнительного канала точной диагностики, ответственного за сведение лазерных пучков обеспечит отсутствие погрешностей вызванных неточностями в изготовлении и ориентации диагностического клина и выходной линзы ТПФ.

Далее описывается предложенный способ настройки, включающий калибровку и настройку в опыте.

Калибровка источника 2ω:

 устанавливается источник 200 в предположительное положение настройки;

 излучение источников ω и 2ω направляется на сферическое зеркало с цифровой камерой в его фокусе;

 с помощью моторизованных трансляторов источника 2ω совмещаются изображения источников ω и 2ω на матрице цифровой камеры сферического зеркала;

• выводится вбрасываемое зеркало;

 источник 2ω перемещается транслятором из положения настройки в рабочее положение на строго определенное число шагов N. Настройка положения источника 20 в опыте:

• источник 2ω перемещается транслятором из рабочего положение в положения настройки на строго определенное число шагов N;

• производится настройка мишени;

• источник 2ω перемещается транслятором из положения настройки в рабочее положение на строго определенное число шагов N.

Литература

1. Чернов В. Н. и др. Методы и алгоритм автоматической юстировки модуля многопучковой лазерной установки Искра-6 // Оптический журнал, Т. 73, № 1, Январь, 2006.

2. Ландсберг Г. С.Оптика. – М.: Изд. «Наука», 1976.

РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ УДАРНО-СЖАТЫХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД МЕТОДОМ НЕЙТРОННОЙ РЕЗОНАНСНОЙ ДОПЛЕРОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМПУЛЬСНОГО НЕЙТРОННОГО ИСТОЧНИКА НА ОСНОВЕ ПЛАЗМЕННОЙ НЕЙТРОННОЙ КАМЕРЫ (ПНК-13)

М. А. Денежко

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

Введение

Расчеты поведения конструкций при ударноволновых нагрузках, основанные на применении современных моделей вещества, требуют знания уравнений состояния (УРС) этих веществ. Определение температуры при составлении УРСа осуществляется математически с использованием ряда допущений, поэтому необходимо ее непосредственное измерение в ударно-волновых экспериментах. Работы по измерению температур ударно-сжатых конденсированных сред методом нейтронной резонансной доплеровской спектроскопии (НРДС) ведутся в Лоснациональной лаборатории (ЛАНЛ) Аламоской с 2005 года. В частности, в работе [1] представлен анализ американских экспериментов по измерению температуры ударно-сжатого до ~63 ГПа молибдена указанным методом. Молибденовые образцы содержали индикаторную добавку ¹⁸² W, а эксперименты были выполнены на базе протонного ускорителя в Лос-Аламосе. В экспериментах удалось измерить температуру ударно-сжатого молибдена, однако, результаты экспериментов показали существенное отличие величины температуры в молибдене от теоретических предсказаний.

В отличие от ЛАНЛ, во ВНИИЭФ подобных динамических экспериментов по регистрации температуры вещества методом НРДС не проводилось, ив настоящее время только рассматривается возможность применения этого метода. Во ВНИИЭФ существуют источники нейтронов, позволяющие проводить измерения в экспериментах, подобных американским. В частности, одним из таких источников может служить устройство, работающее по принципу плазменного фокуса с нейтронным выходом на уровне ~10¹³нейтронов [2].

Анализу результатов американских экспериментов, представленных в работе [1], а также расчетнотеоретическому обоснованию проведения динамических и статических опытов по регистрации температуры методом НРДС с использованием плазменного фокуса и посвящена данная работа.

1. Постановка экспериментов [1] и анализ экспериментальных данных

В настоящий момент имеется всего одна публикация, посвященная измерению температуры в ударно-волновых экспериментах с использованием метода НРДС [1].Ниже приводится краткое описание постановки опытов, проведенных американцами в ЛАНЛ, и результатов, полученных ими, так как в своих исследованиях автор в значительной степени опирается на эти данные. Температурные измерения осуществлялись на базе протонного ускорителя ЛАНЛ. Схема проведения опытов представлена на рис.1.Нейтроны генерировались при прохождении протонного пучка через урановую мишень по реакции (p, n), далее они замедлялись в полиэтилене, коллимировались и пропускались через исследуемое вещество, находящееся в ударно-нагруженном состоянии. Исследуемое вещество содержало резонансный поглотитель нейтронов. Времяпролетной методикой (ВПМ) регистрировался спектр прохождения нейтронов через исследуемое вещество, в котором обнаруживался ряд провалов, соответствующих поглощению нейтронов на резонансах нейтронного поглотителя. По ширине одного из провалов определялась температура поглотителя и вещества, в которое оно было внедрено.

В качестве исследуемого вещества в эксперименте был выбран молибден. Образец представлял собой слоистый диск с толщиной равной 6 мм и диаметром – 63,5 мм. Передний (обращенный к нейтронному пучку) миллиметровый и задний четырехмиллиметровый слои состояли из чистого молибдена, в то время как внутренний слой состоял из комбинированного материала (диск с диаметром 36 мм из молибдена с добавкой ¹⁸²W,содержание последней составляло 1,7 % по атомам), окруженного снаружи слоем чистого молибдена. Выбор такой конфигурации, по-видимому, определялся необходимостью сохранения ударно-сжатого состояния с постоянной температурой внутри слоя с добавкой в течение достаточного для измерения температуры времени (~1 мкс) до того, как в исследуемую область придет волна разрежения с торца или боковой поверхности образца.



Рис. 1. Схема проведения эксперимента [1]

Нагружение образца осуществлялось с помощью специальной системы «Forest flyer» [3], в которой плоский алюминиевый ударник толщиной 6 мм и диаметром 63,5 мм разгонялся с помощью продуктов взрыва, образовавшихся в результате сгорания ~400 г. РВХ 9501 (состав на основе октогена) внутри алюминиевой камеры с толщиной стенки равной 6 мм (рис. 2). Пролетная база между ударником и нагружаемым образцом в опыте составляла 20 мм. Скорость ударника перед соударением с молибденовым образцом достигала ~3,6 км/с, в эксперименте она не измерялась. Образец был сориентирован под углом 55° к оси нейтронного пучка для того, чтобы уменьшить поглощение нейтронов на продуктах взрыва, и располагался на расстоянии 0,96 м от поверхности замедлителя.



Рис. 2. Схема нагружающего устройства «Forest Flyer» с указанием характерных размеров [3]

Времяпролетный спектр получали с помощью системы из 11 ⁶Li детекторов расположенных на расстоянии 23 м от замедлителя. Собирающая поверхность каждого из детекторов представляла собой диск с толщиной 1 см и диаметром 11,1 см. Измерения проводились в токовом режиме регистрации сигнала [4]. Определение температуры осуществлялось по резонансу ¹⁸²W(E_p = 21,05 эВ) путем описания резонансного провала следующим теоретическим выражением, учитывающим вклад фона, а так же уширение сигнала за счет конечного времени высвечивания детектора и немгновенности выхода резонансных нейтронов с поверхности замедлителя:

$$Y(t) = \left[N_0(t) \exp\left(-n\sigma(t,T)d\right) \otimes M(t) + B(t) \right] \otimes P(t), (1)$$

где $\sigma(t, T)$ – температурно уширенное сечение поглощение нейтрона в резонансной области, $N_0(t)$ – падающее на исследуемый образец число нейтронов с энергией *E*, M(t) – функция, описывающая выход резонансных нейтронов с поверхности замедлителя во времени, B(t) – функция, описывающая фоновый сигнал, регистрируемый детектором во времени, P(t) – функция, учитывающая время высвечивания регистратора при регистрации нейтрона. Символ \otimes обозначает операцию свертки. Время регистрации нейтрона *t* связано с его энергией *E*, массой *m_n*, а также расстоянием между замедлителем и детектором *L* следующим простым соотношением:

$$t = L_{\sqrt{\frac{m_n}{2E}}}$$
(2)

Температурно-уширенное сечение поглощение нейтрона в резонансной области энергий получается сверткой выражения, полученного Брейтом и Вигнером [5] для изолированного нейтронного резонанса в случае покоящихся ядер нейтронного поглотителя $\sigma(E)$ по энергетическому распределению нейтронов внутри резонансного поглотителя:

$$\sigma(E,T) = \int_{-\infty}^{\infty} \sigma(E') G(|E-E'|,T) dE', \qquad (3)$$

G(E) – энергетический спектр ядер внутри резонансного поглотителя нейтронов, который при достаточно высоких температурах (превышающих температуру Дебая) переходит к распределению Максвелла. Функции M(t), B(t) и P(t) определялись в статических опытах, которые предваряли опыты в динамике. Результирующий время пролетный спектр, полученный в одном из двух опытов, проведенных в Лос-Аламосе, представлен на рис. 3. Обработка экспериментальных данных по методу наименьших квадратов с использованием выражения (1) при вариации температуры, привела к следующим значениям последней, см. таблицу. В таблице так же представлены результаты измерения массовой скорости молибдена, которая осуществлялась в экспериментах с помощью оптической интерферометрии и результаты одномерных расчетов, проделанных авторами без учета прочностных свойств использованных материалов.

Набор данных	Массовая скорость (км/с)	<i>T</i> (K)
1-ый пуск	0,9 5± 0,02	786 ± 83 (66)
2-ой пуск	$0{,}98 \pm 0{,}02$	926 ± 55 (24)
Усреднение по двум пускам	$0,\!97\pm0,\!02$	875 ± 46
Теоретический расчет	0,97	635

2000

Результаты, полученные в эксперименте [1], в скоб-

ках указана статистическая погрешность измерений



Рис. 3. Результирующий время пролетный спектр: а – статический (верхний) и динамический (нижний) времяпролетные спектры для ударно нагруженного молибдена из работы [1], описанные аналитическим выражением (1), б – спектры в увеличенном масштабе вблизи рабочего резонанса ¹⁸²W

Как видно из таблицы, получены расхождения в измеренной температуре по результатам двух пусков, а также расхождения с теоретическими предсказаниями для данных параметров нагружения образца. Позднее результаты эксперимента были проанализированы другими специалистами в работе [6]. Исследователям удалось согласовать среднее значение температуры, полученное в эксперименте, с расчетным значением, полученным при учете прочности образца и ударника, а так же при учете двумерных эффектов, заключающихся в искривлении полета ударника и неоднородности нагружения образца. Двумерный расчет с учетом прочностных свойств использованных материалов дал температуру на уровне ~845 К.

1.1 Анализ нагружающего устройства

В данной работе было проведено независимое численное моделирование нагружающего устройства, используемого в эксперименте [1], по программе, использующей Эйлерову и Лагранжеву методики счета, чтобы проверить выдвинутые в работе [5] предположения относительно причин расхождения экспериментальных и расчетных данных. Проводились одномерные и двумерные расчеты устройства, представленного на рис. 2. Насадка из оргстекла в расчете не задавалась. Датчики выставлялись на расстоянии 1 и 2 мм от левого края молибдена. В одномерном расчете при задании пролетной базы ударника равной15 мм и без учета прочностных свойств молибдена получена расчетная температура равная ~625, что близко к теоретическому значению, приведенному в [1].Расчетное давление в исследуемом сечении образца при этом получилось ниже тех, что измеряют экспериментально при использовании системы «Forest Flyer», а именно ~57,7 ГПа. Несогласование расчета[1] и данных эксперимента возникает в том числе и из-за неправильного задания в расчете величины пролетной базы. Увеличение пролетной базы в расчете до 20 мм поднимает давление в сечении образца до ~62 ГПа, что близко к значениям, измеряемым экспериментально. При этом температура в образце без учета прочностных свойств молибдена получается ~690 К, а с учетом ~740 К.

Переход к двумерной постановке расчетов (рис. 4) позволяет проследить влияние двумерных эффектов на нагружение образца.

Расчеты показывают (рис.5) сильную неоднородность в температуре молибдена по радиусу, что действительно связано с несимметрией прилета ударника. Длительность квазистационарного участка в образце на разных радиусах варьируется от ~0,95 до ~1,1 мкс. Температура, усредненная по показаниям всех датчиков, помещенных в место размещения индикатора, по расчетам составила T ≈ 770 K. Данное значение совпадает в пределах погрешности с результатами одного из двух проведенных американцами экспериментов. При наличии температурного градиента по образцу метод НРДС будет как раз показывать некоторое среднее значение температуры. Согласие с результатами второго эксперимента получено не было. Столь существенная разница в температуре, при совпадающей в пределах погрешности массовой скорости вещества за фронтом ударной волны, в двух экспериментах указывает на то, что причина расхождения, по-видимому, связана не только с работой нагружающего устройства.



Рис. 4. Геометрия двумерных расчетов нагружающего устройства «Forest Flyer»



Рис. 5. Временная зависимость температуры в сечении молибдена, расположенного на расстоянии 2 мм от его переднего края, на разных радиусах от оси

По результатам расчета можно однозначно сказать, что для динамических экспериментов с методикой НРДС необходимо применение высокопрецизионного нагружающего устройства, характеризующегося хорошей симметрией нагружения. Помещение добавки в более узкой области внутри исследуемого вещества так же позволит получить более достоверные результаты по температуре.

1.2 Анализ источника и замедлителя

Важным условием, за которым следят при подготовке динамических опытов с применением НРДС, является прохождение всех резонансных нейтронов через исследуемое вещество за время, пока в нем сохраняется ударно-нагруженное состояние с постоянной температурой (~1 мкс).

Для резонанса E_p [эВ] с характерной шириной ΔE [эВ] время t_1 [мкс], за которое все резонансные нейтроны проходят через мишень, зависит от расстояния между источником резонансных нейтронов (в нашем случае им является замедлитель) и мишенью *l* [см] и определяется следующим выражением:

$$t_1 \approx l \frac{\Delta E}{1,38E_p^{3/2}} \tag{4}$$

Если в качестве ΔE взять три доплеровские ширины резонанса [6], то есть положить $\Delta E = 3\sqrt{4E_pkT/A}$ [5], где k – постоянная Больцмана, *Т* – температура вещества-поглотителя, *А* –его атомный вес, то можно оценить параметр величины t₁ в работе [1].

$$t_{1} = \frac{l\Delta E}{1,38E_{p}\sqrt{E_{p}}} = \frac{3l}{1,38E_{p}}\sqrt{\frac{4kT}{A}} =$$

$$= \frac{3.96}{1,38\cdot21,05}\sqrt{\frac{4\cdot1,38\cdot10^{-23}\cdot770}{182\cdot1,6\cdot10^{-19}}} \approx 0,38 \text{ MKC}$$
(5)

Другим важным параметром, характеризующим перенос резонансных нейтронов через образец, является их время выхода с поверхности замедлителя t_2 . Функция M(t), входящая в выражение (1), как раз определяет данный параметр. В работе [1] авторы приводят следующее аналитическое выражение для функции M(t), оно представляет собой взвешенную сумму χ^2 -функций: $M(t) = wf_1(t) + (1-w)f_2(t)$, где

 $f_n(t)$ определяется следующим выражением [1]:

$$\begin{aligned} f_n(t) &= \left[\frac{(t - t_n)^{(\nu_n - 2)/2}}{\Gamma(\nu_n / 2) \tau_n^{\nu_n / 2}} \right] \exp[-(t - t_n)/\tau_n] \quad (t \ge t_n), \\ f_n(t) &= 0 \qquad (t < t_n) \end{aligned}$$

с параметрами: $w = 0,909; v_n = 6, t_n = 0,11/\sqrt{E}$ мкс, $\tau_1 = 0.714 / \sqrt{E}$ мкс, $\tau_2 = 2.885 / \sqrt{E}$ мкс (энергия залается в эВ).

Временной выход нейтронов с поверхности замедлителя, построенный на основе выражения (6), изображен на рис. 6. Как видно из рисунка, ширина импульса составляет ~1 мкс. Хотя при описании резонансного провала принимался во внимание тот факт, что резонансные нейтроны выходили с поверхности замедлителя в некотором импульсе (см. формулу (1)), не учитывалось то, что длительность этого импульса по своей величине была соизмерима с длительностью временного отрезка, в течение которого сохранялась неизменная температура в исследуемом веществе. Часть резонансных нейтронов, по-видимому, проходила через образец в тот момент, когда на него уже действовали волны разгрузок (см. рис. 5). По мнению автора, этот факт является существенным упущением, имевшим место в постановке экспериментов [1]. Для

составления физически обоснованного УРСа необхолимо измерение температуры при постоянных и заведомо известных термодинамических параметрах исследуемого вещества: давлении, плотности или др. Температура, измеренная при меняющихся параметрах системы, для калибровки УРСа использована быть не может. Ввиду отсутствия подробных данных по использованному в [1] нейтронному источнику и в связи с отсутствием инструментария для расчета взаимодействия протонов с веществом напрямую функцию M(t) из работы [1] обсчитать не удалось.



Рис. 6. Временной выход нейтронов с энергией $E_n = 21,05$ эВ с поверхности замедлителя, рассчитанный по формуле (6)

с использованием параметров из работы [1]

Необходимо подбирать размеры замедлителя нейтронов, нейтронного отражателя, а также выбирать геометрию опытов таким образом, чтобы выполнялось условие:

$$t_1 + t_2 \le 1 \text{ MKC},$$
 (7)

тогда можно будет гарантировать, что получаемые в эксперименте температуры действительно будут пригодны для калибровки УРСов.

2. Температурные измерения с использованием НРДС на базе РФЯЦ-ВНИИЭФ

Исследовалась возможность проведения экспериментов подобных тем, что были выполнены в ЛАНЛ [1], на базе РФЯЦ-ВНИИЭФ. Одним из основных условий для осуществления таких экспериментов является использование мощного коротко импульсного нейтронного источника. Высокий нейтронный выход ~10¹⁴ нейтронов позволил американцам добиться статистической погрешности в измерении температуры на уровне 10 %, что является хорошим показателем. Длительность нейтронного импульса источника должна быть на уровне нескольких сот наносекунд для того, чтобы резонансные нейтроны, получаемые в замедлителе, могли пройти через исследуемое вещество за время, пока в нем держится постоянная температура.

Импульсный нейтронный источник на основе плазменной камеры ПНК-13, имеющийся в распоряжении РФЯЦ-ВНИИЭФ (далее «плазменный фокус»), способен вылавать ~1.3 · 10¹³ нейтронов в импульсе с длительностью ~(75÷80) нс. Такое количество нейтронов является рекордным для установки на данный момент, оно полученопри заполнении разрядной камеры равнокомпонентной D-T смесью до давления 1,9 · 10³Па при начальном напряжении на конденсаторной батарее $U_0 = 25 \text{ kB}$ и разрядном токе с максимальной амплитудой I=1,5MA[2].Нейтронный выход «плазменного фокуса» на порядок уступает (p, n) источнику, использованному американцами в экспериментах [1]. Проведение опыта в геометрии, представленной на рис. 1, с использованием «плазменного фокуса», поэтому, увеличит статистическую погрешность до ~30-40 %. Можно попытаться улучшить статистику за счет сбора рассеянных на малые углы нейтронов, прошедших через исследуемый образец. Увеличить сбор рассеянных нейтронов можно за счет приближения детектора к источнику и за счет увеличения его собирающей поверхности. Уменьшение расстояния между детектором и источником, однако, приведет к необходимости использования детекторов с очень высоким временным разрешением, так как ширина резонансного провала пропорциональна расстоянию между источником нейтронов и детектором. Так же необходимо учесть тот факт, что вблизи источника растет нейтронный и гамма-фон, и необходимо будет придумать способ защиты от него. «Плазменный фокус» входит в состав нейтронографического стенда, специально разработанного для получения нейтронных изображений объектов. При разработке нейтронографического стенда учитывалась необходимость защиты от фонового излучения регистраторов изображения, помещаемых на расстоянии ~2 м от источника. Таким образом, было бы целесообразно попытаться задействовать стенд в наших исследованиях. Возможная схема постановки НРДС экспериментов на базе РФЯЦ-ВНИИЭФ представлена на рис. 7.

Расстояние между замедлителем и образцом необходимо минимизировать, чтобы уменьшить параметр t_1 (4). Оно должно составлять $l \le 1$ м. Расстояние между замедлителем и нейтронным детектором следует подбирать из тех соображений, чтобы, с одной стороны, обеспечить эффективное разрешение резонансного провала регистрирующей аппаратурой, с другой, собрать как можно большее количество резонансных нейтронов, прошедших через образец, сохранив при этом адекватные размеры собирающей поверхности детектора. Размеры замедлителя необходимо подобрать таким образом, чтобы, с одной стороны, обеспечить замедление максимально возможного числа нейтронов до резонансных энергий, а с другой, обеспечить выполнение условия (7).

Удовлетворение неравенству (7) гарантирует прохождение всех резонансных нейтронов через образец, пока в нем сохраняется состояние с постоянной температурой. Длительность метастабильного состояния в образце, вероятно, можно увеличить за счет разработки специального нагружающего устройства с увеличенной толщиной ударника.

Целесообразно начать исследования с измерения температуры вольфрама. Сам образец можно изготовить из некоторого изотопа вольфрама, например, ¹⁸⁰W, ¹⁸⁶W, с высокой степенью чистоты на уровне 99,9 %, поместив в заданное сечение слой с резонансной добавкой ¹⁸²W ($E_p = 21,05$ эВ). Измерение температуры вещества с использованием одного из его изотопов позволяет снять вопросы, связанные с возможным несоответствием термодинамических свойств и волнового импеданса у исследуемого вещества и этого же вещества с резонансной добавкой. Вольфрам, как и молибден, хорошо изучен и не имеет фазовых переходов в заданной области температур и давлений.

Проведение опытов в динамике невозможно без предварительных статических пусков. В статике определяются функции P(t), M(t), B(t), необходимые для обработки времяпролетного спектра (1), подбирается оптимальная геометрия, размеры детекторов, отрабатывается и синхронизуется работа всех систем, используемых для получения сигнала, осуществляется калибровка методики. К статическим опытам предъявляются меньшие требования, чем к опытам в динамике. Так как в статике нагрев образца осуществляется специализированно (например, пропусканием через образец тока), строго контролируется и может поддерживаться в течение длительного промежутка времени, автоматически отпадает



Рис. 7. Возможная постановка динамических и статических экспериментов на базе имеющихся в распоряжении РФЯЦ-ВНИИЭФ нейтронографического комплекса и плазменного фокуса

требование на выполнение условия (7). Здесь также нет необходимости использования взрывозащитного (ВЗУ), см. рис. 7 и нагружающего устройств. Кроме того, в статике возможен набор статистики за счет многократного повторения опыта и суммирования спектров прохождения в разных пусках. Таким образом, потенциально, можно добиться сколь угодно малой статистической погрешности измерений. Погрешность ~10 % можно получить, например, если осуществить порядка 10-15 пусков на плазменном фокусе, что эквивалентно однократному пуску с применением источника ~10¹⁴ нейтронов. Статические эксперименты целесообразно проводить в той же геометрии и с применением тех же систем, которые будут потом задействованы в динамических опытах. Статические пуски возможно провести в самые короткие сроки, и это наша ближайшая цель.

Заключение

Был проведен анализ выполненных американцами экспериментов [1] по измерению температуры ударно-нагруженного до ~63 ГПа молибдена методом нейтронной резонансной доплеровской спектроскопии. Показано, что в опыте имело место несимметричное соударение образца с ударником, в результате которого образовался температурный градиент по сечению образца. Кроме того, показано, что в указанных экспериментах резонансные нейтроны, дающие информацию по температуре исследуемого вещества, могли проходить через образец, когда температура в нем непрерывно менялась, что является недопустимым для подобных опытов. Показаны способы устранения указанных недостатков и представлена возможная схема постановки динамических и статических опытов по измерению температуры ударно-нагруженного вольфрама на базе РФЯЦ-ВНИИЭФ с применением нашего нейтронного источника, работающего по принципу плазменного фокуса, и нейтронографического комплекса, в состав которого он входит.

Литература

1. Yuan V. W., Bowman J. D., Funk D. J. et al. Shock Temperature Using Neutron Resonance Spectroscopy // Physical Review Letter, 94, 125504 (2005).

2. Завьялов Н. В., Маслов В. В., Румянцев В. Г. и др. Источник с выходом 10¹³ ДТ-нейтронов на основе сферической камеры с плазменным фокусом // Физика плазмы, 2015. Т. 39 С. 276–280.

3. Forest C. A., Rabie R. L., Vorthman B. J. A novel explosively driven flying plate system // Proceedings of the 11th International symposium on detonation. CO. 1988.

4. Bowman J. D., Szymanski J. J., Yuan V. W. et al. Current-mode detector for neutron time-of-flight studies. // Nuclear instrument and methods in physics research A. 1990. No 297. P. 183–189.

5. Swift D. C., Seifter A., Holkamp D. B. et al. Explanation of anomalous shock temperatures in shock-loaded Mo samples measured using neutron resonance spectroscopy. // Physycal review B. Vol 77. 2008.

6. Вейнберг А., Вигне рЕ. Физическая теория ядерных реакторов. – М.: Издательство иностранной литературы, 1961. С. 47–51, 72–75.

ПРЕЦИЗИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОТРАЖЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

С. Ю. Головкин, В. Н. Деркач, В. Ю. Добикова, В. О. Лащук, Д. В. Сизмин, В. А. Щеников

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

Введение

Коэффициент отражения диэлектрических покрытий оптических деталей является важной характеристикой, определяющей возможность достижения предельных энергетических значений на выходе лазерной цепи. Особенно это принципиально для многопроходных лазерных систем, у которых реализация эксплуатационных характеристик возможна лишь при высокой эффективности работы всех узлов одновременно и избыточное количество транспортных потерь не всегда можно компенсировать величиной входного сигнала или коэффициентом усиления.

Для нахождения коэффициентов отражения оптических деталей в диапазоне от <0,1 % до >99,9 % с абсолютной погрешностью менее 0,1 % существует несколько видов измерительных схем. Целью данной работы являлось испытание схем измерений, основанных на принципах многократного отражения излучения от измеряемой поверхности и двукратного отражения излучения от измеряемой поверхности с контролем абсолютной величины погрешности измерения.

1 Устройство диэлектрических зеркальных покрытий

Диэлектрические зеркала обычно делают из слоев с чередующимися высокими n_H и низкими n_L показателями преломления толщиной в четверть длины волны, т.е. оптическая толщина составляет:

$$n_i h_i \cos(\theta) = \frac{\lambda_0}{4},$$

где h_i – геометрическая толщина слоя, θ – угол, отсчитываемый от нормали, распространения излучения в плоском диэлектрическом слое.

Такие зеркала называются четвертьволновыми. При такой конструкции все отраженные лучи складываются в фазе. Схема, поясняющая принцип сложения пучков, представлена на рис. 1: фаза «луча 0» при отражении от оптически более плотной среды в точке А меняется на π , фаза «луча 1» относительно точки А так же изменяется на π из-за двойного прохода по среде с четвертьволновой толщиной, изменение фазы «луча 2» при проходе через «среду 1» и «среду 2» и возвращении обратно меняется на 2π , и еще на π меняется при отражении от «среды 3».



Рис. 1. Фазировка света при отражении от многослойного диэлектрического зеркала

Коэффициент отражения от каждого слоя ограничен законом Френеля [1] и для достижения высоких значений коэффициента отражения покрытия, кроме требования сфазированного сложения волн, необходимо нанесение большого количества слоев. Причем, в силу относительно меньшего номинала отражения для *p*-поляризации, для таких зеркал количество слоев должно быть больше.

Для определения коэффициентов отражения и пропускания диэлектрического покрытия используется метод характеристических матриц Абеле [2]. Суть метода заключается в следующем: каждому слою покрытия ставится в соответствие характеристическая матрица, связывающая электрические и магнитные поля на границах слоя. Характеристическая матрица всего покрытия M_{Σ} определяется произведением характеристических матриц отдельных слоев. Коэффициент отражения от слоистой среды, описываемой характеристической матрицей M_{Σ} , заключенной между двумя средами с коэффициентами преломления: n0 – коэффициент преломления внешней среды и n_{base} - коэффициент преломления подложки, находится из условий непрерывности тангенциальных компонент векторов \vec{E} и \vec{H} на каждой из двух поверхностей раздела слоистой среды.

2. Схема измерения коэффициентов отражения зеркальных покрытий с многократным отражением излучения от исследуемой поверхности при прохождении зазора между двумя отражающими деталями

Принципиальная измерительная схема коэффициентов отражения зеркальных покрытий с многократным отражением от исследуемой детали приведена на рис. 2.



Рис. 2. Принципиальная схема измерения коэффициентов отражения зеркальных покрытий с многократным отражением излучения от исследуемой поверхности

В схеме измерения используются 3 элемента (зеркала): деталь 1 с коэффициентом отражения R_1 , деталь 2 с коэффициентом отражения R₂ и деталь 3 с коэффициентом отражения R_3 . Причем эти зеркала могут быть как с заранее известными коэффициентами отражения, так и нет. Измерения проводятся по одинаковой оптической схеме с последовательной заменой зеркал. Для упрощения дальнейших выкладок будем считать, что на всех этапах процедуры измерения количество отражений от каждого зеркала одинаково и составляет *n*. На рис.2 $P_1, P_1', P_1'' - сиг$ налы на входе, P_2, P_2', P_2'' – сигналы на выходе. На первом этапе измерения устанавливаются образцы с R_1 и R_2 , регистрируются сигналы P_1 и P_2 . Аналогично на втором этапе устанавливаются образцы с R₂ и R_3 , регистрируются сигналы P'_1 и P'_2 . И, наконец, на третьем этапе устанавливаются образцы с R₁ и R₃ и регистрируются сигналы P_1'' и P_2'' .

Результаты измерений выражаются следующим образом:

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(R_1 \cdot R_2\right)^n, \ \frac{P_2'}{P_1'} = \left(R_2 \cdot R_3\right)^n, \ \frac{P_2''}{P_1''} = \left(R_1 \cdot R_3\right)^n.$$
(1)

Из выражений (1) определяем R_1 , R_2 , R_3 :

$$R_{1} = \left(\frac{P_{1}}{P_{2}}\right)^{\frac{1}{2n}} \cdot \left(\frac{P_{1}}{P_{2}} \cdot \frac{P_{1}'}{P_{2}'}\right)^{-\frac{1}{2n}},$$

$$R_{2} = \left(\frac{P_{1}''}{P_{2}''}\right)^{\frac{1}{2n}} \cdot \left(\frac{P_{1}}{P_{2}} \cdot \frac{P_{1}'}{P_{2}'}\right)^{-\frac{1}{2n}},$$

$$R_{3} = \left(\frac{P_{1}}{P_{2}}\right)^{\frac{1}{2n}} \cdot \left(\frac{P_{1}'}{P_{2}'} \cdot \frac{P_{1}''}{P_{2}''}\right)^{-\frac{1}{2n}}.$$
(2)

Оценка относительной погрешности измерения коэффициента отражения любого из трех зеркал δR_i по формулам (2) составляет:

$$\delta R_i = \frac{1}{2n} \left[\delta \left(\frac{P_1}{P_2} \right) + \delta \left(\frac{P_1'}{P_2'} \right) + \delta \left(\frac{P_1''}{P_2''} \right) \right].$$

Выражение для случая $\delta\left(\frac{P_1}{P_2}\right) = \delta\left(\frac{P_1'}{P_2'}\right) = \delta\left(\frac{P_1''}{P_2''}\right)$

можно представить в виде:

$$\delta R_i \cong \frac{3}{2n} \cdot \left| \delta \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \right|$$
 или $\delta R_i \cong \frac{3}{2n} \cdot \left(\left| \delta P_1 \right| + \left| \delta P_2 \right| \right).$ (3)

Из формул (3) видно, что для уменьшения относительной погрешности измерения коэффициента отражения нужно увеличить число отражений *n*.

3. Схема измерения коэффициентов отражения зеркальных покрытий с контролем величин регистрируемых сигналов

Схема измерения коэффициентов отражения зеркальных покрытий оптических деталей с контролем величин регистрируемых сигналов представлена на рис. 3.



Рис. 3. Схема измерения коэффициентов отражения зеркальных покрытий с контролем величин регистрируемых сигналов

На первой стадии измерения (рис. 3,а) излучение отражается от вспомогательного зеркала 3₀. На второй стадии измерения, в соответствии с рис. 3,б, в тракт помещается измеряемая деталь 3*, а вспомогательное зеркало переносится в другую позицию. В таком схемном решении зеркало 3* отражает излучение дважды. Отличие в результатах измерения (с измеряемым элементом и без него) объясняется величиной показателя отражения данной оптической детали. Коэффициент отражения выражается следующим образом:

$$R = \sqrt{\frac{P_1}{P_2} \cdot \frac{P_2'}{P_1'}}$$

где *Р* –мощность излучения на датчиках, индексы обозначают канал измерения, штрихом отмечены результаты измерений на втором этапе.

Относительная погрешность измерений при постоянной мощности излучения составит:

$$\delta R = \frac{1}{2} \cdot \left(\left| \delta \left(\frac{P_1}{P_1'} \right) + \delta \left(\frac{P_2}{P_2'} \right) \right| \right)$$

В приближении малого изменения сигналов в процессе измерений, погрешность нахождения *R* можно свести к виду:

$$\delta R_i = \delta P \cdot \left| \frac{\Delta_1}{P_1} + \frac{\Delta_2}{P_2} \right|,$$

где δP – погрешность измерения мощности, $\frac{\Delta_1}{P_1}$ и

 $\frac{\Delta_2}{P_2}$ – относительное изменение регистрируемых

сигналов на разных этапах измерения.

Ключевым моментом для реализации данного подхода является перевод погрешности измерения

каждого сигнала из случайной в систематическую. Для выполнения этого условия необходимо, чтобы изменение сигналов между этапами было минималь-

ным, например:
$$\frac{\Delta_1}{P_1} \cong \frac{\Delta_2}{P_1} < 10^{-2}$$
. При этом можно

ожидать снижения погрешности измерения глухих зеркал до уровня десятой доли процента.

4. Измерение коэффициентов отражения зеркальных покрытий

Для испытания схем измерений коэффициентов отражения были выбраны три плоских оптических детали с зеркальными покрытиями – деталь *1*, деталь *2* и деталь *3*. Геометрические параметры – диаметр (Ø) и толщина (*l*) – детали *1*: Ø = 100 мм и *l* = 10 мм; детали *2*: Ø = 100 мм и *l* = 10 мм; детали *2*: Ø = 100 мм и *l* = 10 мм; детали *3*: Ø = 90 мм и *l* = 15 мм. Отражательные способности элементов измерялись для угла падения излучения на исследуемые поверхности 45°. В измерительной схеме с многократным отражением излучения количество отражений от деталей составляло 30.Коэффициенты отражения измерялись при *s*- и *p*- поляризованном излучении. Дополнительно все измерения дублировались на спектрофотометре Photon RT. Результаты всех измерений представлены в таблице и на рис. 4 и 5.

Результаты измерений коэффициентов отражения (λ=527 нм)

Коэффициенты отражения	Многопроходная схема	Двухпроходная схема	Спектрофотометр
R_{1p}	98,479	99,162	99,278
R_{1s}	98,775	99,637	99,794
R _{2p}	99,295	99,451	99,264
R _{2s}	99,440	99,735	99,798
R _{3p}	95,982	95,185	95,235
R_{3s}	98,954	99,466	99,574



деталь 1 деталь 2 деталь 3

Рис. 4. Коэффициенты отражения зеркал, измеренные разными способами, при *s*-поляризованном излучении (вертикальные линии – погрешности измерений)



Рис. 5. Коэффициенты отражения зеркал, измеренные разными способами, при *p*-поляризованном излучении (вертикальные линии – погрешности измерений)

Из полученных результатов видно, что результаты измерений на спектрофотометре и по схеме с контролем величин регистрируемых сигналов практически совпадают. Результаты измерений по схеме с многократным отражением отличаются примерно на 1 % от результатов измерений двумя другими способами. Это может быть связано с тем, что при проведении таких измерений происходит интегрирование результата по большому количеству отражений (апертуре детали) в силу возможной неоднородности покрытия и (или) рассеяния на частицах пыли и дефектах покрытия.

5. Схема измерения коэффициентов отражения деталей при многократном отражении от них излучения с одновременным контролем величин сигналов в измерительных каналах

В настоящее время ведется сборка оптической схемы, сочетающей принципы многократного отражения и контроля величины абсолютной погрешности измерения. Такая схема измерения приведена на рис. 6.



Рис.6. Схема измерения коэффициентов отражения деталей при многократном отражении от них излучения с одновременным контролем величины сигналов в измерительных каналах

Схема соответствует одному из этапов измерений при многократном отражении. Используются детали 1и 2. Дополнительно в схему вносится элемент Ф, имеющий селективное пропускание T, причем $P_2 = P_1 \cdot T$. Тогда величина изменения мощности на каждом из этапов измерения, вызванная потерями при многократном отражении от зеркал, установленных в комбинацию, в точности совпадает с величиной пропускания селективного фильтра. Погрешность измерения величины пропускания такого элемента и погрешность измерения величины изменения мощности, вызванной прохождением через комбинацию зеркал, определяются погрешностью соответствующих измерительных средств. При меньшей погрешности измерения коэффициента пропускания элемента этот факт определяет меньшую погрешность определения коэффициентов отражения измеряемых зеркал.

Заключение

В работе проведены испытания:

 схемы измерения коэффициентов отражения зеркальных покрытий оптических деталей, основанные на принципах многократного отражения излучения от измеряемой поверхности,

 схемы измерения коэффициентов двукратного отражения излучения от измеряемой поверхности с контролем абсолютной величины погрешности измерения.

В схеме с многократным отражением излучения коэффициенты отражения покрытий измерены с абсолютной погрешностью 0,3 %.

В схеме с двукратным отражением излучения и с контролем величин регистрируемых сигналов коэффициенты отражения покрытий измерены с абсолютной погрешностью 0,1 %. Дополнительно все измерения дублированы на спектрофотометре Photon RT с погрешностью измерения 0,5 %.

Показано, что оптическая схема, сочетающая принципы многократного отражения излучения и контроля величины абсолютной погрешности измерения, повышает точность измерения коэффициентов отражения.

Литература

 Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. – М.: Наука, 1982.

2. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука, 1973.

МЕТОДИКА РЕГИСТРАЦИИ ДИНАМИКИ ГЕНЕРАЦИИ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В МИШЕНИ «ГАЗОВЫЙ МЕШОК»

<u>Д. М. Доброцветов</u>, А. Н. Мунтян, С. И. Петров, Н. М. Романова, С. С. Таран

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

В докладе описана методика, позволяющая измерять скорость распространения тепловой волны в мишенях подкритической плотности, время их прогрева, а также коэффициенты конверсии лазерного излучения в рентгеновское линейчатого и непрерывного спектра в экспериментах на установке «ЛУЧ». Методика основана на пространственно-временной (пространственное разрешение 150 мкм, временное 50 пс) регистрации рентгеновского излучения в 3 узких спектральных интервалах от 1 кэВ до 3 кэВ, проводимых на рентгеновском фотохронографе РФР-4. В проведенных опытах скорость прогрева мишени составила (1-3)·107 см/с для тепловой волны в области полимерного окна и (5–13)·10⁷ см/с для тепловой волны в газовом объеме, выход рентгеновского излучения в линиях L-серии криптона в различных опытах лежал в диапазоне 3-8 % от энергии лазерного импульса.

Одним из перспективных типов мишеней предназначенных для просвечивания объектов рентгеновским излучением являются мишени подкритической плотности. В таких мишенях лазерное излучение поглощается не в области критической плотности, а внутри объема мишени и значительная часть [1] лазерного излучения (>10 %) конвертируется в линейчатое рентгеновское излучение. В зависимости от задачи могут выбираться различные мишениконверторы. На установке «ЛУЧ» [2] проводятся исследования таких мишеней с целью изучения динамики генерации линейчатого излучения.

В проведенной серии экспериментов мишень представляла собой цилиндр из полипараксилилена, рис. 1, с толщиной стенки 15 мкм, наполненный внутри Kr под давлением 0,5-1 атм. Торец цилиндра был закрыт тонкой полимерной пленкой (~0,4 мкм), на которую падал лазерный пучок. Облучение проводилось второй гармоникой $\lambda_{2\omega}=0{,}53$ мкм одного канала установки «ЛУЧ». Размеры пятна фокусировки составляли 400 × 700 мкм. Фокусное расстояние объектива составляло 1 м при апертуре пучка 185 × 185 мм. Таким образом, можно считать, что лазерное излучение внутри мишени распространялось в газовой среде и не падало на стенку мишени. Энергия импульса варьировалась в каждом эксперименте и лежала в интервале 170-270 Дж. Длительность импульса составляла 1,5-2 нс.

Изучалась картина пространственно-временной генерации рентгеновского излучения вдоль цилиндра. Пространственное разрешение вдоль цилиндра и спектральную селекцию обеспечивал спектрограф РИВС-2 [3], который при помощи трех щелей обскур строил на фотокатоде фотохронографа 3 изображения мишени с М = 1,6. Каждое изображение строилось в своем диапазоне спектра, вырезаемом при помощи набора К-фильтров, расположенных на щелях спектрографа. Вырезались участки непрерывного рентгеновского спектра, а также участок с линиями L-серии криптона.



Рис. 1. Вид цилиндрической мишени «газовый мешок».

Временное разрешение обеспечивал рентгеновский фотохронограф РФР-4 [4]. Фотографии РФР-4 и спектрографа РИВС-2 приведены на рис. 2. Схема измерительного тракта методики [5] пространственно-временной регистрации излучения в спектральном диапазоне приведена на рис. 3. В проведенной серии экспериментов временное разрешение составляло 40 пс, пространственное – 150 мкм.



Рис. 2. Внешний вид: а – спектрометр РИВС-2, б – фотохронограф РФР-4

Предварительно на калибровочном стенде «РЭКС» [6] была проведена калибровка всех необходимых параметров фотохронографа РФР-4, включая спектральную чувствительность фотокатода, спектральное пропускание фильтров, получена картина дисторсионных искажений и неоднородности чувствительности прибора. Погрешность калибровки пропускания каждого фильтра составляет <2 %, погрешность размеров щелевой обскуры <10 %, погрешность калибровки абсолютной чувствительности РФР-4 ~12 %. Суммарная погрешность измерения абсолютных потоков рентгеновского излучения в отдельных спектральных интервалах составляет до 20 %.



б

Рис. 3. Схема измерительного тракта: а – РИВС-2, б – РФР-4: І – источник регистрируемого излучения, ІІ – блок щелевых обскур с набором фильтров, ІІІ – фотокатод (лавсан 3.6 мкм + Au 210 Å); І – фотокатод (лавсан 3,6 мкм + Au 210 Å), 2 – РЭОП СРП-7 (рентгеночувствительный электронно-оптический преобразователь), 3 – усилитель яркости, 4 – ПЗС камера

Обработка полученных фотохронограмм с учетом результатов калибровок, однородности чувствительности по экрану, компенсации дисторсионных искажений, скорости и нелинейности развертки РФР-4 проводилась при помощи программы CCD_CAM [7]. Параметры задействованных каналов: средняя энергия кванта hv_{cp} в канале и ширина окна пропускания Δhv, рассчитаны в программе XRAY [8], материалы и толщины фильтров, полученные по результатам калибровки приведены в таблице.

Параметры каналов, и	использованных
в проведенных	к опытах

№ канала	Состав фильтра	hv _{cp} , кэВ	∆hv, кэВ
1	19 мкм Be + 8 мкм Al	1,8	-
2	19 мкм Be + 20 мкм Cl	2,4	0,64
3	19 мкм Be + 10 мкм Cl	2,3	0,87

В данной схеме регистрации фильтры первого канала подавляют L-серию криптона поэтому сигнал, в основном, определяется непрерывной частью спектра. Фильтры второго и третьего канала имеют окно пропускания для L-серии криптона. Спектральные характеристики второго и третьего каналов отличаются слабо (см. рис. 4), таким образом, третий канал служит для расширения динамического диапазона регистрации линейчатой части спектра.

За счет контраста между первым и вторым каналами можно судить о соотношении линейчатого и непрерывного спектра в измеряемом излучении. Для предварительной оценки необходимых толщин фильтров требовалось выбрать предполагаемые форму спектра и яркость свечения мишени. Яркость рассчитывалась из предположения 2 % конверсионной эффективности мишени. В качестве модели непрерывного спектра излучения был выбран тормозной спектр свободно-свободных электрон-ионных столкновений [9].

$$I(hv) = \frac{E_{tot}}{T_e} \cdot \exp(-hv/T_e)$$
(1)

Очевидно, что при использовании этой модели, одного канала, измеряющего непрерывный спектр недостаточно для одновременной оценки энергии выхода и электронной температуры, поэтому электронная температура была принята равной 500 эВ.



Рис. 4. Спектральная характеристика 2 и 3 каналов, выраженная в количестве электронов вылетающих из фотокатода на 1 фотон, падающий в измерительный тракт



Рис. 5. Фотохронограммы эксперимента: а – в трех спектральных каналах, б – второй спектральный канал с проведенными огибающими

На рис. 5 приведены фотохронограммы одного из экспериментов в серии. Сплошным серым цветом на рис. 5а обозначена область насыщения регистрации. Ось z и указанный на ней масштаб соответствуют координате вдоль оси мишени. Сигнал во втором и третьем канале достиг насыщения, т. к. предварительные оценки яркости мишени оказались ниже наблюдавшейся в эксперименте. Поэтому данные результаты позволяют грубо оценить снизу конверсионную эффективность мишени.

Распределение яркости свечения мишени в разные моменты времени согласно результатам измерения второго канала представлены на рис. 6.



Рис. 6. Распределение яркости свечения мишени по результатам измерения второго канала: а – измерения второго канала, б – распределение яркости свечения мишени в разные моменты времени

Несмотря на достижение насыщения регистрации, на фотохронограммах, рис. 5а, и прописях профиля яркости свечения мишени, рис. 6б, в различные моменты времени, рис. 6,а, отчетливо видно наличие двух максимумов яркости вдоль оси мишени. Для получения скоростей распространения тепловых волн был выбран второй канал. Максимумы яркости приходятся на области насыщения, поэтому огибающая тепловой волны в газовом объеме условно проведена по уровню 20 % от максимального сигнала, т. е. ~3000 отсчетов матрины телекамеры. Форма области насышения регистрации тепловой волны в области полимерного окна достаточно симметрична, вместо огибающей была провелена прямая вдоль ее оси симметрии. Благодаря проведенной ранее компенсации дисторсионных искажений, угол касательной в каждой точке огибающей соответствует скорости движения тепловой волны, которая составила от $V_{2min} = (5 \pm 0,4) \cdot 10^7 \text{ см/с}$ $V_{2max} = (13 \pm 1) \cdot 10^7 \text{ см/с}$ для тепловой волны в газовом объеме. Для тепловой волны в области полимерного окна аналогично получена средняя скорость движения $V_1 = (1.5 \pm 0.4) \cdot 10^7$ см/с. Минимально достижимая погрешность определяется размером пиксела, а в общем случае зависит от скорости развертки, выбора способа проведения огибающей и контрастности фотохронограммы и составляет не менее 8 %.

Дальняя и ближняя тепловые волны не имеют строго определенной границы и их сигнал частично сливается, однако по минимуму профиля яркости можно провести условную границу между фронтами и сделать грубую оценку соотношения их энергетического выхода. Для этой оценки снова используем 2 канал (рис. 7). В результате суммарные сигналы отличаются на 18 %, отсюда, вклад ближней тепловой волны в общий энергетический выход мишени в пределах погрешности равен вкладу дальней тепловой волны.



Рис. 7. Условное разделение сигнала ближней и дальней тепловой волны

Таким образом, разработанная на базе щелевого фотохронографа методика позволяет измерять скорость распространения тепловых волн в нагреваемой лазерным импульсом мишени подкритической плотности, которые составляли от $1.5 \cdot 10^7$ см/с до $13 \cdot 10^7$ см/с в зависимости от условий эксперимента, конверсионную эффективность мишеней, составлявшую от 3 % до 8 % (в L-серию криптона).

В заключение авторы благодарят сотрудников установки «ЛУЧ» за проведенные эксперименты.

Литература

1. Back C. A. et al. Efficient Multi-ke V Underdense Laser-Produced Plasma Radiators // Phys. Rev. Lett., 2001, 87, 27 5003.

2. Безнасюк Н. Н., Галахов И. В., Гаранин С. Г. и др. Четырехканальная лазерная установка ЛУЧ – модуль установки ИСКРА-6. IV Харитоновские тематические научные чтения. // Сборник аннотаций. – Саров, 2002. С. 82.

3. Лазарчук В. П., Муругов В. М., Петров С. И., Сеник А. В. Фотохронографические методы регистрации пространственно-временных и спектральных характеристик рентгеновского излучения на установке «Искра-5» // Физика плазмы, 1994, Т. 20, № 1, С.101.

4. Лазарчук В. П, Литвин Д. Н., Муругов В. М. и др. Рентгеновский фотохронограф РФР-4 / ПТЭ, 2004, № 2, С. 128–132.

5. Лазарчук В. П., Мунтян А. Н., Муругов В. М., Петров С. И., Сеник А. В. Методика пространственновременных измерений генерации линейчатого рентгеновского излучения лазерной плазмы на установке «ИСКРА-5» / Физика плазмы, 2006. 32, № 2, С. 1–7. 6. Лазарчук В. П., Мунтян А. Н., Муругов В. М., Петров С. И., Сеник А. В. Методики калибровок рентгеновских фотохронографов и элементов рентгеновских измерительных схем / ПТЭ, 2004. № 2, С. 133–138.

7. Лазарчук В. П., Муругов В. М., Петров С. И., Сеник А. В. Пакет программ ССD-САМ для обработки фотохронограмм и спектрограмм. XII Всероссийская конференция «Диагностика Высокотемпературной Плазмы». г. Звенигород, Московской области, 3–8 июня 2007 / Тезисы докладов. С. 172.

8. Лазарчук В. П., Муругов В. М., Петров С. И., Сеник А. В. Пакет программ XRAY для расчета и оптимизации схем регистрации рентгеновского излучения в спектральном диапазоне hv = 0,03-30 кэВ. XII Всероссийская конференция «Диагностика высокотемпературной плазмы». г. Звенигород, 3– 9 июня 2007 / Тезисы докладов. С. 170–171.

9. Лазарчук В. П., Мунтян А. Н., Муругов В. М. и др. Регистрация временного хода электронной температуры и абсолютного выхода непрерывного и линейчатого (М-серия) рентгеновского излучения из плоских Аи мишеней, облучаемых на установке «Ис-кра-5». ПТЭ, 2008, № 2, С. 75–80.

ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ ОТРАБОТКА МОДУЛЯ ДИСКОВОГО ВМГ СРЕДНЕГО КЛАССА

<u>А. Н. Ерофеев</u>, К. Н. Климушкин, Н. И. Ситникова, К. С. Торопов

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

Введение

В ряде областей физического эксперимента необходимо получение мощных электрических импульсов тока и магнитной энергии в десятки и сотни мегаджоулей. Разработка генераторов на базе конденсаторных источников связана с определенными физическими и техническими трудностями (необходимы малоиндуктивные конденсаторы с большой удельной энергоемкостью, малоиндуктивные коммутирующие устройства и т. д.), а также с большими капитальными вложениями. Одним из возможных способов получения мощных импульсов тока является использование взрывомагнитных генераторов (ВМГ) с индуктивным накопителем энергии, работающих на принципе эффекта магнитной кумуляции.

Дисковый ВМГ – устройство одноразового действия. В основу построения генератора положен модульный принцип. Вся конструкция генератора состоит из отдельных дисковых модулей, работающих параллельно на одну и ту же нагрузку.

При работе ДВМГ необходимо знать зависимость индуктивности от времени. Она же в свою очередь зависит от положения тарелей диска.

На рис. 1 представлена конструкция двухэлементного дискового ВМГ диаметром 400 мм. Принцип действия взрывомагнитного генератора основан на преобразовании химической энергии взрывчатых веществ в энергию магнитного поля путем быстрого сжатия продуктами взрыва электрического контура с током. Начальный магнитный поток в контуре дискового ВМГ создается спиральным взрывомагнитным генератором (1).



Рис. 1. ДВМГ диаметром 400 мм: 1 – спиральный взрывомагнитный генератор, 2 – узел отключения, 3 – заряды ВВ ДВМГ, 4 – система инициирования, 5 – медные диски, 6 – полость

Ранее в дисковых ВМГ использовался прессованный заряд ВВ, но в связи с дорогой ценой возникла

необходимость использовать пластизольный заряд, которым снаряжали дисковый модуль путем вибровакуумной заливки. Было понятно, что меняются параметры ДВМГ, и поэтому требуется произвести газодинамическую отработку дискового модуля для получения новых расчетов и экспериментальных подтверждений.

Постановка задачи

Целью проведения эксперимента является определение временных характеристик разлета тарели диска под действием продуктов взрыва, отработка симметрии выхода ударной волны и определение фактической скорости детонации.

Объектом исследования является профилированный дисковый элемент Ø 400 мм, снаряженный пластизольным взрывчатым веществом. Конструкция диска приведена на рис. 2.



Рис. 2. Конструкция профилированного диска Ø 400 мм: 1 – тарель (пластина); 2 – ВВ; 3 – инициирующая часть

Для решения данной задачи необходимо было разработать устройство, которое позволяет регистрировать положение отдельных точек тарели во времени и фиксировать выход ударной (детонационной) волны на внешний диаметр диска.

Методы определения динамики движений тарелей дискового модуля

Для получения экспериментальных данных были выбраны два метода определения параметров разлета тарелей: электроконтактный и фотохронографический.
Электроконтактный метод

Диск ВМГ заземляют. Датчики подключают к плюсу источника энергии. При срабатывании ВВ происходит разлет тарелей (пластин) ВМГ, которые ударяя по датчику, замыкают цепь. Благодаря этому, на устройство регистрации поступает сигнал. Время поступления сигнала является временем достижения пластиной заданных координат (см. рис. 3).



Рис. 3. Диск ВМГ с установленными электроконтактными датчиками

Фотохронографический метод

Для фотохронографирования необходим скоростной фоторегистратор (СФР). СФР – высокоскоростная установка, предназначенная для фотографической регистрации быстропротекающих процессов (быстрое горение, взрыв, распространение ударных волн, искровой разряд и др.). При фотохронографировании скорость развертки изображения от 150 до 3750 м/с. С помощью этого метода можно зафиксировать время выхода точки поверхности тарели на плоскость регистрации. Для этого во фланец, в котором вырезано окошко, закрытое стеклом, с нанесенной на него фольгой, вставляют дисковый элемент ДВМГ. При срабатывании ВВ внутри дискового элемента ДВМГ происходит разлет тарелей, которые ударяют по фольге и вызывают свечение (вспышку). СФР производит фиксацию вспышек на фотопленку.

Описание конструкции и выбор материалов устройства

Для проведения эксперимента была разработана конструкторская документация на устройство по газодинамической отработке полета тарели дискового элемента Ø 400 мм с пластизольным BB. Конструктивное исполнение устройства приведено на рис. 4. Фланец представляет собой диск из орг.стекла, в котором выполнены отверстия для установки электроконтактных датчиков и паз для регистрации полета тарели методом скоростной фоторегистрации.



Рис. 4. Конструктивное исполнение устройства: 1 – фланец, 2 – электроконтактные датчики, 3 – дисковый элемент, 4 – узел инициирования

В опыте используются два вида электроконтактных датчиков – резьбовые контактные датчики и датчики «контакт-игла».

Резьбовые контактные датчики располагают на прямых, расходящихся от центра фланца (см. рис. 3). Азимутальное расположение датчиков приведено на рис. 5.



Рис. 5. Азимутальное расположение датчиков

Датчики № 1–14 установлены до упора в тарель диска, что позволяет определить начало движения тарели. Датчики № 15–25 располагаются на расстоянии 4,5 мм от плоскости тарели, а датчики № 42–55 располагаются заподлицо с фланцем, что позволяет определить время выхода точек тарели на плоскость регистрации.

Датчики «контакт-игла» располагаются в месте перехода «тарель – конус» и на наружном диаметре дискового элемента. Конструктивное исполнение и вид расположения датчиков «контакт-игла» приведен на рис. 6 и 7.



Рис. 6. Вид расположения датчика «контакт–игла» в месте перехода «тарель – конус»

Компьютерное моделирование

С целью получения данных о процессе движения тарели диска \emptyset 400 мм под действием продуктов взрыва был проведендвумерный расчет в среде AUTODYN.

Считалось, что в начальный момент времени все части системы находятся в ненапряженном состоя-



Рис. 7. Вид расположения датчика «контакт-игла» на наружном диаметре дискового элемента

нии, начальная скорость всех частей системы равна нулю. За время t = 0 мкс, был принят момент возбуждения детонации в шашке от электродетонатора УИ (т. е. время работы электродетонатора и другие временные задержки системы не учитывались).

Расчетная модель приведена на рисунках, сведенных в таблицу.



Расчетная модель

Результаты эксперимента

К эксперименту было подготовлено устройство для исследования процесса полета тарели дискового элемента Ø 400 мм. Внешний вид экспериментальной сборки приведен на рис. 8.

В результате эксперимента были получены времена срабатывания электроконтактныхдатчиков.

Времена подлета тарели к базам 0, 5, 10, 15 и 20 мм для разных радиусов в эксперименте приведены на рис. 9.

Фотохронограмма подлета тарели к отсечке приведена на рис. 10.

Данная фотохронограмма была обработана и получен график зависимости полета тарели диска от времени. На рис. 11 приведены времена подлета тарели к базе – 20 мм в эксперименте и при расчете.



Рис. 8. Внешний вид экспериментальной сборки



Рис. 9. Времена подлета тарели к базам 0, 5, 10, 15 и 20 мм для разных радиусов



Рис. 10. Фотохронограмма подлета тарели к отсечке



Рис. 11. Времена подлета тарели к базе – 20 мм в эксперименте и расчете: 1 – эксперимент СФР; 2 – расчетные данные

На рис. 11 расчетная кривая смещена вправо по оси X на 2,5 мкс с учетом работы ЭД и времени задержки устройства запуска подрыва. По графику видно, что расхождение экспериментальной и расчетной кривых не превышает 8 % на 20-ой мкс и 10 % на 28-ой мкс. Общая картина всех экспериментальных данных приведена на рис. 12. Анализ графиков на рис.12 показал, что вычисленные скорости детонации ВВ по результатам показаний датчиков, расположенных на различных расстояниях от тарели составляют 8–8,2 км/с, соответственно погрешность измерений составляет 2 %.

Результаты газодинамического эксперимента с использованием прессованного ВВ приведены на рис. 13 и 14.



Рис. 12. Графики зависимости полета тарели от времени, полученные на основе всех экспериментальных данных



Рис. 13. Времена подлета тарели к базам 0, 5, 10, 15 и 20 мм для разных радиусов с использованием прессованного ВВ



Рис. 14. Фотохронограмма подлета тарели к отсечке с использованием прессованного ВВ

Средняя скорость детонациипрессовнного BB была установлена 7,7 км/с, а скорость тарели ~2 км/с.

Сравнение результатов экспериментов с использованием различных ВВ показывает, что скорость тарели у диска, снаряженного пластизольным составом, на 10 % выше, чем у диска, снаряженного прессованным составом, при лучшей симметрии полета.

Это дает основание полагать, что результаты работы ДВМГ, снаряженного пластизольным составом будут не хуже, чем ДВМГ, снаряженный прессованным ВВ.

Заключение

В ходе научно-исследовательской работы было разработано устройство для определения параметров разлета тарелей дискового взрывомагнитного генератора. На этапах проектирования были проанализированы методы определения параметров разлета тарелей ДВМГ, из которых выбран наиболее эффективный, разработана методика расстановки электроконтактных датчиков, проведено компьютерное моделирование процессов происходящих в результате проведения опыта. Был проведен газодинамический эксперимент с профилированным диском Ø 400 мм по отработке симметрии выхода ударной волны разлета медной тарели на внешнюю плоскость. По полученным экспериментальным данным видно хорошее совпадение с расчетными данными компьютерного моделирования.

Скорость детонации пластизольного BB, зарегистрированная в эксперименте равна 8,2 км/с, скорость полета тарели – 2,2 км/с.

Литература

1. Волков Г. И. Сверхмощные взрывомагнитные генераторы электрической энергии // Дисковые взрывомагнитные генераторы. 2009.С. 190–201.

2. Протасов М. С., Архипов Б. В., Петрухин А. А., Прокопов В. А., Чернышев В. С., Шевцов В. А. Быстродействующий дисковый взрывомагнитный генератор. Труды Третьей Международной конференции по генерации мегагауссных магнитных полей и родственным экспериментам. 1983. С. 26–28.

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗРУШЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ФИНАЛЬНОГО ОПТИЧЕСКОГО МОДУЛЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

И. А. Белов, В. Н. Деркач, И. Н. Деркач, <u>Р. В. Жуков,</u> Б. Г. Зималин, О. М. Кудряшев, Н. Н. Рукавишников

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

На основании конструкторской документации создана трехмерная модель финального оптического модуля (ФОМ) мощной лазерной установки в части составляющих его оптико-механических элементов. Экспериментально определены пороги разрушения стандартных материалов, из которых предполагается изготовление конструкции модуля и оправ оптических элементов. В созданной расчетной модели локализованы области оптико-механической конструкции, где плотность энергии обратноотраженного излучения превышает порог разрушения материалов. Предложены меры, направленные на защиту составных частей ФОМ.

Введение

Мощное лазерное излучение, даже сильно ослабленное при многократных отражениях от оптических деталей, может представлять опасность с точки зрения повреждения поверхностей механических элементов конструкции установки. Испарение материалов, на которых превышен порог прочности, может оказаться причиной загрязнения оптических элементов. Попав в интенсивное излучение, частицы материала, находящиеся на поверхности оптической детали, будут гореть, разрушая ее покрытие (зеркальное или просветляющее). Амплитудные неоднородности оптического тракта, полученные таким образом, далее будут каскадно воспроизводиться, переходя в фазовые искажения и обратно в амплитудные, и приводя к последовательному выводу из строя других элементов оптического тракта.

В данной работе проведен расчет «паразитных» отражений в оптической схеме финального оптического модуля, определены места его конструкции, где порог разрушения материалов превышен. Локализация таких мест необходима для проведения работ по реализации мер, направленных на увеличение порогов повреждения и защиту используемых конструкций и оптических деталей.

Модель финального оптического модуля

Финальный оптический модуль это оптическая система, которая фокусирует пучок и формирует распределение интенсивности излучения на поверхности мишени [1]. В состав ФОМ входят следующие оптические элементы: фазовая пластина (ФП), линза, герметизирующая пластина (ГП) и защитная пластина (ЗП). На рис. 1 согласно конструкторской документации (КД) и расчетной модели показаны оправы перечисленных элементов.



Рис. 1. Оправы ФОМ согласно КД и расчетной модели: а – модель согласно КД оправы и основания ФП; б – оправа и основание ФП, расчетная модель; в – модель согласно КД оправы и основания линзы; г – оправа и основание линзы, расчетная модель; д – модель согласно КД оправы ГП, 1-я по ходу излучения; е – оправа ГП, расчетная модель, 1-я по ходу излучения; ж – модель согласно КД оправы ГП, 2-я по ходу излучения; з – оправа ГП, расчетная модель согласно КД оправы ГП, 2-я по ходу излучения; з – оправа ГП, расчетная модель согласно КД оправы ГП, 2-я по ходу излучения; з – оправа ГП, расчетная модель согласно КД оправы ГП, 2-я по ходу излучения; з – оправа ГП, расчетная модель согласно КД оправы ЗП; к – оправа ЗП, расчетная модель



Рис. 2. Положение мест оправ и корпуса ФОМ, где проводится измерение лучевой нагрузки и нумерация оптических поверхностей канала ФОМ. Расчетная модель: 1 оправа ФП; 2 - оправа линзы; 3 - оправа ГП, 1-я по ходу излучения; 4 – оправа ГП, 2-я по ходу излучения; 5 – оправа ЗП. Цифры 1–5 снизу показывают места оправ, корпуса ФОМ, где проводится измерение лучевой нагрузки. Цифры 1–8 сверху – нумерация поверхностей оптических элементов по ходу излучения



Рис. 3. Распределение плотности энергии: а – на входе в ФОМ двумерное, б – в центральном сечении. 1 – сечение пучка на входе в ФОМ, 2 – уровень 0,01 от пиковой плотности энергии

При попадании полученных лучей на другие оптические поверхности они так же разделяются на две части и т. д. В расчетах не учитывается, ввиду малости, величина поглощения материала в оптическом материале (используется кварц марки HPFS[®]SG C 7980).

Определение порога разрушения при однократном воздействии излучения на материалы

Исследования лучевой прочности проведены по методике определения оптической устойчивости элементов к действию импульсной лазерной нагрузки. Практическая реализация метода измерения заключалась в том, что на исследуемом объекте позиционировались одновременно несколько пучков, градуированных по величине нагрузки. Повреждение поверхности, сопряженное с положением пучков, наблюдалось визуально под микроскопом. Величина порогового, для разрушения, сигнала определялась как среднее для полей облучения, где еще не наблюдаются и уже наблюдаются признаки абляции поверхности облучаемого материала. Схема стенда для проведения испытаний представлена на рис. 4.

Исходный импульс источника лазерного излучения с гауссовым пространственным профилем интенсивности (Ø24 мм по уровню интенсивности 0,1) делится на несколько пучков при прохождении специальной матрицы диафрагм МД (Ø19 мм), выполненной в виде нескольких распределенных в одной плоскости апертурных диафрагм (19 диафрагм, Ø3 мм каждая). МД выполняет одновременно роль делителя исходного излучения и формирователя апертуры разделенных пучков. Изображение диафрагмы перестраивается на исследуемый образец посредством двух линз Л1 и Л2. Матрица диафрагм располагается в передней фокальной плоскости линзы Л1. В задней фокальной плоскости линзы Л1 внутри вакуумной кюветы, исключающей оптический пробой воздуха, установлена диафрагма Д, размером в один дифракционный предел ($\emptyset \approx 2$ мм), предназначенная для формирования разделенных пучков, каждый из которых имеет гауссовый пространственный профиль. На расстоянии 1 м от диафрагмы располагается линза Л2 (f = 50 см), в заднюю фокальную плоскость которой перестраивается изображение МД. В результате в плоскости исследуемого образца, размещенного в данной плоскости, формируется 19 разделенных в пространстве лазерных пучков разной интенсивности. Решение схемной и усилительных систем обеспечивает на образцах максимальную нагрузку до 40 Дж/см² при энергии излучения ≈4 Дж в плоскости расположения МД с изменяемой длительностью импульса. Интегральная (по всем пятнам) энергия излучения и распределение нагрузки по подпучкам контролируются калориметром и ПЗС камерой (позиции К и ССD1 на рис. 4) при отражении от оптического клина, расположенного перед образцом. Длина волны излучения равняется $\lambda = 1,054$ мкм.



Рис. 4. Оптическая схема определения порога разрушения при однократном воздействии излучения на материалы: МД – матрица диафрагм; Л1, Л2 – линзы с фокусными расстояниями 200 см, 50 см; Д – диафрагма диаметром 2 мм; Кл – клин; СФ1 и СФ2 – светофильтры; К – калориметр; ССD1 и ССD 2 – ССD-камеры; М – микроскоп



Рис. 5. Изображение ближней зоны матрицы пучков на исследуемом образце



Рис. 7. Порог разрушения материалов (длина волны $\lambda = 1,054$ мкм). 1 – АМгб $\sqrt{Rz20}$; 2 – АМгб $\sqrt{Rz10}$; 3 – АМгб $\sqrt{Ra25}$; 4 – АМгб $\sqrt{Rz20}$ с Ан. Окс. нх; 5 – АМгб $\sqrt{Rz20}$ с Аноцвет. нв.; 6 – Сталь 10 $\sqrt{Rz20}$ с Кд. хр.; 7 – Сталь 10 $\sqrt{Rz20}$ с Ц. хр.; 8 – Сталь 10 $\sqrt{Ra25}$ с Кд. хр.; 9 – Сталь 10 $\sqrt{Ra25}$ с Кд. хр.; 10 – Сталь 10 $\sqrt{Ra25}$ с Ц. хр.; 11 – Сталь 12Х18Н10Т $\sqrt{Rz20}$; 12 – Сталь 14Х17Н2 $\sqrt{Rz20}$

Изображение типичной ближней зоны облучения образца представлено на рис. 5, а пространственный профиль матрицы пучков на исследуемом образце – на рис. 6.

Всего проведено испытаний 12 образцов. Результаты представлены на рис. 7. Значения плотности энергии приведены по методу, согласно [2], к длительности импульса по полувысоте, равной 3 нс.

По результатам испытаний для использования в оправах и конструкции ФОМ рекомендовано использование материала АМг6 $\sqrt{Rz10}$, как имеющего наибольшую величину порога разрушения.



Рис. 6. Пространственный профиль плотности энергии по вертикали



Рис. 8. Оптическая схема экспериментов по определению порога разрушения в частотном режиме облучения материалов: Д – диафрагма диаметром 7мм; Л – линза с фокусными расстоянием 10 см; Кл – клин; СФ1 и СФ2 – светофильтры; К1, К2 – калориметры; ССD – ССD-камера; ОШ – оптоволоконная шайба

Исследование порогов разрушения материала при многократном воздействии излучения. Зависимости порогов от длины волны излучения

Для проведения измерения порога разрушения материала при многократном воздействии излучения использовался лазер накачки петаваттного канала установки «Луч». Длина волны первой гармоники $\lambda_{1\omega} = 1,054$ мкм, второй $\lambda_{2\omega} = 0,527$ мкм. Измерения проводились по схеме, представленной на рис. 8.

Излучение с выхода оптоволоконной шайбы ОШ через диафрагму Д попадало на ССD-камеру или заменяющий ее образец. Измерение энергии, поступающей на образец, проводилось в откалиброванной эквивалентной схеме. Частота выстрелов равна 1 Гц. Полученная зависимость плотности энергии, при которой происходит разрушение поверхности, от разного количества выстрелов для выбранного материала АМг6 $\sqrt{Rz10}$ показана на рис. 9. Длительность импульса 3 нс.



Рис. 9. Зависимость плотности энергии, при которой происходит разрушение поверхности, от разного количества выстрелов. Материал АМг6 $\sqrt{Rz10}$

Видно, что уменьшение значения длины волны излучения сопровождается снижением плотности энергии, необходимой для достижения порога разрушения примерно в 1,7 раза. Так порог разрушения для 10 и 20 при 120 выстрелах составляет 0,30 Дж/см² и 0,18 Дж/см² соответственно. Увеличение количества выстрелов с 1 до 120 в одно и то же место приводит к снижению значения порогов примерно вдвое.

Расчетное определение мест конструкции с превышением порога разрушения

Лазерное излучение с высокой плотностью энергии может повреждать элементы конструкции ФОМ. Для локализации таких мест проведен анализ бликов от оптических поверхностей ФОМ и рассчитана максимальная плотность энергии излучения, падающего на элементы конструкции. Согласно рис. 9 для второй гармоники ($\lambda = 0,527$ мкм) порог разрушения составляет 0,18 Дж/см². Исходя из опыта работы мощных лазерных установок, максимальная плотность энергии может превосходить среднее значение в несколько раз. Так для установки NIF этот коэффициент ≈ 2 [3]. В данной работе взят коэффициент 3. Поэтому, в дальнейших расчетах определим для оценок пороговую величину плотности энергии, при котором происходит разрушение поверхности, как $\varepsilon_0 = 0,06$ Дж/см².

Результаты расчетов бликов от поверхностей оптических элементов ФОМ приведены в таблице.

В качестве примера визуализации результатов, на рис. 10 представлено распределение лучевой нагрузки на поверхности оправы ФП. Основной вклад в значение плотности энергии вносит блик 1-го порядка от поверхности № 8. Необходимо отметить, что та же поверхность № 8 определяет превышение порога разрушения и для других поверхностей конструкции ФОМ.



Рис. 10. Распределение плотности энергии бликов на оправе ФП. Основной вклад в значение плотности энергии вносит блик 1-го порядка от поверхности № 8

	Пиковая плотность энергии, Дж/см ²							
Название элемента	Левая часть	Верхняя часть	Правая часть	Нижняя часть	Основание			
Оправа ФП	6,72E-01	3,31E-02	3,28E-02	6,60E-01	2,58E-04			
Оправа Линзы	3,36E-01	1,01E-03	9,91E-04	3,47E-01	4,50E-04			
Оправа ГП (1-я по ходу излучения)	4,51E-02	9,81E-04	9,17E-04	4,44E-02	_			
Оправа ГП (2-я по ходу излучения)	4,76E-02	9,23E-04	9,18E-04	4,74E-02	_			
Оправа ЗП	5,23E-02	9,06E-04	8,80E-04	5,35E-02	_			
Корпус ФОМ	4,80E-03	1,67E-03	1,72E-03	2,38E-03	_			
Фланец	3,48E-01							

Пиковые плотности энергии на элементах конструкции ФОМ, полученные при моделировании

Лучевая нагрузка, превосходящая порог разрушения ε_0 , приходится на левые и нижние части оправы ФП (6,60Е-01–6,72Е-01 Дж/см²), левые и нижние части оправы линзы (3,36Е-01–3,47Е-01 Дж/см²) и на Фланец (3,48Е-01 Дж/см²). Поэтому необходимы меры, по защите данных поверхностей от повреждения.

Вопрос защиты поверхностей конструкции ФОМ от возможного разрушения действием излучения сводится к:

 нанесению просветляющего покрытия на поверхность № 8;

 выбору способа «обработки» поверхности материала, что приведет к увеличению значения порога разрушения;

 покрытию критических мест защитным стеклом, предотвращающим разлет частиц испаренного материала и попадание их на оптические компоненты.

Все, отмеченные в таблице места с превышением порогового значения плотности энергии, получены с учетом отражения от поверхности № 8. Этот факт определяет еще один возможный сценарий: изменение угла наклона защитной пластины с тем, чтобы отражение от поверхности № 8 в обратном ходе попадало в световую апертуру оптических элементов и не попадало на поверхности конструкции ФОМ.

С точки зрения выбора материала оправ решение может заключаться в предварительной «обработке» поверхности (или специально выделенной его части). Под обработкой следует понимать комплекс мер, направленный на увеличение величины порога и закрепление этого свойства. Основными средствами «защиты» могут являться:

 увеличение площади детали, находящейся под действием излучения, в том числе, и за счет профилирования;

 проведением обработки поверхности методами лазерного упрочнения (отжига поверхности).

 увеличение доли отражения (уменьшения поглощения) излучения от поверхности. Однако в этом случае необходимо учесть отражение не только от поверхностей оптических элементов, но и от данных поверхностей конструкции ФОМ.

Последний эффект, в частности, может обеспечиваться напылением зеркального слоя на часть поверхности.

Закрытие мест, где превышен порог разрушения защитным стеклом, может оказаться наиболее выгодным способом защиты оптических элементов от продуктов абляции. Так частицы испаренного материала остаются в объеме, между поверхностью материала и защитным стеклом, и не попадают на оптические поверхности. В этом случае нет необходимости в дополнительной обработке поверхностей и гарантируется отсутствие загрязнения оптических элементов продуктами абляции. Держатели оптических элементов рекомендуется так же «одеть» в защитное стекло. Либо нанести отражающее покрытие и сделать поверхности выпуклыми. Последнее позволит отраженное от них излучение рассеивать. Прокладки между кварцем и держателями необходимо так же защитить от излучения высокой плотности энергии.

Заключение

Создана модель оптических элементов и механической конструкции ФОМ.

Проведены работы по определению в импульсном режиме значений плотности энергии, при которых происходит разрушение поверхности материалов. Экспериментально исследованы материалы: разные виды сталей и алюминиевый сплав АМг6 с разной степенью чистоты обработки поверхностей. Также проведены опыты по облучению материалов, защищенных покрытием. Наибольшей устойчивостью к воздействию излучения обладает АМг6, имеющий обработку поверхности $\sqrt{Rz10}$.

Найдено, что уменьшение значения длины волны излучения сопровождается снижением плотности энергии, необходимой для достижения порога разрушения, примерно в 1,7 раза. Так порог разрушения для длины волны излучения первой ($\lambda = 1,054$ мкм) и второй ($\lambda = 0,527$ мкм) гармоники для длительности импульса 3 нс при 120 выстрелах составляет 0,30 Дж/см² и 0,18 Дж/см² соответственно. Увеличение количества выстрелов с 1 до 120 в одно и то же место приводит к снижению значения порогов примерно вдвое.

Проведены расчеты обратно отраженных сигналов с целью локализации мест с лучевой нагрузкой, превышающей порог разрушения. Получено, что критическая лучевая нагрузка приходится на оправы фазовой пластины (6,60E-01–6,72E-01 Дж/см²), линзы (3,36E-01–3,47E-01 Дж/см²), и на поверхности фланца (3,48E-01 Дж/см²).

Предложены методы защиты элементов механической конструкции от разрушений, вызванных воздействием лазерного излучения, а также методы защиты оптических элементов от продуктов разрушения материалов.

Литература

1. Деркач В. Н., Деркач И. Н., Жуков Р. В. Финальный оптический модуль установки «установка нового поколения» с пространственным разведением излучения первой и второй гармоники в плоскости установки мишени // Сборник работ ВНИИЭФ. 2015. Т. 20, № 1. С. 396.

2. Берченко Е. А., Кошкин А. В., Соболев А. П., Федюшин Б. Т. Влияние длины волны лазерного излучения на порог плазмообразования при облучении непрозрачных материалов // Квантовая электроника, 1981, Т. 8, № 7. С. 1582–1583.

3. Conder A., Alger T., Azevedo S., Chang J. at al. Final optics damage inspection (FODI) for the National Ignition Facility // LLNL, November 12, 2007.

ЗОНДОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ В ВАКУУМЕ

А. С. Каторов, В. О. Ревазов, В. П. Селезнев

ФГУП «ВНИИА им. Н. Л.Духова», Москва

Ввеление

С появлением малогабаритных лазерных систем, представляет широкий научный и производственный интерес создание электрофизических установок и приборов, принцип действия которых основывается на оптическом управлении. В связи с этим в настоящее время особенно актуальны исследования взаимодействия лазерного излучения с веществом.

Взаимодействие лазерного излучения с металлом происходит следующим образом: излучение лазера фокусируется на поверхности металла в пятно диаметром обычно несколько десятых миллиметра, чем вызывает интенсивный нагрев облучаемой поверхности. Возникает термоэлектронная эмиссия, и затем при интенсивности падающего излучения, лежащей в диапазоне от 10^6 до 10^{10} Вт/см² [1], в течение не более 5-10 нс после начала облучения происходит плавление и испарение материала мишени. Воздействие продолжающегося лазерного импульса на пары вещества вызывает их ионизацию, что приводит к формированию лазерно-пламенного факела, распространяющегося в вакуум [2].

Плазму, возникшую на поверхности тела при его облучении сфокусированным лазерным пучком, называют «приповерхностной лазерной плазмой» [3] или просто «лазерной плазмой».

Одним из наиболее широко используемых и информативных методов диагностики плазмы является метод зондов Ленгмюра, который позволяет определять концентрации заряженных частиц плазмы, функции распределения электронов по энергиям и скоростям, потенциал плазмы.

Для определения влияния материала мишени на параметры лазерной плазмы и динамику формирования лазерного факела в рамках данной работы проведены зондовые исследования лазерной плазмы инициируемой на различных мишенях, лазерным излучением наносекундного диапазона длительности с интенсивностью порядка 10⁹ Вт/см² в вакуумной камере с давлением порядка 10⁻⁴Торр.

Схема экспериментов

Исследования проводились в оптически прозрачной вакуумной камере, оснащенной двухэлектродной системой, где один из электродов являлся мишенью, а второй одиночным зондом. Схема экспериментов показана на рис. 1.



Рис. 1. Блок схема экспериментальной установки: 1 – лазер импульсный твердотельный с диодной накачкой, 2 – юстировочный лазер (He-Ne), 3 - полупрозрачные зеркала, 4 – фотодатчик, 5 – собирающая линза, 6 – вакуумная камера, 7 – мишень, 8 – зонд, 9 – источник постоянного тока, 10 – резистор (27 кОм), 11 – конденсатор с емкостью 2 мкФ, 12 – резистор (60 Ом), 13 – осциллограф, 14 – вакуум-провод, 15 – магнитно-разрядный насос

В работе использовался импульсный твердотельный лазер с диодной накачкой наносекундного диапазона длительности. Длина волны лазерного излучения – 1064 нм. Энергия лазерного излучения в импульсе -1,0 мДж.

При проведении эксперимента (рис. 1) импульс излучения лазера 1, попадая на полупрозрачное зеркало 3, разделялся на две части. Первая часть поступала на фотодатчик 4, подключенный к осциллографу, а вторая, проходя через собирающую линзу 5 и оптически прозрачную стенку вакуумной камеры 6, фокусировалась на поверхность мишени, что приводило к возникновению вблизи мишени лазерной плазмы. Далее, после получения сигнала с фотодатчика, осциллограф регистрировал сигнал с зонда, установленного на расстоянии 8 мм от мишени.

условиях эксперимента радиус Дебая В $r_D \approx 10$ мкм, длины свободного пробега электронов и ионов составляют порядка 0,3 м, что соответствует реализации условия бесстолкновительного слоя в методе зондов Ленгмюра.

Эксперименты проводились для трех материалов мишени: титан, ковар, алюминий. Для каждого из представленных материалов было получено более 50 осциллограмм с хорошей повторяемостью, показывающих сигнал с зонда и фотодатчика в зависимости от времени, начиная с момента попадания лазерного луча на фотодатчик (на мишень).

Далее, записывая ток на зонде при разных потенциалах зонда через одно и тоже время после попадания лазерного излучения на мишень, были получены вольтамперные характеристики зонда в разные моменты времени (рис. 2).



Рис. 2. Вольтамперная характеристика сигнала с зонда через 60 нс после попадания лазерного излучения на мишень из титана

По полученным вольтамперным характеристикам определялись значения температур и концентраций заряженных частиц.

Необходимо отметить, что для построения вольтамперных характеристик и получения более точных результатов были использованы осциллограммы, полученные усреднением по нескольким измерениям. Экспериментальные данные были получены в диапазоне потенциалов зонда от –120 В до 120 В.

Результаты и их обсуждение

На рис. 3 представлены типичные осциллограммы лазерного импульса и сигнала на зонде при потенциалах зонда –80 В, –5 В, +5 В и +80 В на мишени из титана (сигнал схожей формы наблюдался и на других мишенях).



Рис. 3. Осциллограммы лазерного импульса (ch1) и сигнала на зонде (ch2) при потенциалах зонда –80 B, –5 B, +5 B, +80 B на мишени из титана (сплав BT1-0)

На данных осциллограммах прослеживается два характерных пика. Первый пик возникает одновременно с попаданием лазерного излучения на мишень, при этом амплитуда пика не меняется как при изменении величины напряжения, подаваемого на зонд, так и при смене его полярности.

Примерно через 100 нс после попадания лазерного импульса на мишень возникает второй пик,

который также наблюдается на всех осциллограммах. Его амплитуда зависит от величины потенциала, приложенного к зонду. На всех материалах мишени этот пик при отрицательных потенциалах наблюдается раньше, чем при положительных.

В настоящей работе первый пик наблюдается одновременно с приходом на мишень лазерного излучения. Согласно [4], это явление связано с фотоэлектронным током на зонд. Однако красная граница фотоэффекта для исследуемых материалов составляет 450 нм для алюминия, 287 нм для железа и 249 нм для никеля, что существенно ниже длины волны лазерного излучения, используемого в эксперименте.

Смещение красной границы фотоэффекта возможно при использовании мощных импульсных лазеров [5, 6] за счет явления многофотонного поглощения.

Таким образом, были сделаны выводы о том, что в настоящей работе появление на осциллограммах первого пика связано с приходом на зонд группы электронов, вызванных многофотонным фотоэффектом при взаимодействии лазерного излучения с мишенью. Второй пик вызван приходом на зонд основной группы частиц (лазерной плазмы), полученной в результате плавления и испарения материала мишени [4].

По полученным осциллограммам для нахождения температуры и концентрации заряженных частиц были построены вольтамперные характеристики в различные моменты времени после попадания лазерного импульса на мишень.

Вольтамперные характеристики сигнала с зонда полученные через 0–20нс после попадания лазерного излучения на мишень, не подлежат анализу, т. к. их вид сильно отличается от предложенного Ленгмюром в его теории зондов. На рис. 4 показан пример такой характеристики.



Рис. 4. Вольтамперная характеристика сигнала с зонда через 20 нс после попадания лазерного излучения на мишень из ковара

Наиболее близкий к классическим, вид вольтамперных характеристик наблюдается в моменты времени 40 и 60 нс после попадания лазерного импульса на мишень. На рис. 2. показана такая характеристика, полученная на титане через 60 нс после попадания лазерного импульса на мишень.

Вольтамперные характеристики сигнала с зонда, наблюдаемые через 80–400 нс после попадания лазерного излучения на мишени из ковара, алюминия и титана, имели схожую форму. Так, на рис. 5 показана характеристика для титана, полученная в момент времени 260 нс от попадания лазерного импульса на мишень.



Рис. 5. Вольтамперная характеристика сигнала с зонда через 260 нс после попадания лазерного излучения на мишень из титана

Представленные вольтамперные характеристики несколько отличаются от классических. Наблюдается сильный рост значения ионного тока при уменьшении потенциала зонда (в классическом случае его величина практически не изменяется). В результате данного эффекта не представляется возможным найти ионный ток насыщения, а, следовательно, и концентрацию ионов, поэтому в настоящей работе мы ограничимся нахождением таких параметров плазмы, как температура и концентрация электронов. Описанное явление, судя по всему, вызвано развитием в плазме ленгмюровских колебаний, которые способствуют разбросу регистрируемых значений тока на зонде [7, 8].

По полученным вольтамперным характеристикам сигнала с зонда для каждого из материалов мишени, в диапазоне по времени от 0 нс до 400 нс (с шагом 20 нс), были найдены значения температур и концентраций электронов в различные моменты времени.

На рис. 6 показаны зависимости величин температур электронов от времени, пройденного с момента попадания лазерного импульса на мишени из ковара, алюминия и титана.



Рис. 6. Зависимость температуры электронов от времени, с момента попадания лазерного импульса на мишени из ковара, алюминия и титана

Анализ представленных зависимостей позволяет сделать вывод о том, что температура электронов на протяжении всего времени регистрации была одинаковой в пределах погрешности и составила $T_e = 1,5$ эВ, более того, величина ее одинакова и при разных материалах мишени. Таким образом, можно утверждать, что в условиях эксперимента величина температуры электронов, в пределах погрешности, не зависит ни от времени, с момента попадания лазерного импульса на мишень, ни от материала мишени.

Иная картина прослеживается с зависимостями величин концентрации электронов от времени, с момента попадания лазерного импульса на мишени из ковара, алюминия и титана (рис. 7). Здесь предельные значения различаются, и титан показал более высокий максимум концентрации электронов $Ne = 5, 2 \cdot 10^{12}$ см⁻³, нежели алюминий $(Ne = 4, 2 \cdot 10^{12}$ см⁻³), и ковар $(Ne = 3, 5 \cdot 10^{12}$ см⁻³).



Рис. 7. Зависимость концентрации электронов от времени, с момента попадания лазерного импульса на мишени из ковара, алюминия и титана

При рассмотрении временных характеристик лазерная плазма полученная на титане достигла максимума концентрации быстрее, чем плазма, инициируемая на других мишенях. Так, максимум концентрации электронов у титана был достигнут уже через 60 нс после попадания лазерного импульса на мишень. У алюминия это время составило 80 нс, а у ковара 100 нс.

Таким образом, при рассмотрении зависимости концентрации электронов от времени, с момента попадания лазерного импульса на мишень, титан показал как более высокий максимум концентрации электронов, так и более быстрое его достижение.

Выводы

1. В результате проведения зондовых исследований лазерной плазмы, инициируемой на мишенях из ковара, алюминия и титана лазерным излучением наносекундного диапазона длительности в вакууме, были получены осциллограммы сигналов с зонда при различных потенциалах зонда. На основании анализа экспериментальных результатов показано, что появление первого пика на осциллограммах связано с приходом на зонд группы электронов, вызванных многофотонным фотоэффектом при взаимодействии лазерного импульса с мишенью. Второй пик вызван приходом на зонд основной группы частиц (лазерной плазмы), полученной в результате плавления и испарения материала мишени.

2. Полученные вольтамперные характеристики сигнала с зонда в различные моменты времени после попадания лазерного импульса на мишени из ковара, алюминия и титана выявили расхождение вида электронной и ионной частей вольтамперных характеристик склассическими. Наблюдался сильный рост ионного тока при уменьшении потенциала зонда (в классическом случае его значение практически не изменяется).

3. Было получено значение температуры электронов, которая составила $T_g = 1,5 \pm 1$ эВ и, в пределах погрешности эксперимента, не зависела ни от времени, пройденного с момента попадания лазерного импульса на мишень, ни от материала мишени.

4. Анализ зависимостей концентрации электронов от времени, пройденного с момента попадания лазерного импульса на мишень, показал тенденцию увеличения максимальных значений концентраций электронов при замене материала мишени сковараи алюминия на титан. Время, необходимое для достижения максимума, в случае, когда материалом мишени является титан, составляет 60 нс, что на 20 нс меньше, чем у алюминия и на 40 нс меньше, чем у ковара.

Литература

1. Месяц Г. А. Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. – М.: Наука, 2000. 424 с.

2. Сливков И. Н. Процессы при высоком напряжении в вакууме. – М.: Энергоатомиздат, 1986. 256 с.

3. Воробьев В.С. //УФН.1993. Т. 163. № 12. С .51.

4. Chang C. T., Hashmi M. and Pant H. C. // Study of a laser-produced plasma by langmuir probes. – Plasma Physics. Vol. 19. P. 1129–1138. Prrgamon Press. 197: Printed in Northern Ireland.

5. Годжаев Н. М. // Оптика. – Москва, «Высшая школа», 1977. С.345.

6. Ландсберг Г. С. //Оптика. – ФИЗМАТЛИТ, 2003. С. 576–593.

7. Barnett C. F., Reynolds H. K. // Phys. Rev., 109, 355 (1958).

8. Berry H. W. // Phys. Rev., 74, 848 (1948).

9. Dogar A H., Ilyas B., Ullah S., Nadeem A., Qayyum A. // Langmuir Probe Measurements of Nd-YAG Laser-Produced Copper Plasmas – IEEE transactions on plasma science. Vol. 39, No 3, March 2011. P. 897–900.

10. Kumari S., Kushwaha A., Khare A. // Spatial distribution of electron temperature and ion density in laser induced ruby $(Al_2O_3:Cr^{3+})$ plasma using Langmuir probe. – 15th International conference on laser aided plasma diagnostics, October 13–19, 2011, Jeju, Korea.

11. Margarone D., Mascali D., Torrisi L., Miracoli R., Gambino N., Gammino S., Ciavola G., Celona L., Maimone F. // Langmuir probe diagnostics of plasma produced by laser ablation. – 35th EPS Conference on Plasma Phys. Hersonissos, 9–13 June 2008. ECA Vol. 32D, P 2.142.

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИИЯ НИЗКОЧАСТОТНОГО ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ

<u>Т. С. Кандрунина,</u> А. В. Голубев, И. А. Синельникова, Н. С. Девяткова

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

Введение

В настоящее время широко применяется метод магнитотерапии для лечения нозологий различного характера, при котором производится локальное или общее воздействие низкочастотным импульсным магнитным полем (НИМП) на организм человека. При этом открытым оставался вопрос, как магнитное поле влияет на головной мозг человека, на его психофизиологическое состояние, если воздействию подвергается весь организм в целом, возникают ли при этом какие-либо функциональные изменения в биоэлектрической активности головного мозга и какого они характера.

В процессе профессиональной деятельности человека, особенно связанной с высокой ответственностью за конечный результат и с возможностью опасных последствий неправильно принятых решений, необходимо контролировать его психофизиологическое состояние. Также актуальным является и разработка способов восстановления работоспособности человека. Состояние психофизиологического напряжения, проявляющееся как чувство утомления и усталости, влечет за собой ухудшение концентрации внимания, снижения скорости зрительной и слуховой реакций и, как следствие, уменьшение работоспособности. Такое состояние сопровождается определенным характером биоэлектрической активности головного мозга, которую можно зарегистрировать методом электроэнцефалографии.

Цель работы – исследование влияния низкоинтенсивного импульсного магнитного поля на биоэлектрическую активность головного мозга, определение информативности метода электроэнцефалографии для комплексной оценки психофизиологического состояния, а также определение возможности использования НИМП как средства нормализации психофизиологического состояния человека и восстановления его работоспособности.

Методика проведения исследования

В исследовании принимали участие 15 добровольцев (8 женского и 7 мужского пола) в возрасте 34-68 лет (далее – испытуемые).

Для воздействия было использовано вихревое НИМП, формируемое магнитогенератором «Бутон» [1] (прототип – магнитогенератор УМТ-3Ф, одобренный к применению в терапии Министерством Здравоохранения РФ) с максимальным значением модуля магнитной индукции в центре рабочей зоне 1,4 мТл, формой сигнала – затухающая синусоида, частотой ~100 Гц, частотой повторения сигнала $1,0 \pm 0,1$ Гц.

Каждый сеанс состоял из троекратного (по 10 мин. каждый) воздействия НИМП (1,4 мТл–1,2 мТл–1,4 мТл), разделенного двумя пятиминутными паузами.

Оценку психофизиологического состояния человека проводили до и после воздействия НИМП по результатам анализа зарегистрированной методом электроэнцефалографии (ЭЭГ) биоэлектрической активности головного мозга. Помимо метода ЭЭГ также для оценки психофизиологического состояния были применены методы анализа наиболее информативных показателей вариабельности ритма сердца (BPC), психологического тестирования, магнитоэнцефалографии и тонометрии.

Для регистрации ЭЭГ использовали 40-канальный электрографический аппаратно-программный комплекс «NEOCORTEX 2.1» [2]. Электроды были расположены в соответствие с международной системой «10–20» в 12 зонах (F3, F4, FCz, Cz, C3, C4, CPz, CP3, CP4, Pz, P3, P4) при монополярном монтаже.

Электроэнцефалограмму регистрировали в состоянии спокойного бодрствования с проведением пробы «глаза закрыты – глаза открыты» по 2 минуты для каждого положения.

Для расчета и оценки параметров ЭЭГ использовали эпохи энцефалограммы длительностью 4 с или 8 с. Характер активности головного мозга определяли по следующим параметрам: общая закономерность временного представления электрической активности ЭЭГ, ее амплитудно-частотные характеристики, индексы (%) компонент ЭЭГ во всех исследуемых частотных диапазонах по каждому отведению, характер межполушарной асимметрии.

Спектральный анализ ЭЭГ проводили с применением алгоритм быстрого преобразования Фурье (использовали окна Хэмминга), рассчитывали суммарную амплитуду (мкВ) ЭЭГ в стандартных частотных диапазонах. Также рассчитывали индексы (%) всех исследуемых частотных диапазонов по каждому каналу, отражающие выраженность активности в амплитудном спектре. В связи с невозможностью полного исключения артефактов в низкочастотном диапазоне спектра анализ δ-диапазона (0,5–3 Гц) не проводили. Коэффициент межполушарной асимметрии для каждого частотного диапазона между одноименными отведениями (СЗ-С4, СРЗ-СР4, РЗ-Р4) вычислялся по следующей формуле:

Кмпа = $|(\Pi - \Pi)/(\Pi + \Pi)| * 100 \%$,

где П – значение амплитуды определенной частоты составляющей ЭЭГ в правом полушарии, а Л – в левом полушарии.

Статистический анализ результатов проводили с помощью непараметрического критерия Вилкоксона для парных сравнений, критерий Стьюдента, статистически значимое отличие при р < 0,05.

Результаты и их обсуждение

По характеру активности головного мозга все зарегистрированные ЭЭГ были классифицированы согласно Жирмунской Е.А. [3]. По анализу соотношения энергии основных ритмов головного мозга все добровольцы были разделены на 2 группы:

– 1-я – с признаками устойчивости общего функционального состояния мозга – с регулярным веретенообразным α-ритмом с максимальной амплитудой в теменных и затылочных отделах, модулированным в веретена длительностью от 1 до 4 секунд, сменяющимся участками β-активности, характеризующийся постоянством и стабильностью рисунка электроэнцефалограммы;

 2-я – с признаками неустойчивости общего функционального состояния мозга – со слабовыраженной α-активностью, сменяющихся участками десинхронизации и частыми переходами от одного доминирующего ритма к другому. Подобный рисунок ЭЭГ можно объяснить эмоциональным или интеллектуальным напряжением добровольцев, что соответствует состоянию психофизиологического напряжения организма и сниженной работоспособности [4].

Оценка качественных изменений распределения активности головного мозга показала, что после воздействия НИМП:

 для большинства добровольцев отмечено общее перераспределение спектральной мощности между диапазонами;

 – у всех испытуемых обнаружилось уменьшение вклада в суммарную мощность низкочастотных δи θ-волн;

у 5 из 15 – повышение высокочастотной β-2 и γ-активности;

 у 8 из 15 – отмечали повышение более чем на 10 % мощности α-ритма и его регулярности.

Анализ пространственно-временных и амплитудно-частотных индивидуальных характеристик ЭЭГ и статистическая оценка изменений электроэнцефалограмм по группам с различной функциональной активностью головного мозга после воздействия НИМП, рис. 1 и рис. 2, позволили выявить следующие изменения. Было отмечено, что у испытуемых группы 1 доминирующим остается α-ритм, модулированный в веретена, наиболее выраженный в теменных и затылочных отделах, при этом модуляции по амплитуде более выражены (на стыках веретен α-ритма нет) (рис. 1,в). На ЭЭГ испытуемых группы 2 происходит частая смена доминирующих ритмов. но при этом появляются участки хорошо модулированного α-ритма, особенно в затылочных и теменных областях коры (рис. 1,г).



Рис. 1. Пример ЭЭГ добровольцев группы 1 и группы 2: а – группа 1 до воздействия НИМП, в – группа 1 после воздействия НИМП, б – группа 2 до воздействия НИМП, г – группа 2 после воздействия НИМП

Также после НИМП у добровольцев группы 1 не произошло статистически значимых изменений значений амплитуд основных ритмов ЭЭГ (рис. 2а), однако во 2 группе – отмечено общее уменьшение амплитуды сигнала (снижение уровня активации) (рис. 2,6).



Рис. 2. Распределение средних значений амплитуд основных ритмов ЭЭГ добровольцев до и после воздействия НИМП: а – группа 1, б – группа 2

Анализ индексов (%) компонент ЭЭГ во всех исследуемых частотных диапазонах по каждому отведению также не показал значимых изменений.

После НИМП у добровольцев группы 1 произошло сглаживание реакции ЭЭГ на пробу «глаза закрыты – глаза открыты»: отмечено неполное подавление α-ритма и быстрое его восстановление (1–3 с). У добровольцев группы 2 сниженная реакция отмечена как до, так и после воздействия НИМП: неполная депрессия α-ритма, сопровождающаяся усилением θ-ритма в теменных и затылочных отделах.

Оценка коэффициентов межполушарной асимметрии К_{МПА} показала, что у всех добровольцев статистически значимой межполушарной асимметрии биоэлектрической активности как до, так и после воздействия НИМП не наблюдалось. Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что воздействие НИМП по предложенной схеме с максимальном значением магнитной индукции в центре рабочей зоны 1,4 мТл и 1,2 мТл, формируемое магнитогенератором «Бутон», не оказывает отрицательного действия на функциональное активность головного мозга. А в случае наличия признаков психофизиологического напряжения оказывает некоторое восстанавливающее действие, что в дальнейшем может быть использовано в комплексных мероприятиях по восстановлению работоспособности человека.

Методы оценки наиболее информативных показателей ВРС, психологического тестирования, магнитоэнцефалографии и тонометрии также показали тенденцию к нормализации психофизиологического состояния [5].

Использование в комплексной диагностике психофизиологического состояния человека наряду с вышеперечисленными методами метода ЭЭГ позволяет получить наиболее объективную и всестороннюю оценку характера его изменений, в том числе и в процессе восстановления работоспособности с использованием низкочастотного импульсного магнитного поля.

Литература

1. Пат. 2290970 РФ, МПК6 А 61N 2/02. Устройство для воздействия магнитным полем на биообъект / Лобкаева Е. П., Кудряшов Л. В., Комиссаров В. И., Девяткова Н. С., Шевцов И. Д. // Изобретения. 2007. № 1.

2. NEOCORTEX 2.1. Руководство пользователя. М.:, NEUROROBOTICS, 2005.

 Жирмунская Е. А., Лосев В. С. Системы описания и классификация электроэнцефалограмм человека. – М.: Наука, 1984.

4. Поворинский А. Г., Заболотных В.А. Пособие по клинической электроэнцефалографии. – М.: Медицина, 2000.

5. Кандрунина Т. С., Гетманец И. А., Колесникова Н. С., Голубев А. В. Исследование влияния низкочастотного импульсного магнитного поля на психофизиологическое состояние человека // Тезисы докладов V Международной конференции «Человек и электромагнитные поля». Саров, 23–27 мая 2016г. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2016. С. 72.

БЫСТРАЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ САХАРОВ В ПЧЕЛИНОМ МЕДЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НАНОСЕКУНДНЫХ МИКРОРАЗРЯДОВ

А. Е. Дубинов, <u>Ю. П. Кожаева</u>, И. Л. Львов, С. А. Садовой, В. Д. Селемир, Д. В. Вялых

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

В данной работе изучались наносекундные электрические микроразряды в жидком пчелином меде. Воздействию подвергался натуральный пчелиный мед российской фирмы Medovaya Dolina LLC, находящийся в жидком состоянии. Мед представляет собой сильно перенасыщенный раствор природных сахаров в воде. В результате воздействия микроразрядами на мед, в нем были обнаружены усы кристаллов сахаров. Изучалась динамика рождения и роста кристаллов сахаров.

Введение

Импульсные электрические разряды в жидкостях исследуются уже много лет. В этой области накоплен обширный фактический материал, написано много диссертаций, обзоров [1–3] и книг [4, 5]. Развито множество технологий, которые используют разряды в жидкостях, например, очистка [6] и стерилизация жидкостей [7], изменение их окраски [8], разрушение живых тканей в медицине [9] и др. Разряды изучались как в слабовязких жидкостях, таких как вода [10, 11], сжиженные инертные газы [12], так и сильновязких жидкостях, таких как масло [13], глицерин¹⁴. Разрядные промежутки могли иметь размеры от нескольких микронов [15, 16] или нескольких миллиметров [17] до метра [13].

В данной работе впервые изучались наносекундные электрические микроразряды в жидком пчелином меде. Пчелиный мед представляет собой сильновязкую жидкость желто-коричневого цвета. Физические свойства меда зависят от места его сбора и условий хранения. Согласно статьям [18–21] жидкий мед может иметь следующие физические свойства: влагосодержание – 20–25 %, pH – 3,1–4,5, электропроводность – 0,1–1,1 mS/см. Вязкость меда сильно зависит от температуры, она согласно статье [19] может принимать значение из диапазона 10–30 Па-с при комнатной температуре.

И самое главное: мед представляет собой сильно перенасыщенный раствор природных сахаров в воде. Жидкое состояние перенасыщенного раствора, как известно, неустойчиво. Малое физическое возмущение должно приводить к его кристаллизации. Целью данной работы является экспериментальная проверка предположения о том, что наносекундные электрические микроразряды в объеме жидкого меда могут являться такими возмущениями, вызывающими быструю кристаллизацию сахаров. Авторам неизвестны другие работы, в которых исследовались бы электрические разряды в перенасышенных растворах. Известна лишь статья [22], в которой изучалась кавитация в перенасыщенных водных растворах $(NH_4)_2SO_4$ и KMnO₄ под действием микросекундного лазера. В этой работе наблюдалось образование зародышей кристаллов. Укажем, что лазерная кавитация жидкости и электрический пробой жидкости – процессы физические похожие [4]: в обоих случаях в жидкости возникает паровая газо-плазменная полость, которая затем схлопывается. Но поскольку электропроводность меда весьма мала по сравнению с электропроводностью перенасыщенных водных растворов солей, то выбор меда в нашей работе в качестве модельной жидкости для кристаллизации, в отличие от работы [22], оправдан тем, что осуществить электрический разряд в каком-либо проводящем водном растворе солей было бы затруднительно.

Оборудование и материалы

Для экспериментов использовался натуральный пчелиный мед российской фирмы Medovaya Dolina LLC [23], находящийся в жидком состоянии. Время сбора – май 2014. Основные медоносы: ива (Sálix), черноклен (Ácer tatáricum), мать-и-мачеха (Tussilágo), одуванчик (Taráxacum), белая и желтая акация (Acacia), эспарцет (Onobrýchis). Отметим, что при спокойном хранении (без возмущений) этот мед в течение 1 года оставался в жидком состоянии без заметного засахаривания.

Для эксперимента была изготовлена простая разрядная ячейка, подобная описанным в статьях [24–26]. Она изготавливалась следующим образом. Бралось стандартное предметное стекло для микроскопов, имеющее размеры 1" × 3" и толщину 1 мм. Сначала к предметному стеклу с помощью двухсторонней липкой ленты приклеиваются два покровных стекла размерами 0,94" × 0,94" и толщиной 0.15 мм. К ним, также с помощью двухсторонней липкой ленты, крепятся два электрода, которые с хорошей точностью можно предварительно вырезаны обычными бытовыми ножницами из алюминиевой фольги толщиной 10–15 мкм. Форма электродов – клин. Таким образом. Острия электродов отстоят от поверхности предметного стекла на толщину 0,15 мм.

После установки электродов в межэлектродный промежуток вносится капля меда диаметром 1–2 мм так, чтобы острия электродов находились внутри капли на глубину 0.15 мм. Схема разрядной ячейки показана на рис. 1.



Рис. 1. Схема разрядной ячейки: 1 – предметное стекло;
 2 – покровное стекло;
 3 – двухсторонняя липкая лента;
 4 – капля меда;
 5 – фольговый электрод

Для детальной визуализации канала микроразрядов использовался оптический микроскоп Levenhuk D50L NG, оснащенный цифровой видеокамерой DEM200. Наибольшее увеличение оптической системы микроскопа составляет 640×, а с дополнительной линзой Барлоу – 1280×. Получаемые изображения имеют высокое разрешение (1600 × 1200 пикселей). Наблюдение за процессами внутри капли проводилось методом висячей капли [27]. Для этого приготовленная разрядная ячейка размещалась на предметном столике микроскопа так, чтобы капля была обращена книзу. Процесс кристаллизации записывался в режиме видео с частотой 7 кадров в секунду.

К электродам подключается генератор импульсного напряжения. В качестве генератора использовалась бытовая электрозажигалка Iskorka-6 трансформаторного типа, которая выдает последовательность наносекундных импульсов высокого напряжения. Импульсы следуют с частотой 20 Гц. При подключении к выходу генератора нагрузки в виде искрового промежутка, в цепи возникают импульсы тока разряда. Типичная осциллограмма импульса тока в цепи разряда на искровой промежуток показана на рис. 2.



Рис. 2. Типичная осциллограмма импульса тока разряда

Из этой осциллограммы ясно, что в течение одного импульса полярность электродов и направление тока меняются с периодом примерно 40 нс – собственным периодом колебательного контура выходной цепи генератора с нагрузкой.

Результаты экспериментов

Эксперименты проводились в воздухе атмосферного давления при температуре 21 °C. Было сделано несколько видеозаписей процесса взаимодействия электрических наносекундных микроразрядов с медом длительностью примерно 1 минута. На рис. 3 показаны некоторые кадры одной из видеозаписей, когда межэлектродный промежуток был ~180 мкм.



Рис. 3. Кадры видеосъемки процесса кристаллизации сахаров в меде, везде отрезок в левом нижнем углу – 100 мкм: а – 3.1 с, видно рождение кристаллических усов у острия левого электрода, большой шарик слева – воздушный пузырек диаметром ~50 мкм (горизонтальная стрелка), у левого электрода темный шарик диаметром ~50 мкм – частица пыльцы растения-медоноса (вертикальная стрелка); б – 6,1 с, рост кристаллических усов; в – 17,0 с, дальнейший рост кристаллических усов; г – 32,5 с, замыкание межэлектродного промежутка кристаллическим каналом; д – 34,1 с, рост усов на стенках кристаллического канала; е – 42,0 с, дальнейший рост усов на стенках кристаллического канала; ж – 45,6 с, дальнейший рост усов на стенках кристаллического канала; з – 50,2 с, конечное состояние кристаллического канала

Согласно им, динамика процесса взаимодействия такова.

Сначала, спустя после включения генератора со стороны одного из электродов (в нашем случае он слева) появляются усы кристаллов сахаров, растворенных в меде. Они растут и к моменту ~30 с заполняют весь межэлектродный промежуток, формируя твердый канал. В дальнейшем длина усов растет, растет и толщина стенки канала.

Интересно проследить за движением воздушного пузырька и частицы пыльцы, случайно оказавшихся вблизи межэлектродного промежутка. Воздушный пузырек притягивается к одному из электродов и залипает на нем. Частица пыльцы прилипает к растущим усам кристаллов и движется вместе с фронтом роста кристаллов.

Выводы

Таким образом, в данной работе впервые осуществлены электрические разряды в меде – в перенасыщенном растворе сахаров и показано, что периодическая последовательность наносекундных микроразрядов вызывает быструю кристаллизацию сахаров.

Литература

1. Akiyama H. *IEEE Transactions on Dielectrics* and *Electrical Insulation*, 2000, **7**, 646–653.

2. Sato M. Plasma Sources Science and Technology, 2008, **17**, 024021.

3. Bruggeman P. and Leys C. *Journal of Physics* D: Applied Physics, 2009, 42, 053001.

4. Ushakov V. Y., Klimkin V. F., Korobeynikov S. M. *Impulse Breakdown of Liquids*, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 2007.

5. Yang Y., Cho Y. I., Fridman A. *Plasma Discharge in Liquid. Water Treatment and Applications*, CRC Press Taylor & Francis Group, New York, 2012.

6. Zhang J., Chen J., Li X. *Journal of Water Resource and Protection*, 2009, **2**, 99–109.

7. Gupta S. B., Bluhm H. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2008, **36**, 1621–1632.

8. Sugiarto T., Ito S., Ohshima T., Sato M., Skalny J. D. *Journal of Electrostatics*, 2003, **58**, 135–145. 9. Šunka P., Babický V., Člupek M., Beneš J., Poučková P. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2004, **32**, 1609–1613.

10. Šunka P. Physics of Plasmas, 2001, 8, 2587–2594.

11. Hosseini S. H. R., Iwasaki S., Sakugawa T., Akiyama H., *Journal of the Korean Physical Society*, 2011, **59**, 3526–3530.

12. Jones H. M., Kunhardt E. E. Journal of Physics D: Applied Physics, 1995, 28, 178–188..

13. Lesaint O., Massala G. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1998, **5**, 360–370.

14. Saksono N., Ariawan B., Bismo S. International Journal of Technology, 2012, 1, 8–15.

15. Ihara T., Kiyan T., Katsuki S., Furusato T., Hara M., Akiyama H. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2011, **39**, 2650–2651.

16. Schoenbach K., Kolb J., Xiao S., Katsuki S., Minamitani Y., Joshi R. *Plasma Sources Science and Technology*, 2008, **17**, 024010.

17. Ito T., Terashima K. Applied Physics Letters, 2002, 80, 2854–2856.

18. Szczęsna T., Rybak-Chmielewska H. Journal of Apicultural Science, 2004, **48**, 97–102.

19. Kayacier A., Karaman S., *Journal of Texture Studies*, 2008, **39**, 17–27.

20. Saxena S., Gautam S., Sharma A. Food Chemistry. 2010, **118**, 391–397.

21. A-Rahaman N. L., Chua L. S., Sarmidi M. R., Aziz R. Agricultural Sciences, 2014, 4, 46–51.

22. Soare, R. Dijkink, M. R. Pascual, C. Sun, P. W. Cains, D. Lohse, A. I. Stankiewicz, and H. J. M. Kramer,

Crystal Growth and Design, 2011, **11**, 2311–2316.

23. Medovaya Dolina LLC, http://www.medova-yadolina.com/.

24. Dubinov E., Kozhayeva J. P. *IEEE Transac*tions on Plasma Science, 2014, **42**, 2049–2053.

25. Shatalova V. V., Dubinov A. E. *IEEE Transac*tions on Plasma Science, 2014, **42**, 2644–2645.

26. Kozhayeva J. P., Lyubimtseva V. A., Zuimatch E. A., Dubinov A. E. *Plasma Processes and Polymers*,

2015, **12**, 293–296.

27. Tsekova D. S. Bulgarian Chemical Communications, 2012, 44, 267–271.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ВОДЫ С ПОМОЩЬЮ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРА РИ-03/3 В КВЧ ДИАПАЗОНЕ

<u>Г. А. Козлов</u>

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

На данный момент измерение комплексной диэлектрической проницаемости веществ в КВЧ диапазоне является важной научно-исследовательской задачей. Существует целый ряд различных методов измерений – резонансный, волноводный, оптический и др. Среди которых очевидным преимуществом обладает оптический метод, так как он позволяет без контакта с исследуемым образцом и в отсутствие априорной информации о составе объекта, определять его диэлектрические параметры.

Имеется множество способов реализаций оптического метода, один из которых - это применение теории классической эллипсометрии. Эллипсометрия [1] очень хорошо зарекомендовала себя в оптическом диапазоне длин волн и позволяет с высокой точностью определять диэлектрические параметры различных сред. Научный интерес представляет применение данной теории в КВЧ диапазоне. В данном диапазоне метод эллипсометрии можно реализовать с помощью радиоинтерферометра РИ-03/3, который через передающий волновод облучает исследуемый объект электромагнитным колебанием известной формы и частоты. Отраженное электромагнитное колебание поступает на два приемных волновода, соединенных с приемными каналами радиоинтерферометра.

В теории эллипсометрии утверждается, что линейно-поляризованная волна после отражения от границы раздела двух сред становится эллиптическиполяризованной. Состояние поляризации отраженной волны можно разложить на две составляющие s (осциллирующая перпендикулярно плоскости падения) и р (осцилляция волны параллельна плоскости падения). Используя два приемных канала радиоинтерферометра можно измерить отношение комплексных амплитуд отраженных волн на р и s поляризациях.

Однако экспериментально, при эллипсометрических измерениях, определяют не сами коэффициенты отражения, а их отношения:

$$\mathbf{P} = \mathbf{t}\mathbf{g}\boldsymbol{\psi} = \frac{\rho_{\perp}}{\rho_{\square}}, \quad \Delta = \boldsymbol{\varphi}_{\square} - \boldsymbol{\varphi}_{\perp}, \tag{1}$$

где показывает отношение амплитуд коэффициентов отражения для p- и s- волн, а параметр Δ pавен разности между фазовыми скачками этих волн при отражении. Также необходимо учитывать угол ϑ_i , под которым зондируется поверхность исследуемого вещества. Угловые параметры ψ , $\Delta u \vartheta_i$ называют эллипсометрическими параметрами. Применяя основные законы электродинамики: уравнения Максвелла, формулы Френеля и закон Снеллиуса можно связать данные параметры с комплексным коэффициентом преломления следующим выражением:

$$n = -\frac{\sin \theta_{i} tg \theta_{i} \cos 2\psi}{1 + \sin 2\psi \cos \Delta} \quad \kappa \cong tg 2\psi \sin \Delta$$
(2)

который, в свою очередь, связан с КДП выражением:

$$\hat{\varepsilon} = \hat{n}^2 = \left[n \left(1 + i\kappa \right) \right]^2.$$
(3)

Описание экспериментальной установки

Для реализации данных измерений был собран экспериментальный стенд, общий вид которого приведен на рис. 1.



Рис. 1. Общий вид экспериментального стенда

Схема его приведена на рис. 2.Стенд представляет собой металлический каркас I, с боковыми стенками 2. Между боковыми стенками каркаса была закреплена деревянная подложка 3 с антеннами 4. Преимущество такого каркаса в том, что он позволяет нам задавать определенные углы падения, с точностью 1°. В качестве исследуемого образца была выбрана пресная вода 5, которая наливалась в металлический аквариум 6. Угол падения задавался равным $9_i = 45^\circ$. Чтобы точно располагать уровень воды в точке пересечения лучей, металлический аквариум был поставлен на лабораторный домкрат 7.



Рис. 2. Принципиальная схема экспериментального стенда: 1 - металлический каркас, 2 - боковые стенки каркаса, 3 - деревянная подложка, 4 - антенны, 5 - пресная вода, 6 - металлический аквариум, 7 - домкрат

На рис. З показано крепление антенн радиоинтерферометра.



Вода была налита до уровня 10 мм относительно лна аквариума. тогла как скин-слой [2] для воды в 3 мм диапазоне:

$$\delta = \frac{\lambda_0}{4\pi nk} = 0,01 \text{ mm}$$

поэтому отражение будет происходить от верхней поверхности слоя воды, а граница вода-металл никак не будет влиять на комплексную амплитуду отраженной волны.

В эксперименте антенны, возбуждаемые прямоугольным диэлектрическим волноводом, представляют собой конический диэлектрический рупор. Изза технических особенностей изготовления этих антенн, излучаемые (принимаемые) ими поля эллиптически поляризованы. Для проведения поляризационных измерений необходимо, чтобы передающая



Рис. 3. Крепление антенн радиоинтерферометра: а – передающая антенна, б – приемные антенны

Для максимального приближения фронта падающей волны к плоскости в непосредственной близости от отражающей поверхности следует выбрать расстояние от антенн радиоинтерферометра до отражающей поверхности максимально возможным, поэтому расстояние от антенн до места отражения волн L = 423 мм подобрано таким образом, чтобы проводить эксперимент в дальней зоне антенны. Размер апертуры антенны d = 16 мм, длина э/м волны $\lambda = 3,2$ мм, дальняя зона:

и приемные антенны имели линейную поляризацию.



Рис. 4. Общий вид поляризаторов: а – для приемных антенн, б – для передающей антенн

 $r \ge \frac{2d^2}{\lambda} = 160$ MM.



В нашем случае приемные антенны должны иметь поляризации, ортогональные друг к другу, рис. 4, одна – перпендикулярна плоскости падения. Также линейную поляризацию должна иметь передающая антенна. Причем, если азимутальный угол падающей волны равен $\alpha_i = 45^\circ$, то отношение амплитуд р- и s- волн для передающей антенны $\frac{A_{\Box}}{A_{\perp}} = tg\alpha_i = 1$ и соответственно величина $P = \frac{P_{\perp}}{P_{\Box}} = \frac{R_{\perp}A_{\Box}}{A_{\perp}R_{\Box}} = \frac{R_{\perp}}{R_{\Box}}$ зависит только от отношения

принятых амплитуд.

Методика проведения эксперимента

Исходя из выражения (2), для вычисления комплексной диэлектрической проницаемости воды, помимо угла падения $\vartheta_i = 45^\circ$, нужно определить разность фаз $\Delta = \varphi_{\Box} - \varphi_{\bot}$ между двумя принятыми сигналами. Также, чтобы найти величину ψ нужно знать отношение принятых амплитуд $\psi = \arctan \frac{R_{\bot}}{R_{\Box}}$.

Из-за конструктивных особенностей радиоинтерферометра и волноводов, соединяющих антенны измерительной установки с приемным и передающим устройствами, возникает неопределенность в определении амплитуды и фазы сигнала. Поэтому была проведена калибровка амплитуды и фазы сигнала (индекс k) по эталонной отражающей поверхности, в качестве которой был выбран медный лист.

Коэффициенты отражения от металла:

– при параллельной поляризации $\hat{k} = 1$,

– при перпендикулярной $\hat{k} = -1$.

Соответственно, если измерить амплитуды $R_{\perp}^{k}, R_{\square}^{k}$ и фазы $\phi_{\perp}^{k}, \phi_{\square}^{k}$ принятых колебаний и учесть тот факт, что при отражении от металла между двумя приемными ортогональными каналами происходит сдвиг фаз на π радиан, то реальное значение Δ и ψ для воды будет равным:

$$\Delta = \varphi_{\Box} - \varphi_{\bot} - \left(\varphi_{\Box}^{k} - \varphi_{\bot}^{k} - \pi\right), \tag{4}$$

$$\Psi = \arctan \frac{R_{\perp} R_{\square}^k}{R_{\square} R_{\parallel}^k}.$$
 (5)

В ходе эксперимента было обнаружено, что выбранный нами в качестве эталона медный лист отлично держится на поверхности воды, рис. 5.

Этот факт существенно упростил методику наших измерений и помимо этого увеличил ее точность, так как разность принятых фаз существенно зависит от углового расположения плоскости отражающей поверхности относительно фронта волны.



Рис. 5. Медный лист на поверхности воды

Поэтому эксперимент проводился в три этапа: 1) запись принятых интерферограмм при отра-

жении э/м волны от поверхности воды;

2) установка медного листа на поверхность воды;

3) запись принятых интерферограмм при отражении э/м волны от поверхности медного листа.

Как видим, записи интерферограмм при отражении от воды и медного листа проводится независимо. Так как собственные шумы радиоинтерферометра РИ-03/3 имеют относительно высокий уровень, в интерферограммах присутствуют значительные флюктуации фазы сигнала, поэтому для их компенсации путем статистического усреднения результатов проводились серии по 30 измерений.

В результате обработки интерферограмм получено следующее значение эллипсометрических параметров $\Delta = 3,02$ и $\psi = 1,028$.

Применяя выражение (2), получаем значение комплексной диэлектрической проницаемости:

$$\hat{\varepsilon} = 7 - 3, 3i.$$

Теоретическое значение ĉ, данное в работе [2]:

$$\hat{\varepsilon} = 8, 8 - 13, 4i.$$

Решая систему обратных уравнений, находим, что это значение соответствует значению $\Delta = 2,97$ и $\psi = 0,9386$. Отсюда видим, что принятый нами метод калибровки фазы обеспечивает отличную точность. Абсолютная погрешность $\Delta = 0,05$ радиан. Основное расхождение практического значения $\hat{\varepsilon}$ с теоретическим дает величина ψ .

В общем случае она определяется выражением:

Так как задача расположения приемных поляризаторов ортогонально друг к другу значительно проще, чем установка оси поляризации передающей антенны под азимутальным углом $\alpha_i = 45^\circ$, основное расхождение в величине ψ , исходя из формулы (6), дает отношение A_{\Box}/A_{\perp} , которое не равно 1, т. е. азимутальный угол падения $\alpha_i \neq 45^\circ$. Тогда реальное значение компонент $A_{\Box} u A_{\bot}$ равны $A_{\Box}^{real} = A_{\Box} + \Delta A$ и $A_{\bot}^{real} = A_{\bot} - \Delta A$. Решая систему уравнений:

$$\begin{cases} \Psi^{teor} = \arctan \frac{R_{\perp} R_{\square}^k A_{\square}}{R_{\square} R_{\perp}^k A_{\perp}} \\ \\ \Psi^{\text{prakt}} = \arctan \frac{R_{\perp} R_{\square}^k (A_{\square} + \Delta A)}{R_{\square} R_{\perp}^k (A_{\perp} - \Delta A)}, \end{cases}$$
(7)

находим что $\Delta A = 0,1A$. Это соответствует ошибке $\Delta \alpha_i = 5,6^\circ$, что вполне реально, так как размеры поляризатора малы, и задать азимутальный угол α_i точно равным 45°, представляет значительную сложность.

Абсолютная погрешность измерений:

$$\Delta \varepsilon^{real} = \frac{\partial \varepsilon^{real}}{\partial \psi} \Delta \psi = 32$$
$$\Delta \varepsilon^{im} = \frac{\partial \varepsilon^{im}}{\partial \psi} \Delta \psi = 17,$$

тогда как ошибка в расхождении экспериментально измеренного значения $\hat{\varepsilon}$ с теоретическим составляет $\Delta \varepsilon^{real} = 1.8$: $\Delta \varepsilon^{im} = 11.1$.

Выводы

В результате выполненного теоретического и экспериментального исследования получены оценки комплексной диэлектрической проницаемости воды, согласующие друг с другом в пределах погрешностей измерений.

Значительное расхождение в определении мнимой части связано с тем, что измерения проводились при угле, меньшем угла Брюстера. Для воды в 3 мм диапазоне он равен $\overline{9} = 71^{\circ}$. Для уменьшения погрешности измерения на порядок необходимо либо повысить точность амплитудных измерений в 10 раз, либо реализовать метод измерений при угле падения больше угла Брюстера. Применение данной методики измерений предполагается в газодинамических экспериментах в полевых условиях, где повышение качества юстировки схемы представляет значительную трудность и соответственно повышение точности измерений затруднительно. С другой стороны, наиболее интересным объектом исследований в газодинамических процессах является плазма, для которой угол Брюстера лежит в интервале от до 45°. Таким образом, проведение экспериментов под углом несколько большем, чем 45° может обеспечить повышение точности измерений.

Литература

1. Электромагнитная теория распространения, интерференции и дифракции света MaxBorn & Emil Wolf / под ред. Г. П. Мотулевич. – М., 1973.

2. Красюк Н. П., Розенберг В. И. Корабельная радиолокация и метеорология. 1970, 325 с.

ФЕМТОСЕКУНДНЫЙ КАНАЛ УСТАНОВКИ «ЛУЧ» ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ОБЛУЧЕНИЮ МИШЕНЕЙ ПРИ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ~10²⁰ Вт/см²

<u>Р. Ю. Костюнин</u>, А. В. Борщевский, Р. В. Жуков, Д. С. Корниенко, Е. А. Салатов

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

Разработана и успешно реализована новая схема накачки параметрического усилителя ПАУ-3 с применением дискового усилительного каскада установки «Луч», что позволило повысить энергию импульса накачки с 40 до 65 Дж во второй гармонике неодимового лазера. Разработана и технически реализована схема точной временной синхронизации импульса накачки и чирп-импульса в параметрическом усилителе ПАУ-3.

Приведены основные результаты экспериментальных и расчетно-теоретических исследований по усилению чирпированного лазерного импульса в параметрическом усилителе ПАУ-3 в опытах по облучению мишеней. На выходе параметрического усилителя ПАУ-3 за счет увеличения энергии излучения накачки повышена энергия излучения чирпимпульса с 3 до 9 Дж. При этом энергия лазерного импульса на мишени после компрессии составила 5 Дж при длительности 50 фс и диаметре пятна фокусировки 8 мкм, что соответствует интенсивности 2×10^{20} Вт/см².

В результате проведенных исследований по облучению плоских металлических мишеней получены пучки электронов с энергией до 0,5 МэВ, протонов с энергией до 10 МэВ и жесткого рентгеновского излучения с энергией квантов свыше 1 МэВ.

Введение

В последние годы наблюдается стремительный прогресс в разработке и создании лазерных систем с импульсами фемтосекундной длительности. В ведущих лазерных лабораториях мира созданы установки субпетаваттного и петаваттного уровней мощности с длительностью лазерного импульса 30-500 фс. Появление нового инструмента привело к развитию целого ряда направлений исследований: генерация быстрых электронов и ионов, включая генерацию протонных пучков; генерация жесткого рентгеновского излучения; инициирование ядерных реакций и др. Проводятся теоретический анализ и экспериментальные исследования по определению возможности «быстрого зажигания» (fast ignition) термоядерной мишени на основе одновременного воздействия лазерного излучения наносекундной и фемтосекундной длительностей (см., напр., обзоры [1-4]).

В РФЯЦ-ВНИИЭФ действует лазерная система с фемтосекундной длительностью импульса ($\tau_{имп} \approx 50$ фс). Установка применяется для исследования генерации частиц с высокой энергией. Ранее были проведены эксперименты по облучению мишеней при интенсивности 10^{19} Вт/см² [5]. Для увеличения потока частиц и генерации жесткого рентгеновского излучения (РИ) стояла задача проведения облучательных опытов при интенсивности 10^{20} Вт/см². Выполнение этой задачи потребовало кардинальной модернизации лазерной системы, а также разработки методик и аппаратуры измерений параметров корпускулярного и электромагнитного излучений лазерной плазмы.

1. Схема установки

Фемтосекундный канал установки «Луч» построен по принципу трехкаскадного (ПАУ-1, ПАУ-2, ПАУ-3) параметрического усиления чипированного лазерного импульса в нелинейных кристаллах DKDP с накачкой импульсами неодимового лазера, преобразованными во вторую гармонику ($\lambda_{\text{нак}} = \lambda_{2\omega} = 527$ нм). Установка предназначена для проведения экспериментальных исследований по взаимодействию высокоинтенсивного (I $\geq 10^{19}$ BT/см²) лазерного излучения с веществом.

Как отмечено выше, одной из поставленных задач являлось проведение облучательных опытов при интенсивности 10²⁰ Вт/см². Достижение такой интенсивности облучения мишени возможно при усилении лазерного чирп-импульса в параметрическом усилителе ПАУ-3 до энергии 10-15 Дж. Для этого энергия излучения накачки ПАУ-3 должна составлять 60 Дж на второй гармонике или 160 Дж на первой гармонике при имеющимся кристалле преобразователе. Однако лазер накачки «Лучик» этого усилителя не обеспечивает требуемую энергию импульса накачки на первой гармонике. В этой связи представилось перспективной идея использования усилителя канала установки «Луч» [6] в качестве оконечного усилителя системы накачки силового параметрического усилителя ПАУ-3.

В среде Fresnel [7] было проведено моделирование усиления в предложенной схеме накачки каскада параметрического усиления ПАУ-3, которое показало, возможность достижения энергии излучения накачки до 200 Дж на первой гармонике.

1.1. Схема системы накачки силового параметрического усилителя ПАУ-3 от импульса излучения лазерного канала установки «Луч»

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки в части силового усилителя ПАУ-3, включающая схему инжекции чирпированного лазерного импульса с выхода частотной части предварительного параметрического усиления, систему накачки с использованием усилителя У-1 установки «Луч» [6] и сам ПАУ-3.

Импульс излучения с выхода предварительной части усиления лазера накачки «Лучик», а именно усилителя КВ-85, направляется в усилитель У-1 канала «Луча». Для этого установили оптическую схему заведения пучка, включающую расширяющий и сужающий полуторакратные телескопы для предотвращения повреждения активных элементов усилителя У-1. После преобразования во вторую гармонику в кристалле KDP импульс накачки в штатной схеме поступает на вход силового параметрического усилителя ПАУ-3.

Также в связи с изменением схемы системы накачки ПАУ-3 с включением в нее усилителя У-1 «Луча», были установлены дополнительные системы регистрации (в соответствии с рис. 1). На рис. 2,а и 2,6 представлено распределение излучения в дальней и ближней зонах, соответственно, на входе в кристалле-преобразователь в 2 ω при включении квантронов Ø = 10, 20, 60 и 85 мм разовой части. Расходимость пучка составляет $\theta_{0,8E} \approx 1,3 \times 10^4$ рад, диаметр пучка равен $\approx 7,1$ см. Анализ полученных результатов показал, что пиковая плотность энергии на входе в кристалл-преобразователь в 2 ω при $E_{1\omega} \approx 140$ Дж достигает $\varepsilon \approx 3,5$ Дж/см².



Рис. 1. Схема системы накачки ПАУ-3 с использованием усилителя установки «Луч»



Рис. 2. Распределение интенсивности излучения накачки в зонах на кристалле-2ω каскада ПАУ-3 при включении квантронов Ø 10, 20, 60 и 85 мм разовой части: а – в дальней зоне, б – в ближней зоне

Вследствие введения усилителя У-1 установки «Луч» в схему тракта накачки ПАУ-3 оптический путь следования лазерного импульса удлинился на ≈26 м, поэтому аналогично увеличили длину линии задержки чирп-импульса, а также реализовали систему точной временной синхронизации прихода импульса накачки и чирп-импульса на силовой параметрический усилитель ПАУ-3 (рис. 1).

1.2. Усиление чирп-импульса в ПАУ-3

Как отмечалось выше, модернизация схемы накачки силового параметрического усилителя ПАУ-3 проводилась с целью повышения выходной энергии чирп-импульса, и, соответственно, достижения интенсивности облучения мишени $I_{\text{миш}} \sim 10^{20} \text{ Вт/см}^2$. Эксперименты по облучению мишеней проводились на установке с измененной схемой, описанной в разделе 1.1, а именно при накачке ПАУ-3 от усилителя У-1 лазерного канала установки «Луч». Напряжение на накопителе энергии в опытах варьировалось от 22 до 23 кВ.

Энергия лазерного импульса на входе в усилитель в опытах была достаточно стабильна и находилась в диапазоне от 32 до 36 Дж. Энергия лазерного импульса на первой гармонике на выходе усилителя У-1 также была стабильна и составляла от 155 до 175 Дж.

Энергия излучения на входе в кристаллпреобразователь в 2ω изменялась от 140 до 150 Дж при средней длительности импульса 1,4 нс. При диаметре пучка на входе в кристалл-преобразователь в 2ω 7 см и средней его энергии 150 Дж интенсивность пучка составляла 2,8 ГВт/см².

КПД преобразования во вторую гармонику по результатам энергетических измерений $\eta = E_{2\omega}/E_{1\omega}Bx2\omega$ в экспериментах по облучению мишеней составил $\eta \approx 41$ %. Энергия излучения накачки ПАУ-3 была достаточно стабильна и составляла от 57 до 65 Дж при длительности лазерного импульса 1,27 нс. Интенсивность пучка накачки ПАУ-3 в опытах по облучению мишеней составляла 1,3 ГВт/см².

Анализ полученных осциллограмм показал, что в большинстве проведенных экспериментах по облучению мишеней удалось добиться достаточной для усиления точности синхронизации, когда «выедание» накачки на ПАУ-З происходило в центре импульса 2 ω . В этих опытах энергия лазерного импульса на выходе силового параметрического усилителя ПАУ-З находилась в диапазоне от 7 до 9 Дж.

На рис. 3 приведены характерные осциллограммы, полученные в штатной схеме регистрации, и в схеме точной временной синхронизации импульсов излучения сигнала и накачки в одном из опытов (Е_{выхПАУ-3} = 7,7 Дж). На осциллограммах хорошо видно «выедание» накачки на параметрических усилителях ПАУ-2 и ПАУ-3.

Помимо экспериментального исследования энергетических характеристик усиления силовом параметрическом усилителе ПАУ-3 производилось и его компьютерное моделирование. С помощью разработанной компьютерной модели параметрического усиления, которая решает систему дифференциальных уравнений для связных волн [1, 8], был проведен численный анализ результатов экспериментов. В компьютерной модели учитывается временной профиль пучка излучения накачки и инжектируемого излучения, задается шаг по времени (0,05 пс) и рассматриваемый временной промежуток (10 нс). Исходные параметры лазерного излучения для расчетов представлены в таблице. Данные расчеты являются одномерными (интенсивность каждого пучка считается одинаковой на всей площади поперечного сечения).



Рис. 3.Осциллограммы лазерных импульсов накачки на выходе усилителей ПАУ-2 и ПАУ-3: а – в штатной схеме регистрации; б – в схеме точной временной синхронизации

Параметры сигнального излучения и излучения накачки в ПАУ-3, закладываемые в расчеты

Диаметр сигнального пучка	7 см			
Диаметр пучка накачки	7 см			
Длительность сигнального импульса	0,48 нс			
Длительность импульса накачки	1,25–1,35 нс			
Энергия чирп-импульса на входе в ПАУ-3	8–12 мДж			
Энергия импульса накачки	50–70 Дж			
Длина нелинейного кристалла DKDP в ПАУ-3	6,5 см			

Результаты произведенных вычислений представлены черными кривыми на рис. 4. Из рис. 4 видно, что интервал заданный двумя расчетными кривыми определяет значения выходной энергии при флуктуациях некоторых параметров излучений на входе в ПАУ-3, имевших место в проведенных опытах по облучению мишеней. На рис. 4 точками отмечены экспериментальные данные. Отметим, что на график были помещены только те значения энергии, которые зарегистрированы в опытах с временной рассинхронизацией импульсов накачки и сигнала $\Delta t \leq 0,1$ нс. Незначительный разброс экспериментальных точек обусловлен нестабильностью работы данной лазерной системы.



Рис. 4. Зависимость энергии усиленного чирп-импульса на выходе ПАУ-3 от энергии излучения накачки

Сравнение экспериментальных и расчетных данных показывает их соответствие с учетом погрешности.

Таким образом, модернизация схемы лазера накачки силового параметрического усилителя ПАУ-3 описанной в разделе 1, а именно использование в качестве оконечного усилителя У-1 лазерного канала установки «Луч», позволила получить энергию усиленного чирп-импульса до 9Дж.

2. Разработка и внедрение системы наведения и точной фокусировки скомпрессированного лазерного пучка на мишень

Оптическая схема заведения скомпрессированного лазерного импульса ($\lambda = 911$ нм; $\emptyset_{пучка} \approx 200$ мм) в мишенную камеру с системой наведения и фокусировки показана на рис. 5. Лазерный пучок после выхода из компрессора попадает на зеркала системы транспортировки лазерного пучка на мишень. Далее по узлу сопряжения пучок доставляется на внеосевую параболу с фокусным расстоянием 800 мм, которая производит его фокусировку на мишень.

Так как в проводимых ранее экспериментах по облучению мишеней различных типов [5] применяемое на установке оборудование не позволяло стабильно точно наводить пучок на мишень и стабильно получать минимальное пятно фокусировки излучения, в рамках данной работы проведена модернизация системы наведения и точной фокусировки, которая за-

ключалась в замене видео-камеры Watec-902H на более современную модель SP620U фирмы Spiricon и изменении оптико-механической части. Камера SP620U отличается вдвое меньшим размером пикселя (4,4 мкм), высоким динамическим диапазоном (64 дБ), удобным интерфейсом обмена данных с персональным компьютером. Эти особенности позволяют оперативно, в процессе юстировки, получать количественную информацию о форме и размере пятна фокусировки. Типичное изображение пятна фокусировки и его обработка приведены на рис. 6. Изображение пятна фокусировки регистрировалось в непрерывном юстировочном излучении на рабочей длине волны 911 нм.



Рис. 5. Оптическая схема заведения скомпрессированного лазерного импульса в мишенную камеру с системой наведения и фокусировки



Рис. 6. Пятно фокусировки в программном обеспечении Beam Gage Standard

Видно, что разрешаются пиксели камеры, размер которых 4,4 × 4,4 мкм, что свидетельствует о высоком пространственном разрешении системы наведения и точной фокусировки. Диаметр пятна фокусировки по уровню 0,5 I_{max} ≈ 11 мкм.

Диаметр пятна фокусировки в экспериментах по облучению мишеней составлял $\emptyset \approx$ от 8 до 60 мкм. Нестабильность была обусловлена трудностью точного продольного наведения лазерного пучка на мишень.

3. Времяпролетная методика регистрации протонов с энергией до 10 МэВ

Времяпролетный метод часто применяется для измерения кинетической энергии частиц. В экспериментах генерация частиц сопровождается рентгеновским излучением. Поэтому измерять энергетический спектр ионов времяпролетным методом можно, используя один детектор с подходящим временным разрешением [9, 10]. Детектор, находящийся от источника излучения, сначала зарегистрирует рентгеновское излучение, и, только потом частицы с уменьшающейся энергией в соответствии с рис. 7. Стрелки указывают время прилета протона с соответствующей этому времени энергией частицы, указанной над стрелкой [МэВ] при пролетной базе 2 м. Максимальная энергия протонов оценивается по положению переднего фронта протонного пика. В качестве детекторов применялись фотодиоды ФДУК-8УВ площадью 8 мм² и толщиной чувствительного слоя кремния не менее 350 мкм, что соответствует полному пробегу протонов с энергией ≈10 МэВ. Временное разрешение детекторов составляло в разных каналах 3 нс. Временное разрешение измерительных каналов в целом, с учетом влияния кабеля и других элементов схемы регистрации, составляло 3,5 нс. Для защиты от инфракрасного, видимого и ультрафиолетового спектра излучения использовались фильтры из алюминия толщиной 8 мкм, которые полностью поглощают протоны с энергией меньше ~0,6 МэВ. Принципиальная схема измерительного канала показана на рис. 8.



Рис. 7. Характерная осциллограмма времяпролетной методики



Рис. 8. Принципиальная схема времяпролетного измерительного канала.

В проведенных экспериментах облучению подвергались тонкие металлические мишени из титана толщиной 1 мкм и золота толщиной 1,5 мкм. Получены осциллограммы, отражающие изменение во времени напряжения на выходе детектора, соответствующее изменению величины электрического заряда, генерируемого в детекторе от ионизирующего излучения. Во всех опытах частота оцифровки сигнала была установлена равной 1.25 ГГц, т. е. $\Delta t = 0.8$ нс.

На рис. 9 приведена осциллограмма, показывающая регистрацию самых быстрых протонов за всю проведенную серию экспериментов, где первый пик (по времени) соответствует приходу на детектор рентгеновского излучения, второй пик - ускоренных протонов и ионов. Пролетная база во всей серии опытов составила 184 см.



Рис. 9. Осциллограмма с самыми быстрыми протонами за серию 3.11.15/1 ~8,4 МэВ



Рис. 10. Спектры протонов, излучаемых с тыльной стороны некоторых мишеней: 1 – Au, 29.10.15/1; 2 – Ti, 30.10.15/1; 3 – Au, 28.10.15/4; 4 – Ti, 3.11.15/2; 5 – Au, 29.10.15/2; 6 – Ti 30.10.15/3

Спектры протонов в подавляющем числе случаев имеют достаточно гладкий вид, без ярких особенностей, экспоненциально спадающие с энергией. Верхняя граница в протонных спектрах достаточно четко выражена – спектр характеризуется довольно резкой «отсечкой» по максимальной энергии. Значение верхней границы энергии отражает эффективную величину ускоряющего поля, реализовавшегося в данном конкретном эксперименте, и является важной характеристикой режима ускорения. Характерный вид спектра протонов для некоторых мишеней представлен на рис. 10.

Видно, что спектры, несмотря на отмеченные выше общие черты, достаточно сильно отличаются по жесткости и максимальной энергии.

4. Методика регистрации электронов с энергией ≤1 МэВ

Наиболее простым и эффективным методом подобных измерений является известный в ядерной физике метод разделения заряженных частиц в постоянном магнитном поле [11]. Для регистрации спектра электронов применялся спектрометр СЭ-15/1000, схема которого приведена на рис. 11. Данная аппаратура способна регистрировать электроны в диапазоне энергий до 1 МэВ. Пучок электронов, пройдя через входные щели 1 шириной 2 мм и 7 шириной 30мкм, попадает область постоянного магнитного поле В~0,5 Тл, которое создается с помощью постоянного магнита 5 из сплава NdFeB, расположенного на расстоянии 5 мм от имитатора из магнитомягкой стали. Комбинация магнит - имитатор используется для достижения необходимой магнитной инлукции ≈0.5 Тл. За счет шелевой диафрагмы, телесный угол регистрации спектрометра СЭ-15/1000 составляет 0,126 ср во всем диапазоне энергий. В качестве детектора 3 используется рентгеновская пленка УФ-4 без защитного желатинового слоя. Детектор находится в кассете 2 и защищен от видимого излучения фильтром, который представляет собой лавсановую пленку толщиной 3,5 мкм с напыленным слоем алюминия толщиной ~0.1мкм. Данным фильтром определяется нижняя граница регистрации электронов по энергии приблизительно от 15 до 20кэВ (или 1,5 × 10⁵ электрона одинаковой энергии на входную щель).



Рис. 11. Схема спектрометра электронов СЭ-15/1000: 1 – входная щелевая диафрагма, 2 – кассета, 3 – детектор, 4 – фильтр, 5 – магнит, 6 – корпус, 7 – вторая щелевая диафрагма

Известно [12], что для малых входных углов при отклонении в постоянном однородном магнитном поле на 180° моноэнергетичный пучок электронов обладает способностью самофокусировки, то есть относительная погрешность регистрации энергии электронов зависит, как показано на рис. 12, от величины входного угла $\Delta_{\alpha} = (1-\cos\alpha)$, где α – входной угол. Так для конфигурации входных щелей, представленных на рис. 1, $\alpha = \pm 11,5^{\circ}$ и $\Delta_{\alpha} = 2$ %. Следовательно, разрешающая способность спектрометра зависит только от ширины входной щели и для данного прибора составляет от 15 % при $E_e = 50$ кэВ до 3 % при $E_e = 1$ МэВ.



Рис. 12. Разрешающая способность спектрометра для моноэнергетичной линии в зависимости от направления влета электрона в спектрометр

На рис. 13 приведены фотография пленки спектрометра и типичные спектры электронов.

На фото пленки (рис. 13,а) видно разрушение чувствительного слоя пучком электронов. Пропись по неповрежденной части пленки показала, что в спектре электронов имеется высокоэнергетичная группа со средней энергией $E_e \approx 0.5$ МэВ.

5. Методика регистрации рентгеновского излучения в диапазоне энергий квантов до 10 МэВ в сплошном спектре

Одной из целей проведения опытов на установке «Фемто» было получение источника жесткого рентгеновского излучения (РИ) до 10 МэВ для целей радиографии. Исследовался выход рентгеновского излучения с энергией квантов до 10 МэВ и оценивалась его длительность.



Рис. 13. Фотография пленки спектрометра и спектры электронов в разных диапазонах энергий квантов: а – фотография, б – до 100 кэВ, в – до 300 кэВ, г – до 600 кэВ

Для диагностики потоков РИ и параметров плазмы в экспериментах использовалась методика измерений, основанная на применении сцинтилляционных детекторов [10]. В качестве детекторов выступали 2 сцинтилляционных датчика марок ССДИ8М и ТСДИ45. Схема постановки аппаратуры регистрации РИ представлена на рис. 14.



Рис. 14. Схема размещения регистрации РИ в сплошном спектре: 1 – мишень; 2 – ЛИ; 3 – мишенная камера установки «Луч»; 4 – сцинтилляционный детектор ТСДИ45; 5 – сцинтилляционный детектор ССДИ8М

Регистрация жесткого РИ осуществлялась с помощью 2-х сцинтилляционных детекторов 4 и 5. Детектор 5 марки СНФТ8М-01 (ССДИ8М) с пластиковым сцинтиллятором марки Б-18 размером Ø 40 × 90 мм. Детектор был расположен с тыльной стороны мишени на оси лазерного излечения на расстоянии ≈1200мм от мишени. Временное разрешение при этом составило $\delta \tau = 8$ нс. Детектор прокалиброван с помощью импульсного рентгеновского источника «МИРА-2Д» относительно ранее калиброванных детекторов ССДИЗ8-01, используемых в экспериментах на установке «Искра-5». Чувствительность детектора на 1 МэВ поглощенной в сцинтилляторе энергии составила ~2 × 10⁻¹³ Кл/МэВ (погл.). Детектор 4 марки ТСДИ45-01 со сцинтиллятором BaF₂ размерами Ø 25 × 20 мм. Детектор был расположен с тыльной стороны на оси лазерного излучения на расстоянии ≈850 мм от мишени. Временное разрешение при этом составило $\delta \tau = 2$ нс. Детектор прокалиброван с помощью импульсного рентгеновского источника «МИРА-2Д» относительно ранее калиброванного детектора ССДИ8М. Чувствительность детектора на 1 МэВ поглощенной в сцинтилляторе энергии составила ~1 × 10⁻¹⁶ Кл/МэВ (погл.).



Рис. 15. Доля поглощенной энергии гамма кванта в сцинтилляторах детекторов, с учетом свинцовых фильтров, в зависимости от его энергии: 1 – ССДИ8М, 2 – ТСДИ45

В качестве спектрального фильтра для РИ, отсекающего низкоэнергетичные фотоны, использовались свинцовые фильтры. На рис. 15 представлена спектральная чувствительность обоих детекторов с учетом свинцовых фильтров для ССДИ8М 70мм, для ТСДИ45 40 мм. Из приведенного графика чувствительности видно, что оба сцинтилляционных детектора регистрировали гамма-кванты от 1 МэВ и выше.

На рис.16 представлены типичные осциллограммы, зарегистрированные обоими детекторами в проведенных экспериментах. Детекторы находились на оси падения ЛИ на мишень, с тыльной стороны мишени. ТСДИ45 был установлен на расстоянии 20 см, а ССДИ8М 50 см, от стенки камеры взаимодействия. Толщина свинцовых фильтров на первом детекторе составляла 40 мм и 70 мм на втором.



Рис. 16. Результаты регистрации жесткого РИ детекторами: а – ФЭУ ТСДИ45 (BaF₂), б – ФЭУ ССДИ8М (Б-18)

В некоторых экспериментах на осциллограммах жесткого РИ наблюдался «зашкал» амплитуды импульсов. При постановке свинцовых фильтров толщиной 40 мм ТСДИ45 и 70 мм ССДИ8М с учетом спектральной чувствительности каналов регистрации зарегистрированы импульсы жесткого РИ с энергией квантов ≥1 МэВ.

Заключение

На фемтосекундном канале лазерной установки «Луч» проведены эксперименты по облучению плоских металлических мишеней при интенсивностях лазерного пучка ~10²⁰ Вт/см² с целью исследования возможности генерации потоков высокоэнергетичных заряженных частиц и жесткого рентгеновского излучения (РИ). Достижение требуемого уровня интенсивности излучения потребовало модернизации системы накачки параметрического усилителя ПАУ-3, а также разработки методик и аппаратуры измерений параметров корпускулярного и электромагнитного излучений лазерной плазмы.

Основные результаты исследований сводятся к следующему.

1. На фемто-канале лазерной установки «Луч» разработана и успешно реализована схема накачки силового параметрического усилителя ПАУ-3 с применением усилительного каскада У-1 данной установки. Энергия лазерного излучения на выходе У-1 составила от 160 до 180 Дж при длительности лазерного импульса 1,4 нс. После преобразования во вторую гармонику энергия накачки ПАУ-3 в экспериментах по облучению мишеней составила от 55 до 65 Дж при длительности лазерного импульса 1,3 нс. Интенсивность пучка накачки ПАУ-3 составляла 1,3 ГВт/см².

 Разработана и технически реализована схема точной временной синхронизации импульса накачки и чирп-импульса на силовом параметрическом усилителе ПАУ-3, обеспечивающая разновременность прихода этих импульсов на ПАУ-3 Δt ≤ 0,1 нс.

3. Проведено усиление чирпированного лазерного импульса в силовом параметрическом усилителе ПАУ-3. Энергия чирп-импульса на выходе ПАУ-3 достигала 9 Дж. Произведено численное моделирование параметрического усиления чирп-импульса в ПАУ-3. Отмечено хорошее согласование результатов расчетов и экспериментов.

4. Полученные результаты позволили получить энергию скомпрессированного лазерного импульса ($\tau_{имп} \approx 50 \text{ фc}$) на мишени до 5 Дж и достичь интенсивности облучения мишени 10^{20} Вт/см^2 .

5. Разработаны методики и аппаратура диагностики параметров лазерной плазмы, задействованные в экспериментах по облучению тонких металлических мишеней:

электронный спектрометр СЭ-15/1000;

датчики жесткого РИ на базе фотоэлектронных умножителей ТСДИ45 (сцинтиллятор BaF₂) и ССДИ8М (сцинтиллятор Б-18);

 времяпролетный спектрометр протонов на базе кремниевого полупроводникового фотодиода ФДУК-8УВ.

6. В результате проведенных работ были проведены успешные опыты по облучению тонких металлических мишеней, в которых получены высокоэнергетичные пучки электронов ($E_e \approx 0,5$ МэВ), протонов ($E_P \approx 10$ МэВ) и жесткого рентгеновского излучения (энергия квантов ≥ 1 МэВ).

Литература

1. Крюков П. Г. Фемтосекундные импульсы. – М.: Физматлит, 2008.

2. Фортов В. Е. Экстремальные состояния вещества на Земле и в космосе. УФН, 2009. Т. 179, № 6, С.653–687.

3. Коржиманов А.В., Гносков А.А., Хазанов Е.А., Сергеев А.М. Горизонты петаваттных лазерных комплексов. УФН, 2011. Т. 181, № 1, С. 9–32.

4. Гаранин С. Г. Мощные лазеры и их применение в исследованиях физики высоких плотностей энергии. // УФН, 2011. Т. 181, № 4, С. 434–441.

5. Belkov S. A., Garanin S. G., Rukavishnikov N. N. RFNC-VNIIEF study into interaction between intense laser pulses and substance. Contributions to Plasma Physics, V. 53, Issue 2, Pp.122–128 (2013).

6. Гаранин С. Г., Зарецкий А. И., Илькаев Р. И., Кириллов Г. А., Кочемасов Г. Г., Курунов Р. Ф. Канал мощной установки «Луч» для ЛТС с энергией импульса 3,3 кДж и длительностью 4 нс. Квантовая электроника 35, № 4, 2005 г., С. 299–301.

7. Епатко И. В., Малютин А. А., Серов Р. В., Соловьев Д. А., Чулкин А. Д. Новый алгоритм численного моделирования распространения лазерного излучения. Квантовая электроника, Т. 25, № 8, С. 717–722 (1998).

8. Ross I. N., Matousek P., Towrie M., Collier A. J. The prospectsfor ultrashot pulse duration and ultrahigh intensity using optical parametric chirped pulse amplifiers. Optics Communications 144, December 1, 1997, Pp.125–133.

9. Борщевский А. В. Разработка на основе быстрых полупроводниковых детекторов методики измерения диаграммы направленности и спектра потоков быстрых ионов (протонов) в экспериментах по изучению взаимодействия сверхмощного лазерного излучения с веществом. Сборник докладов Международной конференции 18 Харитоновские тематические научные чтения по проблемам физики высоких плотностей энергии, 2016.

10. Абрамов А. И. Основы экспериментальных методов ядерной физики. – М.: Атомиздат. 1977. Гл. 7, 13.

11. Thomson J. J. Phil. Mag. [6] 21, 225 (1911).

12. Савельев И.В. Курс общей физики, Т. 1. – М.: Наука. 1982. С. 432.

ВЛИЯНИЕ АМПЛИТУДЫ НАЧАЛЬНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ КОНТАКТНОЙ ГРАНИЦЫ ГАЗОВ НА ПЕРЕХОД НЕУСТОЙЧИВОСТИ РИХТМАЙЕРА – МЕШКОВА В ТУРБУЛЕНТНУЮ СТАДИЮ

<u>А. С. Кучкарева,</u> Н. В. Невмержицкий, Е. А. Сотсков, Е. Д. Сеньковский, Е. В. Левкина, О. Л. Кривонос

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

Введение

Гидродинамические неустойчивости [1–4] и связанное с ними турбулентное перемешивание (ТП) являются одним из препятствий при попытках достижения высоких плотностей энергии при инерциальном термоядерном синтезе.

Для описания развития этих неустойчивостей применяются численные методы и различного рода полуэмпирические модели. Все они требуют калибровки по результатам экспериментов. При этом важно, чтобы длина волны λ и амплитуда a_0 начальных возмущений на контактной границе (КГ) веществ в экспериментах были известны. Кроме этого важно знать время, за которое развитие этих возмущений переходит в турбулентную стадию.

В работе [5] из *k*-є *модели* получено, что полная ширина зоны ТП (ЗТП) при развитии Р-М неустойчивости описывается выражением:

$$L^* = L_0 \left(1 + \frac{8\eta_*^2 k_0^2}{p \varepsilon_0 L_0^2} (t - t_0) \right)^p, \qquad (1)$$

где k_0 , ε_0 – начальные значения кинетической энергии турбулентности и скорости диссипации, L_0 – начальная ширина зоны ТП при $t = t_0$, η_* – константа, зависящая от уровня концентрации C_* , по которой определяются границы ЗТП (при $C_* = 0,05$, $\eta_* = 1,17$ [5]), t_0 – время, при котором после прохождения ударной волны (УВ) через КГ развитие возмущений достигло стадии развитой турбулентности.

Подобный (1) закон роста ширины зоны получен ранее в [6, 7] с $p \sim (0,25-0,32)$. Если принять, что развитие возмущений происходит симметрично, то начальную ширину возмущенной зоны до перехода к ТП можно связать с амплитудой выражением $a(t_0) = 0,5L_0$. Для скорости роста амплитуды в [5] используется интерполяционная формула, которая описывает линейную и слабо нелинейную стадии развития возмущений

$$a = \frac{|a_{\rm im}|}{1 + \frac{k}{2}|a_{\rm im}|t} \qquad a(t) \approx \frac{2}{k} \ln\left[1 + \frac{k}{2}|a_{\rm im}|t\right], \quad (3)$$

где $a_{\rm im} = |A_+|Uk|$ – значение амплитуды согласно импульсной модели Рихтмайера [2], k –волновое число, λ – длина волны, A_+ , a_* – число Атвуда и амплитуда возмущений после взаимодействия УВ с КГ. С учетом принятых допущений в [5] выражения для момента перехода от этапа развития неустойчивости к ТП и зависимости ширины ЗТП от времени имеют вид:

$$t_{0} = \frac{\text{Re}_{*} v_{c}}{4 (a_{*} A_{\perp} U k)^{2}},$$
 (4)

$$L = \frac{4}{k} \left[1 + \frac{a_* |A_+| Uk^2}{5,5p} (t - t_0) \right]^P$$
(5)

В докладе представлены результаты экспериментальных исследований влияния величины амплитуды начальных возмущений контактной границы газов разной плотности на переход неустойчивости Рихтмайера – Мешкова в турбулентную стадию, а также характер роста зоны перемешивания газов.

При расчете L(t) по формуле (5) коэффициент средней кинематической вязкости v газов определялся по коэффициентам динамической вязкости μ и плотности газов, которые выбирались по данным работы [8] с учетом давления и температуры в эксперименте.

Техника экспериментов

Схема ударной трубы (УТ), на которой проводились эксперименты, представлена на рис.1.

УТ состояла из камеры высокого (драйвер) и низкого давлений и глушителя. Камера высокого давления герметично отделялась от камеры низкого давления мембраной из лавсана толщиной $\sigma = 0,05-0,15$ мм. Камера низкого давления состояла из входного и выходного каналов и измерительной секции с внутренним сечением 40×40 мм.

Измерительная секция от входного канала герметично отделялась тонкой ($\sigma \approx 2$ мкм) полимерной пленкой с заданными периодическими 3Dвозмущениями, выходной канал от глушителя – мембраной из лавсана, толщиной 0,05 мм.

Объем измерительной секции и выходного канала заполнялся «тяжелым» газом – SF_6 ($\rho_0 = 6,5$ г/л,

 $C_0 = 129,5$ м/с) или CO_2 ($\rho_0 = 1,9$ г/л, $C_0 = 270$ м/с) при атмосферных условиях. Во входном, выходном каналах и в глушителе находился воздух ($\rho_0=1,205$ г/л, $C_0 = 342$ м/с) также при атмосферных условиях. Драйвер заполнялся газовой взрывчатой смесью (ГВС) $C_2H_2 + 2,5O_2$ с избыточным давлением или сжатым гелием.



Рис. 1. Схема ударной трубы (размеры в мм)

Работа установки

После подрыва ГВС вниз по течению распространяется детонационная волна (ДВ). При касании ДВ мембраны последняя разрушается, происходит распад разрыва: в легкий газ (в камеру низкого давления) идет ударная волна. При прохождении УВ через тонкую пленку (границу раздела «легкого» и «тяжелого» газов) опять происходит распад разрыва. В «тяжелый» и «легкий» газ идут УВ. При этом тонкая пленка разрушается, контактная граница газов ускоряется, на ней развивается Р-М неустойчивость, приводящая к росту возмущений и образованию зоны перемешивания контактирующих газов, растущей со временем по ширине.

Регистрация течения проводилась шлиренметодом скоростной видеокамерой СФР-7 в покадровом режиме. Скорость УВ в газах определялась по временным показаниям датчиков давления D1, D2, D3 и расстоянию между ними, а также по кинограммам экспериментов. Эксперименты проводились при температуре $T = 21 \pm 2$ °C.

Технология изготовления пленки с периодическими 3D-возмущениями

Экспериментальная оснастка представлена на рис. 2.

Приготавливался раствор: этилацетат, нитролак, коллодий в пропорции 4:1:0,5 соответственно. Раствор выливался на поверхность воды. Через ≈ 1 мин на поверхности воды образовывалась пленка, рис. 2,а. При помощи толстой нити она снималась и накладывалась на торец измерительной секции, рис. 2,в, со стрелкой прогиба ≈ 2 мм. На пленку устанавливалась матрица с 25 пуансонами (Ø 4 мм) со сферическими (R ≈ 2 мм) торцами, рис.26. Расстояние между пуансонами составляло $8 \pm 0,3$ мм.



Рис. 2. Экспериментальная оснастка: а – фотография секции с пленкой на пуансонах; б – матрица с пуансонами; в – фотография пленки с заданными 3D-возмущениями без пуансонов

Затем в секцию (под пленку) подавался сжатый воздух давлением \approx (0,005–0,001) атм, пленка прогибалась и в таком состоянии сушилась 24 часа. Затем воздух стравливался. В секции создавалось разрежение (\approx 0,005 атм). Пленка отходила от торцов пуансонов, пунсоны поочередно снимались. На пленке оставались периодические возмущения (по форме близкие к синусоиде) с длиной волны $\lambda = 8$ мм и заданной амплитудой a_0 .

Результаты экспериментов

В табл. 1 представлены условия проведения и некоторые результаты экспериментов. При этом символ 1 относится к газу над разделительной полимерной пленкой, символ 2 – к газу под пленкой. Параметры течения в экспериментах рассчитывались по методу Ф. К. Годунова [9] по экспериментальному значению скорости D_1 .

В опытах, начальная амплитуда возмущений варьировалась от 0,5 мм до 1,8 мм. Погрешность a_0 составляла ±0,2 мм. Длина волны возмущения была постоянной и согласно [5] определялась как $\lambda = ((\lambda_x)^{-2} + (\lambda_y)^{-2})^{-1/2}$. В экспериментах λ_x , $\lambda_y = (8 \pm 0,3)$ мм, тогда $\lambda = (5,6 \pm 0,2)$ мм.

На рис. 3–5 представлены кинограммы некоторых экспериментов, на рис. 6 – схема обмера границ течения, на рис. 7и рис. 8 – зависимости роста ширины зоны перемешивания *L* от времени *t*.

В табл. 2 представлены некоторые параметры течения, которые принимались при описании ширины зоны перемешивания. Отметим, что в экспериментах при описании ширины зоны перемешивания по формуле (5) варьировался только показатель степени *p*, а амплитуда возмущений и длина волны соответствовали заданным в экспериментах.

В табл. 2: Rе_{max} – максимальное число Рейнольдса Re_{max} = $\frac{8}{e} \cdot \frac{\overline{\lambda}}{2\pi} \cdot \frac{|a_{\text{lin}}|}{\nu}$, где $a_{\text{lin}} = A_+ (2\pi/\overline{\lambda})Ua_*$, t_0 рассчитано по формуле (4), M₂ – число Маха ударной волны в газе 2.

Таблица 1

№ опыта	Вид КГ	Драйвер <i>Р</i> ₀ , атм	γ1	γ2	<i>D</i> ₁ , м/с	<i>D</i> ₂ , м/с	U _{кг Р} , м/с	р ₂₈ , г/л	ρ _{1S} , г/л	A
893	B-SF ₆	He 29,5	1,39	1,074	822	452	373	52,8	5,8	0,8
894	B-SF ₆	ГВС 3	1,378	1,07	1236	652	644	97	8,9	0,83
895	B-SF ₆	ГВС 3	1,37	1,07	1304	689	687	102,8	9,2	0,84
899	B-SF ₆	ГВС 9	1,33	1,064	1956	1144	1110	151,9	12,7	0,85
901	B-SF ₆	ГВС 1	1,39	1,074	821	412	373	60,6	6,8	0,81
966	B-SF ₆	ГВС 3	1,378	1,2	1214	923	865	12,9	6,1	0,36
971	B-CO ₂	ГBC 8	1,344	1,168	1900	1580	1448	19,1	8,1	0,4
972	B-CO ₂	ГBC 8	1,344	1,17	1883	1604	1430	18,8	8	0,4

Условия проведения и результаты экспериментов

Обозначения: P_0 – начальное полное давление ГВС в драйвере УТ (погрешность ±0,1 атм); $D_1 = H/(t_2-t_1)$ – средняя скорость ударной волны в газе 1; γ_1 – эффективный показатель адиабаты «легкого» газа; γ_2 - эффективный показатель адиабаты «легкого» газа; γ_2 - эффективный показатель адиабаты «тяжелого» газа; D_2 – скорость ударной волны в газе 2, полученная по методу Ф.К. Годунова; U_P – расчетное значение скорости контактной границы; ρ_{1S} – плотность в «легком» газе за отраженной волной; ρ_{2S} – плотность в «тяжелом» газе за ударной волной; $A = (\rho_{2S}-\rho_{1S})/(\rho_{2S}+\rho_{1S})$ – число Атвуда рассчитанное с учетом сжатия газов.

Таблица 2

Опыт	Вид КГ	<i>M</i> ₂	<i>а</i> ₀ , мм	<i>a</i> *, mm	a_0/a_*	λ/a_*	µ1, 10 ⁻⁷ Па∙с	µ2, 10 ⁻⁷ Па∙с	v, 10 ⁻⁶ m ² /c	Re _{max} , 10 ⁶	t ₀ , мкс
893	B-SF ₆	3.5	1,8	1	1,8	5,6	306	290	1,02	0,85	2
894	B-SF ₆	5,2	0,9	0,52	1,73	10,8	484	300	0,74	0,9	2,6
895	B-SF ₆	5,3	0,6	0,33	1,82	17	510	300	0,72	0,67	3,6
899	B-SF ₆	8,8	1,2	0,57	2,11	9,8	732	468	0,73	2	1,2
901	B-SF ₆	3,2	0,55	0,3	1,8	18,7	339	253	0,88	0,3	6,5
966	B-SF ₆	3,4	1	0,42	2,4	13,3	430,1	351	4,1	0,076	5,4
971	B-CO ₂	5,1	1	0,35	2,9	16	519	494	3,7	0,14	3,5
972	B-CO ₂	5,9	0,8	0,27	3	20,7	519	494	3,8	0,104	4,4

Параметры течения для описании ширины зоны перемешивания
По кинограммам (рис. 3–5) видно, что после прохождения ударной волны через контактную границу на границе со временем развивается зона турбулентного перемешивания. В экспериментах с относительно большой амплитудой возмущений (1,8 мм) ширина зоны выше, чем в экспериментах с малой амплитудой, явно просматриваются струи от возмущений. В эксперименте № 893 струи наблюдаются до конца регистрации, т.е. за все время наблюдения возмущения не перешли полностью в турбулентную стадию.

По зависимостям L(t) видно, что с ростом числа Маха ударной волны от 3 до 8 показатель степени роста ширины зоны перемешивания (*p*) увеличивается от 0,24 до 0,6. При этом отметим, что ширину зоны ТП вместе со струями описать формулой (5) не удается: при измерении ЗТП по вершинам струй p >> 1. Поэтому на всех зависимостях L(t) струи не учитывались; ширина ЗТП определялась как $L = X_1 - X_2$, т. е. по минимальному значению (см. рис. 6).

В табл.2 представлено отношение λ/a_* для всех опытов. Во всех опытах, кроме опыта 893, это отношение $\lambda/a_* > 10$. В этих опытах по сравнению с опытом 893 не наблюдается явно выраженных струй от возмущений: развиваются лишь струи, образовавшиеся в результате перемешивания газов. Поэтому можно сказать, что при $\lambda/a_* > 10$ время t_0 перехода развития возмущений в турбулентную стадию соответствует t_0 , рассчитанному по формуле (4). Строгое определение этого времени в экспериментах пока невозможно из-за того, что при малых a_0 процесс перехода развития возмущений в турбулентную стадию происходит очень быстро (0,5–1) мкс, что требует применения аппаратуры с наносекундным разрешением.



Рис. 3. Развитие турбулентного перемешивания на границе *воздух–SF*₆ при различных амплитудах: 3*D*-возмущений: а – опыт 901; б – опыт 893; УВ – ударная волна; ЗТП – зона турбулентного перемешивания; КГ – начальное положение контактной границы, время отсчитывается от момента прихода УВ на КГ



Рис. 4. Кинограммы экспериментов с границей $so3dyx-SF_6$: а – опыт 895; б –опыт 899; УВ – ударная волна; ЗТП – зона турбулентного перемешивания; КГ – начальное положение контактной границы; время отсчитывается



Рис. 5. Кинограммы экспериментов с CO₂: а – опыт 966; б – опыт 972 КГ – контактная граница; ЗТП – зона турбулентного перемешивания



Рис. 6. Схема обмера опытов: УВ – положение ударной волны; X₁ – фронт проникновения «легкого» газа в «тяжелый»; X₂ - фронт проникновения «тяжелого» газа в «легкий»; Xc – фронт струй



Рис. 7. *L*(*t*)-диаграммы опытов с *SF*₆: *p* – расчетный показатель степени ; 🕂 – эксперимент



Рис. 8. *L*(*t*)-диаграммы опытов с *CO*₂: *p* – расчетный показатель степени; 🕹 – эксперимент

Выводы

По полученным результатам можно сделать следующие выводы:

• с увеличением амплитуды начальных возмущений время перехода неустойчивости в турбулентную стадию увеличивается, а с увеличением числа Maxa – уменьшается

• при $\lambda/a_* > 10$ время t_0 перехода развития возмущений в турбулентную стадию удовлетворительно описывается аналитическим решением

• с увеличение числа Маха ударной волны скорость роста зоны перемешивания увеличивается

Литература

1. *Taylor G. I.* The instability of liquid surfaces when accelerated in a direction perpendicular to their planes. I. Proc. Roy. Soc., 1950. V. A201. P. 192.

2. *Richtmyer R. D.* Taylor instability in shock acceleration of compressible fluids. Commun. Pure Appl. Math., 1960. V. 13. P. 297.

3. *Мешков Е.Е.* Неустойчивость границы раздела двух газов, ускоряемой ударной волной. Изв. АН СССР, МЖГ, 1969, № 5. С. 151–158.

4. *Helmholtz H. L. F.* Uber discontinuirlish Flussigkeits-Bewegungen. Monatsberichte Konigl. Preus. Akad. Wiss. Berlin. 1868. P. 215.

5. Авраменко М. И. О к-є модели турбулентности. – Снежинск: Изд-во «РФЯЦ-ВНИИТФ», 2005. С.76.

6. Беленький С. З., Фрадкин Е. С. Теория турбулентного перемешивания. Труды Физического института АН СССР им. Лебедева, 1965. Т. 29, С. 207–256.

7. *Неуважаев В. Е.* Математическое моделирование турбулентного перемешивания. – Снежинск: «РФЯЦ-ВНИИТФ», 2007. С.160.

8. Зубарев В. Н., Козлов А. Д. и др. Теплофизические свойства технически важных газов при высоких температурах и давлениях: Справочник. – М.: Энергоатомиздат. 1989, С. 232.

9. Численное решение многомерных задач газовой динамики / Под редакцией Ф.К. Годунова. – М.: Изд-во «Наука», 1976. С. 400.

ПОРОХОВАЯ НАГРУЖАЮЩАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

<u>А. А. Лопаткин</u>, И. В. Занегин, В. В. Барабин, А. Н. Малышев, В. И. Скоков, А. В. Кальманов, О. Н. Игнатова

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

При изучении механических свойств конструкционных материалов для создания интенсивных динамических нагрузок используются устройства и установки, основанные на разных физических принципах. В последнее время все большее распространение для исследований динамической сжимаемости, прочностных характеристик и откольных явлений получают метательные устройства пушечного типа. Основным преимуществом применения этих устройств является прогнозируемое состояние ударника перед контактом с мишенью и возможность более точного определения его скорости.

В РФЯЦ-ВНИИЭФ отработан метод исследования динамических прочностных свойств конструкционных материалов на пороховой нагружающей установке (ПНУ)ствольного типа (далее – Метод).

Особенностью экспериментов с использованием ПНУ является разгон объектов малых масс в сравнении со штатными параметрами для артиллерийской установки и необходимость разработки специальной испытательной оснастки, обеспечивающей разгон ударников до заданных скоростей без нарушения их прочности и геометрии, а также необходимую симметрию соударения ударника и нагружаемого образца.

Конструктивная схема ПНУ представлена на рис. 1, общий вид ПНУ – на рис. 2. Со стороны казенной части устанавливается метаемый объект (MO), состоящий из поддона и образца исследуемого материала или ударника; за ним помещают пороховой заряд. На дульном срезе ствола установки закрепляется надульный отсек, на торце которого монтируется узел с исследуемым образцом и необходимыми измерительными средствами. Под действием пороховых газов (ПГ) МО разгоняется до соударения с исследуемым образцом. Скорость МО определяется его массой, массой и составом порохового заряда, конструктивными особенностями установки.



Рис. 1. Конструктивная схема ПНУ: 1 – ствол; 2, 3 – тележка; 4 – тормозное устройство; 5 – надульный отсек; 6 – рельсовые направляющие



Рис. 2. Внешний вид ПНУ

Испытательная оснастка, применяемая в экспериментах с ПНУ

Метаемый объект

Конструкция МО должна обеспечивать надежную обтюрацию ПГ, сохранение механических свойств материала ударника при его разгоне до заданных скоростей соударения, возможность вакуумирования внутреннего объема ствола, а также обеспечивать необходимую симметрию нагружения образца ударником. Были отработаны МО нескольких конструктивных исполнений, схемы и общий вид которых представлены на рис. 3 и рис. 4.



Рис. 3. Метаемый объект – вариант 1: а – схема, б – внешний вид; 1 – ударник; 2 – поддон; 3 – кольцо; 4 – крепеж



Рис. 4. Метаемый объект – вариант 2: а – схема, б – внешний вид; 1 – ударник; 2 – поддон

Надульный испытательный отсек

Основной испытательной оснасткой в данном Методе исследования являются надульные испытательные отсеки 5, рис. 1, которые обеспечивают сохранность ствола *1* ПНУ при соударении МО с исследуемым образцом, симметрию соударения ударника с образцом, вакуумирование внутреннего объема, а также возможность установки необходимых измерительных средств.

На рис. 5 приведены схема и внешний вид испытательного надульного отсека для ПНУ. Отсек можно разделить на три секции по функциональному назначению:

 секция 1 с внутренним диаметром равным калибру ствола, служащая для закрепления отсека на стволе и установки датчиков;

 секция 2 – расширительная камера с расположенными на ней специальными отверстиями для стравливания газов, предназначенная для уменьшения воздействия газовой пробки на мишень;

 секция 3 – нагружаемый блок с мишеньюобразцом, установленным на разрушаемом дискеосновании.



Рис. 5. Надульный отсек: а – схема, б – внешний вид;
1 – корпус измерительного отсека; 2 – разрушаемый дискоснование;
3 – нагружаемый блок с мишенью-образцом;
4 – отверстия для сброса газов;
5 – расширительная камера;
6 – отверстия для установки пьезоэлектрических датчиков давления и пусковых электроконтактов

При использовании представленной выше экспериментальной оснастки, максимальный суммарный угол неплоскостности при соударении МО с образцом по технологическим причинам может составлять не более $\approx 0,2^{\circ}$.

Методики измерений

В данном Методе исследования используются следующие измерительные методики:

– тензометрическая методика для определения X-t диаграммы движения и скорости MO, а также определения давления ПГ в камере сгорания и в заснарядном пространстве;

 методика измерения давления с помощью пьезоэлектрических датчиков для измерения давления ПГ в камере сгорания и давления в воздушной пробке, собираемой МО, а также для определения скорости МО (в этом случае датчики давления служат отметчиками времени);

 методика измерения скорости МО с помощью электромагнитных датчиков;

 – электроконтактная методика для измерения скорости ударника и определения симметрии соударения ударника с образцом;

 методика пьезорезистивного (манганинового) датчика для регистрации профилей давления на границе образец-подложка;

 – лазерно-интерферометрическая методика для непрерывной регистрации скорости свободной поверхности образца.

Применение данных методик при проведении экспериментов с ПНУ позволяет получить большой объем данных для анализа результатов экспериментов. Данные приведены на рис. 6, 9, 10, 11. На рис. 5 приведена осциллограмма, полученная с датчика давления (PS01-01), установленного в первой секции отсека (скорость ударника \approx 2200 м/с). По осциллограмме среднее давление в газовой пробке не превышает 2 МПа, а ее длина составляет \approx 1,3 м.



Рис. 6. Давление в газовой пробке перед МО

Выход газов через отверстия в расширительной камере показан на кадрах скоростной видеосъемки, приведенных на рис. 7.



Рис. 9. Характерные сигналы датчиков давления

В таблице приведены некоторые результаты тестовых экспериментов по исследованию динамических свойств конструкционных материалов, полученные по нескольким методикам: характеристики ударников и образцов, экспериментальные значения скоростей соударения и реализованных давлений.



Рис. 7. Выход газов через отверстия в секции 2

На рис. 8 показана конструкция измерительной гильзы, в которой для измерения давления в зарядной камере устанавливались два пьезодатчика давления типа 2Т6000 (НТИИМ, Н. Тагил). Характерные сигналы датчиков давления представлены на рис. 9.



Рис. 8. Измерительная гильза а – конструктивная схема: 1 – корпус гильзы, 2 – датчик давления 2Т6000; б – общий вид

В столбце «скорость» таблицы приведены значения усредненной скорости ударника в, в столбце «давление на стационарном участке ударной волны (УВ)» – значение давления на стационарном участке профиля УВ в образце, рассчитанное по зарегистрированным в экспериментах зависимостям скорости свободной поверхности образца и/или давления на границе «образец-подложка» от времени.

На рис. 10 представлены зарегистрированные с помощью манганиновых датчиков профили УВ во фторопластовом экране, при нагружении образца из ст. 20 со скоростью ≈1600 м/с.

Из графиков на рис. 10 видно, что УВ на датчики, установленные в одной плоскости на расстоянии 5 мм друг от друга, приходят одновременно, что также свидетельствует о плоском соударении. Длительность импульса нагружения с постоянным давлением составила \approx 1,9 мкс при фронте нарастания \approx 10 нс.

Материал ударника	Габариты ударника, мм	Материал образца	Габариты образца, мм	Скорость, м/с	Давление на стационар- ном участке УВ, ГПа
Ст. 20	Ø 92 × 11,6	Сталь	Ø 100×5	1600	30
Ст.20	Ø 92×11,6	Сталь	Ø 100×10	2250	45
Ст.20	Ø 92×11,6	Сталь	Ø 10×10	520	13,5
Медь М1	Ø 88×5,0	Медь М1	Ø 110 \times 11 (Ø 22 \times 11)	1000	25
Медь М1	Ø 90×2,0	Медь М1	Ø 76 × 4 (Ø 7 × 4)	990	22
Церий	Ø 45×1,85	LiF	Ø 22×24	1000	_

Характеристики ударников и образцов при проведении методических экспериментов на ПНУ-100



Рис. 10. Профиль ударной волны на границе ст. 20-фторопласт при нагружении со скоростью ≈1600 м/с



Рис.11. Скорость свободной поверхности образца (Ст. 20), зарегистрированная с помощью лазерного интерферометра при скорости нагружения ≈520 м/с

Результаты измерений, полученные с помощью электроконтактных датчиков, установленных за свободной границей образцов на расстоянии 1–3 мм, показали, что максимальное значение разновременности срабатывания ЭКД составило 0,165 мкс на радиусе 50 мм.

На рис. 11 показана зависимость скорости свободной поверхности образца из ст. 20 от времени, полученная с помощью лазерно-интерферометрической методики при скорости нагружения ≈520 м/с.

Выводы

Метод исследования свойств конструкционных материалов при помощи ПНУ позволяет получать большой объем первичных данных.Данный метод имеет перспективу широкого применения для исследования динамических свойств конструкционных материалов.

МОДЕРНИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОННОГО БЛОКА НЕЙТРОННОГО ДЕТЕКТОРА ДЛЯ ПОРТАТИВНОЙ АППАРАТУРЫ РАДИАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ

П. В. Марунин, А. В. Родигин

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

В рамках создания на территории Российской Федерации (РФ) системы инструментального надзора за перемещением делящихся материалов и радиоактивных веществ, в институте ядерной и радиационной физики (ИЯРФ) разрабатывается портативный прибор с применением ³Ненейтронного детектора (НД). Прибор предназначен для обнаружения и предварительной идентификации ядерных и радиоактивных материалов по их гамма и нейтронному излучениям. Структурная схема прибора радиационного контроля изображена на рис. 1.

В состав портативного прибора радиационного контроля входят:

встраиваемый персональный компьютер (ПК) с сенсорным экраном;

детектор гамма-излучения;

-НД;

– источник постоянного напряжения (батарея питания).

НД содержит гелиевый счетчик нейтронов и электронный блок (ЭБ), в составе которого конструктивно объединяются:

- высоковольтный (BB) преобразователь;

 – зарядочувствительный усилитель (ЗЧУ) с дискриминатором;

- стабилизирующий преобразователь напряжения.





По техническому заданию прибор радиационного контроля должен быть выполнен в корпусе с размерами $180 \times 180 \times 75$ мм, аЭБ, располагающийся внутри, должен иметь габариты не более $103 \times 37 \times 20$ мм.

К ЭБ предъявляются повышенные требования по экономичности и электромагнитной совместимости (ЭМС). ЭБ размещен в металлическом экранирующем корпусе и содержит разделенные экранирующей перегородкой секции ЗЧУ и ВВ-преобразователя. Конструкция корпуса ЭБ обеспечивает защиту ЗЧУ от электромагнитных помех, производимых как ВВ-преобразователем, так и внешними источниками помех. За прототип ЭБ был взят аналогичный блок прибора УРС-02 [1], для которого потребовалась модернизация.

ВВ преобразователь

ВВ-преобразователь должен обеспечивать быстрый (несколько секунд) и точный, с минимальным перерегулированием, выход напряжения питания счетчика нейтронов на необходимый уровень (~1000 В) и при этом быть экономичным.

Экономичные маломощные высоковольтные преобразователи находят применение в источниках питания для детекторов и счетчиков различного рода излучений, фотоэлектронных умножителей. В основном, применяются однотактные прямоходовые [2] и обратноходовые импульсные преобразователи на основе малогабаритных повышающих трансформаторов. В прямоходовых ВВ-преобразователях используется высокий коэффициент трансформации, а импульсный ток в ключе достигает нескольких десятков миллиампер из-за низкой индуктивности первичной обмотки с малым числом витков. Экономичность прямоходового ВВ-преобразователя можно обеспечить только значительным повышением периода следования импульсов. Упомянутый импульсный ток неприемлем с точки зрения ЭМС в нашем случае (из-за сильных наводок на ЗЧУ). Обратноходовые преобразователи, благодаря формированию при закрытии ключа (обратном ходе) выброса напряжения, существенно превышающего напряжение питания, позволяют использовать меньший коэффициент трансформации. Они могут иметь первичную обмотку с увеличенным количеством витков и, соответственно, с повышенной ее индуктивностью. При этом ток ключа можно снизить в несколько раз, как например это сделано в преобразователе прибора УРС-02, где коммутируемый ток составляет 15 мА при токе потребления от батареи питания менее 1 мА. Скважность при этом уменьшена до значения ~4, а накопление тока в первичной обмотке происходит в течение четверти периода. Чтобы обеспечить

эффективную передачу импульса напряжения из первичной обмотки во вторичную обмотку, последняя должна иметь как можно меньшую межвитковую емкость, что достигается секционированием вторичной обмотки. В УРС-02 используется довольно трудоемкая в изготовлении секционированная катушка с ферритовым чашечным сердечником Б18. Несмотря на снижение коммутируемого тока, в УРС-02 наводки на ЗЧУ оставались значительными, на пределе допустимого.

Чтобы дополнительно уменьшить наводки на ЗЧУ, в модернизируемом ЭБ было предложено уменьшить коммутируемый ток обратноходового преобразователя за счет использования одиночной катушки с увеличенной индуктивностью вместо повышающего трансформатора. Принцип накопления тока непосредственно в высоковольтной обмотке позволяет избежать потерь на индуктивности рассеяния при передаче энергии из первичной обмотки во вторичную. Выброс обратного хода катушки должен быть не менее 330 В (как в УРС-02), чтобы после утроения при помощи умножителя напряжения получить требуемые 1000 В.В качестве одиночной малогабаритной катушки-накопителя целесообразно использовать секционированную катушку на ферритовом чашечном сердечнике Б18 или стандартный импульсный трансформатор ТИМ с последовательно выброс напряжения 330 В. В табл. 1 представлены результаты испытания катушек.

Испытания показали, что оптимальным вариантом среди серийных изделий является катушка на. основе ТИМ238В, обеспечивающая выброс обратного хода напряжения необходимой величины при наименьшем токе в ключе (9 мА). Катушка с меньшей индуктивностью требовала накопления большего тока, а катушки ТИМ с большей индуктивностью имели слишком большую межвитковую емкость изза большого числа витков, из-за чего необходимый выброс обратного хода не обеспечивался. Наилучший результат был получен с секционированной катушкой на чашечном сердечнике Б18, но от нее пришлось отказаться из-за высокой трудоемкости изготовления и монтажа.

Попутно отметим, что применение ТИМ вместо Б18 позволяет снизить габаритную высоту ЭБ с 20 мм до 18 мм.

В модернизированном преобразователе с использованием высоко индуктивной катушки, работающей на малых токах, время накопления тока катушки увеличилось с 80 мкс (прототип) до ~1 мс. Появилась возможность использования более простого генератора, на триггере Шмитта, для запуска ключа со скважностью 2 (меандр). В качестве ключа использован маломощный высоковольтный (400 В) полевой

Га	б	π	и	т	а	1
l a	U.	л	и	ц	a	1

№	Тип	Индук-ть, мГн	Кол-во витков при последовательном соединении обмоток	Коммути-руемый ток, мА	Величина выбросов, В
1	ТИМ219Т	76	192	24	330
2	ТИМ238В	630	360	9	330
3	ТИМ239Т	216	320	12	330
4	ТИМ240В	203	288	15	330
5	ТИМ241В	1180	720	12	180
6	ТИМ242В	748	480	10	330
7	ТИМ250В	1800	960	15	160
8	Б18, секционированная	1170	1050	5	330

соединенными обмотками. Отметим, что пермаллоевый сердечник (как у ТИМ) в несколько раз превосходит ферритовый по индукции насыщения, что позволяет экономить на количестве витков. В гейгеровском приборе «ПОИСК-2»[3], разработанном в ИЯРФ, в ВВ-преобразователе использовался ТИМ-257В. Однако в ПОИСКе-2высоко индуктивная катушка на его основе работает в неоптимальном режиме, с перенасыщением сердечника. Ток в катушке достигает 30 мА, а выброс обратного хода составляет только 200 В из-за значительной межвитковой емкости, что не подходит для наших целей. Был испытан ряд катушек с целью определения оптимального варианта: коммутируемого тока менее 10 мА, обеспечивающего

транзистор. Принципиальная электрическая схема ВВ-преобразователя изображена на рис. 2.

Повышение качества стабилизации высокого напряжения достигалось путем оптимизации закона регулирования выходного напряжения. В модернизированном регуляторе использован пропорционально-интегральный (ПИ) закон регулирования [4] вместо интегрального в УРС-02. Закон реализован на операционном усилителе (ОУ) D6 и цепочке R26-C15 в цепи обратной связи ОУ. Рассчитанный ПИ-регулятор обеспечил установку выходного высокого напряжения с точностью и перерегулированием, не превышающими 1 %.

Ток потребления ВВ-преобразователя от источника постоянного напряжения от 6 до 10 В составляет 1,2 мА.



Рис. 2. Принципиальная электрическая схема ВВ-преобразователя

ЗЧУ-дискриминатор

ЗЧУ предназначен для усиления токовых импульсов с нейтронного счетчика, а также их фильтрации для подавления шумов усилителя и уменьшения вносимых извне помех. Для нормальной работы амплитудного дискриминатора необходимо обеспечить усиление напряжения, создаваемого токовыми импульсами счетчика на входном резисторе R10, в ~40000 раз. Принципиальная электрическая схема ЗЧУ представлена на рис. 3. Из теории известно, что наибольший вклад в отношение сигнал/шум дает первый каскад многокаскадного усилителя. Для достижения минимального шума желательно, чтобы коэффициент усиления первого каскада был больше коэффициентов усиления других каскадов [5]. Среднеквадратичное значение суммарного шума каскада определяется по формуле:

$$E_{\rm CK3} = \sqrt{E_{\rm CK3}^2 + E_{\rm CK3R}^2},$$



Рис. 3. Принципиальная электрическая схема ЗЧУ

ЗЧУ выполнен по трехкаскадной схеме усиления на малошумящих сдвоенных ОУ типа AD8626с малым потреблением по питанию(DA1 иDA2).

На выходе усилителя имеется пороговое устройство на компараторе D7 с задаваемым от ПК порогом дискриминации. С выхода компаратора счетные импульсы ТТЛ-уровня поступают в ПК.

Для обеспечения необходимой верхней граничной частоты усиления потребовались три последовательно включенных широкополосных усилительных каскада с относительно малым усилением (100, 20 и 20).Для этих каскадов из ряда малопотребляющих ОУ выбраныAD8626 с полевыми транзисторами на входе, как лучшие по шумовым характеристикам. Шумовое напряжение данных ОУ составляет $e_n = 17.5 \text{ HB}/\sqrt{\Gamma \mu}$.

где $E_{c\kappa_3R} = E_{nR} \cdot \sqrt{F}$ – среднеквадратичные значения тепловых шумов, а $E_{c\kappa_3OV} = E_{nOV} \cdot \sqrt{F}$ – среднеквадратичные значения внутренних шумов операционного усилителя, *F* – полоса пропускания.

Значение тепловых шумов определяется следующим образом:

$$E_{nR} = \sqrt{4kTR_{11} \left(\frac{R_{11}}{R_{10}} + 1\right)},$$

где *k*- постоянная Больцмана; *T* - температура, К.

Значение внутренних шумов ОУ определяется как:

$$E_{nOV} = \sqrt{\left(e_n \frac{R_{10} + R_{11}}{R_{10}}\right)^2 + \left(i_n R_{11}\right)^2},$$

где e_n – шумовое напряжение ОУ; i_n – шумовой ток ОУ.

При последующем усилении величина шума усилится. Таким образом, максимальное значение шума на выходе будет определяться следующим образом:

$$E = K_2 \cdot K_4 \cdot E_{\text{ск3}},$$

где $K_2 = 20$ – коэффициент усиления второго каскада, а $K_4 = 20$ – коэффициент усиления четвертого каскада.

При $R_{10} = 10$ МОм, $R_{11} = 100$ кОм и полосе F = 750 кГц имеем $E_{ck3} = 38,49$ мкВ, получаем:

 $E = 20 \cdot 20 \cdot 38,49 \cdot 10^{-6} = 15,4$ мВ (влиянием корректирующего С₂₅ = 3 пФ пренебрегаем из-за малости значения).

Чтобы дополнительно снизить напряжение шумов на выходе ЗЧУ а также уменьшить влияние вносимых извне электромагнитных помех, в схему ЗЧУ введены: фильтр верхних частот (разделительные конденсаторы C_{26} и C_{29} с соответствующими резисторами R_{12} и R_{18})и фильтр нижних частот (ФНЧ) второго порядка, построенный на ОУ и R_{15} , R16, R_{17} , C_{27} и C_{28} . Используемый ³Не-нейтронный счетчик имеет время сбора заряда ~4 мкс. Фильтры должны хорошо пропускать усиленные сигналы с нейтронного счетчика, максимально отсеивая шумы и помехи.

ФНЧ по схеме Салена – Кея, примененный в ранее прототипе ЗЧУ, не был оптимизирован по шумовым параметрам.

Для оптимизации ФНЧ использовано схемотехническое моделирование. По построенной модели ЗЧУ были получены формы сигналов на выходе (см. рис. 4) и шумовой спектр (см. рис. 5) при различных номиналах фильтровых емкостей C_{27} и C_{28} .

Соответствующая рис. 4 и 5 информация была занесена в табл. 2.



Рис. 4. Выходной сигнал модели ЗЧУ при различных параметрах ФНЧ



Рис. 5. Шумовой спектр модели ЗЧУ при различных параметрах ФНЧ

Т	a	бл	И	ц	а	2
---	---	----	---	---	---	---

Фильтр Параметр	График 1 (С ₂₇ = 300пФ, С ₂₈ = 600пФ)	График 2 (С ₂₇ = 150пФ, С ₂₈ = 330пФ)	График 3 (С ₂₇ = 100пФ, С ₂₈ = 200пФ)	График 4 (С ₂₇ = 50пФ, С ₂₈ = 100пФ)	График 5 (С ₂₇ = 16пФ, С ₂₈ = 32пФ)
Полоса пропускания F, кГц	41,5	79	128	251	780
ШумN, мВ	4,2	5,8	7,4	10,4	18,3
Амплитуда сигнала U, B	0,855	1,37	1,6	1,85	1,89
Отношение сигнал/шум U/N	203	236	216	177	103

По данным табл. 2 выбрано оптимальное по отношению сигнал/шум сочетание: $C_{27} = 50$ пФ и $C_{28} = 330$ пФ (ширина полосы пропускания F = 79 кГц).

Для организации двуполярного питания ЗЧУ от батареи использованы непрерывные стабилизаторы и преобразователь типа «charge-pump». Для защиты от помех, производимых «charge-pump»-микросхемой ICL7660, установлен экранирующий козырек над микросхемой и переключаемым конденсатором. Для устранения токовых помех, производимых ключами микросхемы «charge-pump», использован дроссель повышенной индуктивности (1 мГн).

Экспериментальная часть

Для проверки работы ЭБ к нему был подключен ³Не-нейтронный счетчик с полиэтиленовым замедлителем, рядом с последним был размещен калифорниевый источник нейтронов.

На рис. 6 приведена типовая форма отклика нейтронного импульса, зарегистрированная цифровым осциллографом TDS3052 на выходе ЗЧУ.



Рис. 6. Типовая форма импульса нейтронов

С помощью амплитудного спектрометра фирмы «Canberra» с программным обеспечениемGenie-2000 была снята амплитудная спектральная характеристика (см. рис. 7) выходных импульсов ЗЧУ.



Рис. 7. Амплитудная спектральная характеристика нейтронного детектора: 1 – шумы, 2 – пик обратного рассеяния, 3 – пик протонов отдачи (пик тепловых нейтронов)

На характеристике хорошо различимы пики: 1 – шумы, 2 – пик обратного рассеяния, 3 – пик протонов отдачи (пик тепловых нейтронов), полученные с НД. Модернизированный ЭБ обеспечивает существенное превышение полезного сигнала над шумом. Пик 2 превышает уровень шумов в несколько раз, поэтому гарантирована надежная регистрация нейтронных откликов с разной амплитудой. Потери при регистрации нейтронов практически исключаются.

Заключение

В результате проведенной модернизации ЭБ ³НеНД существенно (более, чем в два раза) улучшены его шумовые характеристики и параметры ЭМС благодаря:

 тщательному экранированию конструктивных элементов ЭБ;

 – снижению тока ключа ВВ-преобразователя при использовании высоко индуктивной накопительной катушки индуктивности вместо повышающего трансформатора;

- выбору наименее шумящих ОУ для ЗЧУ;

оптимизации полосового фильтра в ЗЧУ.

Характеристики ЭБ после модернизации:

– габариты ЭБ, объединяющего ВВ-преобразователь и ЗЧУ со стабилизирующим преобразователем – 103 × 37 × 18мм (снижена высота на 2 мм);

 потребление тока от батареи питания с напряжением от 6 до 10 В снижено с 9 мА до7,2 мА;

 действующее напряжение шумов и наводок на выходе ЗЧУ – 7,6 мВ;

 – задаваемый извне порог дискриминации (по умолчанию порог равен 110 мВ);

плавное установление высокого напряжения
 НД – выброс не более 1 %;

 максимальная скорость счета – до 1000 импульсов в секунду.

В модернизированном ЭБ использованы только покупные радиоэлементы.

Литература

1. Пикарь В. А., Родигин А. В. и др. Портативные приборы для поиска и идентификации радиоактивных материалов // Молодежь в науке: сборник докладов 11-й научно-технической конференции. 2013. № 11. С. 342–346.

2. Виноградов Ю. А. Ионизирующая радиация: обнаружение, контроль, защита. – М.: СОЛОН-Р, 2002. 224 с.

3. Дозиметр-индикатор ПОИСК-2. Руководство по эксплуатации. – ВНИИЭФ, 1989.

4. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство. Пер. с нем. – М.: Мир, 1982. С. 512.

5. Денисов Г. Шумы в электрических схемах с операционными усилителями // Электронные компоненты. 2003. № 3. С. 38–40.

СИСТЕМА ИНЖЕКЦИИ РЕЗОНАНСНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ БЕТА-8. РАСЧЕТЫ И ЭКСПЕРИМЕНТ

<u>А. М. Опекунов</u>, А. Н. Беляев, В. В. Кузнецов, Н. Н. Курапов, Л. Е. Поляков, Г. П. Поспелов, М. Л. Сметанин, А. В. Тельнов, М. И. Хромяк, Э. А. Шаравин, А. Н. Шеин, И. В. Шориков

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

В РФЯЦ-ВНИИЭФ создается мощный резонансный ускоритель электронов БЕТА-8 [1] на основе коаксиального полуволнового резонатора. Значения выходной средней энергии электронов – 1,5; 4,5; 7,5 МэВ; максимальная средняя мощность пучка – 300 кВт.

Из-за высокой проектной средней мощности пучка необходимо минимизировать или полностью исключить потери электронов на стенках резонатора и в каналах транспортировки пучка. По этой причине проведены расчеты динамических параметров электронного пучка системы инжекции, чтобы, по возможности, исключить потери тока на начальных этапах.

В работе приведены результаты численных расчетов динамики электронных сгустков с учетом объемного заряда в системе инжекции пучка. Для подтверждения правильности выбранной физико-математической модели, лежащей в основе численных расчетов, проведены испытания ВЧ инжектора с пучком.

Введение

Проведенные в РФЯЦ-ВНИИЭФ исследования по воздействию потоков электронного и тормозного излучений на конструкционные свойства материалов позволили получить многочисленные расчетнотеоретические и экспериментальные данные, где в качестве источника ионизирующего излучения использован линейный резонансный ускоритель электронов ЛУ-10-20 [2]. Совокупность полученных результатов дала основание для изучения проблем, связанных с необходимостью и возможностью создания нового более мощного ускорителя электронов.

Неординарность задачи заключается в том, что требуется получение электронного пучка с очень широким энергетическим спектром, с возможностью его регулировки. Такая необходимость обосновывается особым интересом к исследованию влияния энергетического спектра частиц и темпа ввода энергии на свойства материалов.

Создание резонансного ускорителя электронов БЕТА-8 обеспечит необходимые условия для проведения таких исследований. Помимо высокой средней мощности, техническая новизна ускорителя БЕТА-8 заключается в возможности генерации широкого перестраиваемого спектра электронов в диапазоне энергий от 1 до 8 МэВ. В настоящей работе основное внимание уделено системе инжекции электронного пучка. Элементы этой системы состоят из инжектора электронов с ВЧ генератором и тракта магнитной транспортировки пучка к ускорителю.

ВЧ инжектор предназначен для инжекции электронов в непрерывном режиме с энергией (50– 100) кэВ, средним током до 40 мА и частотой следования сгустков (0,01–100) МГц в ускоряющую область ВЧ поля резонатора ускорителя БЕТА-8.

1. Ускоритель БЕТА-8

Резонансный ускоритель электронов БЕТА-8 разработан на основе коаксиального полуволнового резонатора (тип колебаний T_1 , частота 100 МГц). Набор энергии электронным пучком осуществляется при многократном прохождении резонатора в его серединной поперечной плоскости. Возврат пучка в резонатор обеспечивают поворотные магниты, которые расположены снаружи корпуса резонатора. Ускоритель рассчитан на получение трех значений средней энергии электронов: 1,5; 4,5 и 7,5 МэВ, с максимальной средней мощностью пучка до 300 кВт.

После ускорения, в зависимости от выходной энергии, пучок электронов направляется по соответствующему каналу транспортировки, каждый из которых оснащен поворотными магнитами и фокусирующими магнитными линзами. На конечном участке транспортировки пучки с разными энергиями, с помощью выходного поворотного магнита, сводятся в общий канал вывода и доставляются к облучаемому объекту (рис. 1) [1].



Рис. 1. Схема ускорения: → – траектория движения пучка; D1 – D7 – поворотные дипольные магниты; S – соленоид; Q1 – Q9 – квадрупольные магнитные линзы

2. ВЧ инжектор

Основной частью инжектора является сеточноуправляемая термокатодная ВЧ пушка на основе высокочастотного четвертьволнового коаксиального резонатора 100 МГц. В табл. 1 приведены основные характеристики ВЧ инжектора.

Таблица 1

Основные характеристики ВЧ инжектора

Параметр	Значение
Максимальный средний ток электронов ВЧ инжектора, мА	40
Максимальная энергия электронов, кэВ	100
Длительность сгустков, нс	0,5–1
Максимальная частота повторения, МГц	100
Мощность ВЧ генератора, кВт	16
Допустимый рабочий вакуум, Па	10 ⁻⁴

Принцип работы ВЧ инжектора следующий [3]: электроны эмитируются из термокатодного узла с заземленной сеткой, создающего короткие электронные сгустки, которые ускоряются ВЧ электрическим полем, создаваемым в зазоре высокочастотного четвертьволнового коаксиального резонатора (рис. 2). Электронные сгустки формируются импульсами отрицательного напряжения на катоде. Фазовая длина импульсов 43° (1,2 нс на полувысоте). Регулирование среднего тока пучка производится как за счет изменения заряда в сгустках, так и за счет изменения частоты повторения сгустков. Длительность сгустков на выходе инжектора регулируется фазой эмиссии.



Рис. 2. Схематичное изображение резонатора ВЧ инжектора с силовыми линиями ускоряющего ВЧ поля: 1 – корпус резонатора; 2 – цилиндрический электрод; 3 – термокатодный узел; 4 – фокусирующий электрод; 5 – торцевая стенка резонатора с анодным отверстием;6 – устройство оперативной перестройки частоты резонатора; 7 – устройство фиксации электрода и предварительной настройки частоты резонатора

Размер ускоряющего зазора порядка 80 мм, частота ускоряющего поля около 100 МГц. Максимальное поверхностное электрическое ВЧ поле (4 МВ/м при 100 кВ) сосредоточено на краях фокусирующего

электрода (поз. 4 на рис. 2), вдали от оси резонатора. Из-за высокой напряженности, края этого электрода служат источником темновых токов автоэмиссии, которые остаются внутри резонатора и не попадают в канал для пучка. Таким образом, сгустки из инжектора выходят без примеси посторонних частиц тока автоэмиссии.

3. Численное моделирование пучка

Для определения основных узлов диагностического оборудования создаваемого стенда для испытания ВЧ инжектора с пучком, определения положения этих узлов в пространстве относительно канала транспортировки пучка, с помощью программ трехмерного электродинамического моделирования, к примеру, ASTRA (A Space Charge Tracking Algorithm) [4] построена компьютерная модель канала диагностики пучка, учитывающая реальные размеры и физические свойства основных элементов.

3.1. Моделирование динамических параметров пучка ВЧ инжектора

В процессе моделирования принимается, что с поверхности катода постоянно и равномерно эмитируются макрочастицы с энергией kT = 0,2 эВ. В зависимости от величины и знака электрического поля над катодом, являющимся суперпозицией полей, создаваемых потенциалом управляющей сетки и потенциалом анода, а также полей пространственного заряда уже эмитированных частиц, вновь эмитированные частицы либо ускоряются в этом поле и пролетают в резонатор, частично оседая на сетке, либо возвращаются на катод и больше не участвуют в дальнейшей динамике.

В моделировании используются 50000 макрочастиц, равномерно вылетающих в интервале времени 2 нс с поверхности катода. На сетку подается импульс напряжения в виде сглаженного прямоугольника с длительностью примерно 1 нс.

Для того чтобы все частицы вылетали из зазора резонатора без потерь и имели наибольшую энергию, сгустки должны эмитироваться из катодно-сеточного узла в определенной фазе ВЧ поля, меньшей 90° иметь достаточно малую длительность [5]. Численные расчеты динамики пучка в поле ускоряющего зазора ВЧ пушки проводились с учетом действия импульсных отпирающих напряжений, подаваемых на катод. Импульсы приходят в момент роста ВЧ напряжения на зазоре, в интервале фаз (31– 55) градусов, при амплитуде напряжения на зазоре 100 кВ, при среднем токе пучка 40 мА. На рис. 3 и 4 приведены характеристики сгустков, полученные в результате моделирования.

Согласно проведенным расчетам, оптимальная величина фазы эмиссии центра сгустка составляет 55°, когда величина ВЧ поля в резонаторе обеспечивает энергию частиц в сгустках 100 кэВ. Однако можно произвести продольное сжатие сгустков (\approx 1,4 раза), если выбрать фазу инжекции ниже. Для такого



Рис. 3. Расчетные динамические параметры пучка на выходе из ВЧ пушки (фаза эмиссии 55°): а – поперечный профиль сгустка; б – продольный профиль сгустка; в – продольное распределение линейной плотности заряда; г – диаграмма эмиттанса

сжатия достаточно сдвинуть фазу эмиссии сгустков из катода в ВЧ пушке с 55° до 31° (рис. 3,б и 4,б), при этом наблюдается незначительное увеличение их поперечных размеров (рис. 3,а и 4,а), которые не превышают размеров отверстия на выходе из инжектора в 32 мм. При этом энергия сгустков меняется незначительно: со 100 кэВ до 96 кэВ. Еще больше сдвигать фазу было бы нежелательно, из-за наступающего уменьшения заряда в сгустках. Расчетные характеристики сгустков на выходе из ВЧ инжектора приведены в табл. 2.

После ускорения в инжекторе, заряд в сгустке должен сохраняться на уровне 0,4 нКл, что соответствует значению тока в 40 мА (рис. 3,в и 4,в).

Расчетная диаграмма эмиттанса (рис. 3,г и 4,г) на выходе из ВЧ инжектора в обоих случаях ускорения соответствует расходящемуся пучку [6], т. к. диаграмма преимущественно занимает первый и третий квадранты координатной плоскости, что может привести к неприемлемым размерам пучка в процессе дальнейшей его транспортировки на заданное расстояние.

Согласно расчетам, рабочий режим работы ВЧ инжектора занимает диапазон фаз эмиссии 30° –55° при амплитуде напряжения 100 кВ. При фазах, меньших 30°, начинается ограничение заряда в сгустках, из-за того что головные частицы сгустка начинают эмитироваться в отрицательной фазе ВЧ в пушке и не могут вылететь за управляющую сетку. На верхней границе диапазона рабочих фаз сгустки получают максимальное ускорение. При фазах выше рабочего диапазона сгустки получают меньшее ускорение и удлиняются на всем протяжении дрейфа. Опасными являются фазы эмиссии $100^{\circ} - 210^{\circ}$, когда появляются обратно ускоренные электроны, мощность тока которых может достигать 300 Вт.



Рис. 4. Расчетные динамические параметры пучка на выходе из ВЧ пушки (фаза эмиссии 31°): а – поперечный профиль сгустка; б – продольный профиль сгустка; в – продольное распределение линейной плотности заряда; г – диаграмма эмиттанса

Таблица	2
---------	---

Расчетные характеристики сгустков на выходе из ВЧ инжектора (210 мм от катода)

Параметр	Значение		
Фаза эмиссии сгустков	55°	31°	
Средняя энергия, кэВ	100	96,1	
Длина сгустков (rms), мм	47,6	34,6	
Энергетический разброс (rms), кэВ	1,74	4,25	
Эмиттанс (rms), <i>π</i> ·мм·мрад	10,7	10,3	

3.2. Моделирование прохода пучка через систему магнитной транспортировки

Моделирование прохода пучка через систему диагностики (рис. 5) проводилось для энергии инжекции 100 кэВ для двух значений фаз эмиссии (31° и 55°). Исходя из ранее проведенных расчетов, пучок будет расширяться во время транспортировки по каналу, в соответствии с диаграммами эмиттансов (рис. 3,г и 4,г), что приведет к нежелательному рассеиванию на стенках канала. Поэтому, для поперечной фокусировки пучка в канале транспортировки необходимо воздействовать внешней возмущающей силой, уравновешивающей силу кулоновского расталкивания. Это можно осуществить путем использования фокусирующих магнитных полей, созданных с помощью системы соленоидов (см. рис. 5) с регулируемой индукцией магнитного поля.

После некоторых допущений и проведенного анализа, моделировалась проводка пучка в канале магнитной транспортировки, конфигурация полей в области которого образована тремя соленоидами (рис. 5). Результаты расчетов представлены на рис. 6 и 7.



Рис. 5. Схематическое изображение системы диагностики пучка: 1 – ВЧ пушка; 2 – первый соленоид; 3 – второй соленоид; 4 – третий соленоид; 5 – поглотитель электронов (цилиндр Фарадея)

В результате расчетов установлено, что в процессе транспортировки пучка фокусирующие магнитные поля формируют профили сгустков, которые на расстоянии 1460 мм от катода (координата поглотителя электронов, рис. 5) имеют вид, представленный на рис. 6,а,б и 7,а,б. В случае эмиссии в фазе 31° наблюдается уменьшение продольных размеров сгустка (\approx 2,5), по сравнению с фазой 55°. Напротив, поперечные размеры сгустка увеличиваются и приближаются к величине диаметра канала транспортировки, но не превышают их. Характеристики пучков сведены в табл. 3.

Расчетные характеристики сгустков на расстоянии 1460 мм от катода

Параметр	Значение			
Фаза эмиссии сгустков	55°	31°		
Энергия, кэВ	100	96,1		
Длина сгустков (rms), мм	52,89	19,30		
Поперечные размеры пучка (rms) σ_x / σ_y , мм	7,27/7,25	8,67/8,66		
Энергетический разброс, кэВ	1,9	2,03		
Эмиттанс (rms), <i>π</i> ·мм·мрад	10,0	11,5		

4. Испытания ВЧ инжектора

4.1. Измерение собственной резонансной частоты резонатора ВЧ инжектора

Резонатор ВЧ инжектора является основной составной частью инжектора электронов. При наличии соответствующего ВЧ питания (ВЧ сигнал со средней мощностью до 15 кВт на частоте 100 МГц) и обеспечении требуемых условий, создаваемых при помощи технологических систем водяного охлаждения и вакуумирования, в резонаторе возбуждаются электромагнитные колебания с напряженностью электрического поля достаточной для достижения электронами приращения энергии до 100 кэВ.

С использованием комплекта измерительных петель и анализатора цепей Agilent E5071С проведены измерения собственной частоты резонатора. Результаты измерений представлены на рис. 8 и 9.





Рис. 6. Расчетные динамические параметры пучка на расстоянии 1460мм от катода (фаза эмиссии 55°): а – поперечный профиль сгустка; б – продольный профиль сгустка; в – продольное распределение линейной плотности заряда; г – диаграмма эмиттанса

Рис. 7. Расчетные динамические параметры пучка на расстоянии 1460 мм от катода (фаза эмиссии 31°): а – поперечный профиль сгустка; б – продольный профиль сгустка; в – продольное распределение линейной плотности заряда; г – диаграмма эмиттанса



Рис. 8 Значение резонансной частоты резонатора и частот на уровне половинной мощности



Рис. 9 Значение резонансной частоты резонатора и частот на уровне половинной мощности с учетом водяного охлаждения корпуса

Проведенные «холодные» измерения показали, что собственная резонансная частота резонатора ВЧ инжектора f = 100,05328 МГц (рис. 8). При включении водяного охлаждения корпуса резонатора резонансная частота f = 100,05572 МГц. Дрейф резонансной частоты (сравнивая рис. 8 и 9) может происходить за счет изменения геометрии внутренней полости объемного резонатора вследствие разогрева или охлаждения стенок резонатора. Однако такой уход частоты (≈2 кГц) находится в пределах рабочего интервала (100 ± 0,4) МГц. Управление резонансной частотой осуществляется изменением емкости ускоряющего зазора, путем прогиба торцевой стенки резонатора. Прогиб осуществляется шаговым двигателем, который управляется системой фазовой автоподстройки частоты. Сигналы для работы системы фазовой автоподстройки частоты снимаются с одной из двух измерительных петель, расположенных по обе боковые стороны резонатора, симметрично.

Нагруженную добротность резонатора можно вычислить по формуле [7]:

$$Q = \frac{f_1}{f_3 - f_2},$$
 (1)

где f_1 – резонансная частота, f_2 и f_3 – частоты на уровне половинной мощности.

Исходя из полученных в эксперименте по определению собственной резонансной частоты резонатора ВЧ инжектора данных (рис. 8), оказывается, что $f_1 = 100,05328$ МГц, $f_2 = 100,04867$ МГц, $f_3 = 100,05675$ МГц. Таким образом, определим добротность контура, согласно выражению (1):

$$Q = \frac{f_1}{f_3 - f_2} = \frac{100,05328}{100,05675 - 100,04867} = 12400.$$
(2)

4.2. Стенд для испытания ВЧ инжектора с пучком

Для испытания ВЧ инжектора создан стенд с возможностью диагностики пучка электронов. Стенд включает в себя ВЧ инжектор и диагностическое оборудование (рис. 10). ВЧ мощность закачивается в инжектор генератором 16 кВт.

После оптимизации проведенных расчетов по транспортировке пучка в канале диагностики, были предложены рабочие параметры основных элементов канала диагностики, которые позволят без потерь транспортировать пучок к поглотителю электронов. Величину индукции магнитного поля на оси первого соленоида необходимо устанавливать в пределах (0–4) мТл, а второго – от 10 до 12 мТл.

В эксперименте с помощью двух пространственно-разделенных резистивных датчиков тока измерены энергии (50–100 кэВ), длительность (0,7– 1 нс) и пиковый ток сгустков (≈4 мкА).

Форма импульсов с датчиков тока меняется в зависимости от фазы эмиссии с сеточно-катодного узла. Случай, когда импульсы имеют одинаковую амплитуду (рис. 11 а), соответствует рабочей фазе 55° с максимальной энергией ускорения. Когда же второй импульс выше и короче первого, это означает, что проявляется эффект продольной группировки сгустков, тогда фаза меньше рабочей (рис. 11,б).

Из амплитуды полученных импульсов и частоты посыла импульсов был определен средний ток, который достигал 400 мкА.

Для измерения профиля пучка электронов на выходе тракта транспортировки была установлена выпускная титановая фольга с прикрепленной к ней рентгеновской пленкой. Титановая фольга толщиной 50 мкм, согласно расчетам, полностью поглощает электроны с энергией 100 кэВ. Поэтому оценку профиля сгустка можно произвести по распределению квантов тормозного излучения, возникающего в результате взаимодействия электронов с материалом фольги. Расчет распределения квантов тормозного излучения, вылетающих с фольги (рис. 12), проведен в программе численного моделирования методом Монте-Карло [8] с нормировкой на один электрон, падающий на выходную фольгу. Максимальное значение в распределении соответствует 2,37.10-4 квантам с одного участвующего в взаимодействии с веществом электроном. Ожидаемый диаметр пятна на пленке 10-12 мм. Используемый в расчетах профиль электронного сгустка, падающего на фольгу, представлен на рис. 13 (ток пучка 40 мкА).



Рис. 10. Схематическое изображение диагностической части стенда: 1 – ВЧ инжектор; 2 – фокусирующие соленоиды. Индукция магнитного поля на оси соленоидов регулируется в пределах от 0 до 15 мТл; 3 – высоковакуумный шибер; 4 –корректор положения пучка; 5 – соленоид для получения необходимого профиля пучка на оконечном устройстве; 6 –резистивные датчики тока, связанные коаксиальным кабелем с высокочастотным осциллографом. С их помощью возможно определять длительность сгустков и пиковый ток сгустков Датчик состоит из 16 одинаковых 50 Ом резисторов, включенных параллельно вокруг изолятора; 7 – водоохлаждаемый поглотитель пучка (цилиндр Фарадея); 8 –магниторазрядные насосы





Рис. 11. Осциллограммы импульсов с датчиков тока для разных фаз эмиссии: а – 55°, б – 31°. Разрешение горизонтальной оси 0,5 нс/клетку



Рис. 12. Нормированное распределение квантов тормозного излучения



Рис. 13. Профиль пучка электронов, падающего на выходную фольгу

Заключение

Проведены численные расчеты динамики электронных сгустков ВЧ инжектора с учетом объемного заряда для энергий инжекции 100 кэВ. С помощью создания системы магнитной транспортировки обеспечиваются условия, при которых размеры пучка не превысят апертуру канала инжекции, тем самым исключается рассеивание пучка на первых этапах его транспортировки.

Проведенные испытания подтвердили правильность понимания физических принципов ускорения высокоинтенсивных пучков электронов: физико-математические модели, которые легли в основу проведенных расчетов, адекватно описывают динамические параметры пучка на этапах его формирования, ускорения и транспортировки.

После проведения анализа экспериментов, сделан вывод о хорошем совпадении расчетных и измеренных динамических параметров пучка:

 рабочий режим работы ВЧ инжектора занимает диапазон фаз эмиссии 30°–55° при амплитуде напряжения 100 кВ;

• расчетная и измеренная длительность импульсов составляет около 1 нс;

• средний ток в эксперименте получен в интервале (4–400) мкА, который регулируется в зависимости от частоты повторения импульсов в диапазоне (0,01–1) МГц, что предсказывается расчетами.

Литература

1. Гладышев Е. Н., Гордеев В. С., Завьялов Н. В., Кузнецова Н. Н. и др. Состояние работ по проекту создания электронного резонансного ускорителя непрерывного действия БЕТА-8 // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. Сер. Научно-исследовательское издание. 2015. Вып. 20. Ч. 1. С. 184–193.

2. Zavyalov N. V., In'kov V. I., Lisovenko N. A., Punin V. T. et. al. Development of Radiation Technologies on VNIIEF LU-10-20 Linac // ВАНиТ. Сер. Яд.физ. Исслед. (34). 1999. № 3. С. 93.

3. Volkov V. N., Arbuzov V. S., Chernov K. N., Kurkin G. Ya. et. al. CW 100 keV electron RF injector for 40 mA average beam current // Proceeding of XXIV Russian Particle Accelerator Conference RUPAC. 2014. P. 309–311.

4. Floettmann K. Astra User's Manual. http://www. desy.de~mpyflo/Astra_documentation.

5. Опекунов А. М., Сметанин М. Л., Тельнов А. В., Шориков И. В. Расчеты динамических параметров электронного пучка резонансного ускорителя БЕТА-8 // Молодежь в науке: Сборник тезисов XIV научно-технической конференции. 2015. С. 50.

6. Физика и технология источников ионов. / Под ред. Я. Брауна: Пер. с англ. – М.: Мир, 1998.

7. Диафрагмированные волноводы: Справочник. / Вальднер О. А., Собенин Н. П., Зверев Н. П., Щедрин И. С. – М: Энергоатомиздат. 1991. 280 с.

8. Житник А. К., Донской Е. Н., Огнев С. П., Горбунов А. В. и др. Методика С-007 решения методом Монте-Карло связанных линейных уравнений переноса нейтронов, гамма-квантов, электронов и позитронов // ВАНТ Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2011. Вып. 1. С. 17–24.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭКСИМЕРНОЙ МОЛЕКУЛЫ XeBr, ДЛЯ ГАЗОВОЙ СМЕСИ Ar-Xe-CF₃CHClBr

А. В. Подкопаев

АО «ГНЦ РФ – ФЭИ им. А. И. Лейпунского», г. Обнинск Калужская обл.

Введение

Впервые термин эксимерная молекула прозвучал еще в начале 60-ых гг. в работах по спектрометрии, где рассматривались широкополосные континуумы излучения инертных газов, таких как He, Ar, Хе и Kr. Изучение спектров излучения газоразрядных ламп, показало, что плазмохимические процессы в инертных газах приводят к образованию возбужденных молекул, состоящих из нескольких атомов инертного газа, например, Xe₂*. Такие возбужденные димеры и стали называть эксимерами (от англ. excited dimer) [1]. Главной особенностью эксимерной молекулы является то, что при переходе из возбужденного состояния в основное она разрушается при этом, излучая свет с характерной для этого перехода длинной волны. Таким образом, молекула существует только в возбужденном состоянии, а основное состояние является слабосвязанным или разлетным. На рис. 1 представлена типичная диаграмма потенциальных кривых эксимерной молекулы, которая иллюстрирует процесс ее образования и распада.



Рис. 1. Диограмма потенциальных кривых эксимерной молекулы

Практически сразу после своего открытия излучение эксимерных молекул стало использоваться в экспериментальной физике, в качестве мощного источника света, благодаря своей высокой интенсивности. Уже в конце 60-ых годов начали возникать идеи использования эксимерных газовых сред, в качестве активной среды лазеров. Однако первый эксимерный лазер удалось создать только в 1970 г., и это был лазер на жидком ксеноне, созданный Н. Г. Басовым и сотрудниками [2]. В дальнейшем была получена генерация и на других диметрах инертных газов. Однако лазеры на чистых инертных газах не получили широкого развития из-за довольно жестких требований, которые диктовали необходимость мощного источника накачки и сложной установки с высокими давлениями инертных газов. Вместо этого активно развивались эксимерные лазеры на основе молекул, содержащих атомы инертных газов и атомы галогенов. Такие эксиплексные инертно-галоидные системы, способны излучать в довольно широком диапазоне длин волн, в зависимости от того, какие атомы входят в состав молекулы, от 161 нм у ArBr до 353 нм XeF. После того, как началось изучение инертно-галоидных эксимерных молекул, удалось получить лазерную генерацию на XeBr (282 нм), XeF (351 нм), XeCl (308 нм), KrF (248 нм), KrCl (222 нм), ArF (193 нм) [3].

В настоящее время эксимерные лазеры на основе инертно-галоидных систем являются одними из самых мощных лазеров. КПД в них может достигать 10 %, а энергосъем десятков джоулей с литра. Подобные лазерные установки используются повсеместно, как в научных целях, так и в качестве коммерческих установок в промышленности, медицине и других сферах. За несколько десятилетий эксимерные лазеры прошли долгий путь модернизаций и оптимизаций. Эти модернизации касались как изменений в способах накачки активной среды, так и в оптимизации параметров самой газовой лазерноактивной среды. В результате этого многие компании, такие как Coherent, Inc или ГНЦ РФ ТРИНИТИ выпускают серийные образцы установок, средняя мощность которых около 500 Вт. Однако, и сегодня существует ряд проблем, ограничивающих эффективность и надежность подобных эксимерных лазеров. Одной из таких проблем является использование в качестве донора атомов галогена крайне агрессивных химических соединений [4]. К сожалению, практически все простые соединения F, Cl, Br и других галогенов используемых в эксимерных лазерах являются токсичными и проявляют высокую химическую активность. Вполне естественно их использование накладывает целый ряд ограничений, связанных с безопасностью и кроме того ограничивает долговечность эксимерных лазерных установок. Все это делает задачу поиска новых доноров атомов галогена крайне актуальной.

Одним из возможных кандидатов, для использования в качестве донора Вг в эксимерной молекуле XeBr является фторотан. Фторотан или, как его называются в иностранной номенклатуре. галотан - это молекула co структурной формулой сложная СF₃CHClBr. Это вещество представляет собой бесцветную жидкость плотностью 1,87 г/см³, не токсичную, химически мало активную. Фторотан применяется в медицине и является активным компонентом препаратов для анестезии. При этом он имеет достаточное давление насыщенных паров (241 мм. рт. ст), чтобы использовать его в качестве компоненты газовой смеси лазерно- активной среды. Однако газовые смеси, содержащие фторотан, не использовалось для подобных целей ранее, и в научной литературе отсутствуют сведенья о важнейших люминесцентных характеристиках такой смеси. В данной работе описываются эксперименты, проведенные с целью изучения люминесценции эксимерной молекулы XeBr (282 нм), образованной в газовой смеси Ar-Xe-CF₃CHClBr, под воздействием пучка электронов со средней энергией 150 кэВ, а также данные полученные в ходе этих экспериментов.

Экспериментальная установка

Для проведения исследования была создана экспериментальная установка, схема которой изображена на рис. 2



Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 – камера, 2 – кварцевое окно, 3 – ускоритель электронов РАДАН-220, 4 – трубка ИМА150Э, 5 – спектрометр Мауа 2000 Рго, 6 – ФЭУ-106, 7 – монохроматор МДР-23, 8 – осциллограф Tektronix TDS 1012, 9 – компьютер,10 – мерная трубка, 11 – циркуляционный насос, 12 – титановый фильтр, 13 – охлаждаемая ловушка с цеолитом, 14 – блок питания ускорителя, 15 – газовые баллоны, 16 – насос ЗНВР-1Д, 17 – волоконный световод, 18 – блок синхронизации

В данной установке, рис. 2., к стальной камере *1* подключен компактный ускоритель электронов РАДАН-220 *3*, питаемый высоковольтным блоком питания напряжением 5 кВ *14*. Трубка этого ускорителя за импульс длительностью около 5 нс излучает в полость камеры примерно 10¹² электронов со средней энергией 150 кэВ. К камере подключена газовая система, позволяющая создавать газовую смесь с необходимыми параметрами. Для этой цели газовый контур можно предварительно вакуумировать насосом 3HBP-

1Д 16 до остаточного давления порядка 0,01 торр. Набор баллонов 15 содержит газы необходимые для эксперимента. В газовой схеме реализован контур очистки и циркуляции, в который входит камера, мембранный насос 11, титановый фильтр 12. Важным элементом является мерная трубка 10, которая отградуирована по объему относительно объема циркуляционного контура как 1:100. Такая трубка позволяет добавлять к смеси находящейся в контуре добавки газа давлением на уровне $0,01 \pm 0,005$ торр. Конструкция титанового фильтра такова, что если газ проходит внутрь он попадает в цилиндрическую полость объемом примерно 0,3 литра заполненную титановой стружкой. Цилиндр с титановой стружкой нагревается внешним электрическим нагревателем до температуры 700 °С. При нагреве титановая стружка адсорбирует на себя все составляющие газа, кроме инертных газов, что позволяет поддерживать чистоту газовой смеси.

Так как в работе установки приходится проводить множество экспериментов с использованием чистого Xe, в ней предусмотрена возможность очистки и регенерации этого довольно дорогостоящего газа. Для этих целей к камере подключена ловушка 13, представляющая собой цилиндрическую камеру объемом примерно 0,2 литра заполненную цеолитом CaA. После того как произведена очередная серия экспериментов с ксеноном, он очищается через титановый фильтр. Затем ловушка с цеолитом охлаждается жидким азотом, и цеолит адсорбирует на себе чистый ксенон. В последствии ксенон адсорбированный в цеолитовой ловушке, может быть возвращен в систему по средствам нагрева ловушки до температуры порядка 150 °C.

Излучение, вызванное взаимодействием исследуемой газовой смеси с пучком электронов, регистрируется через оптические окна, 2 установленные в камере. Это излучение попадает в монохроматор МДР-23 7, а также через волоконный световод 17 в спектрометр Maya 2000 Pro. Спектрометр позволяет получить спектр люминесценции в области длин волн от 200 до 1000 нм, с разрешением около 0,5 нм. Монохроматор выделяет интересующую линию спектра и направляет ее излучение на фотоэлектронный умножитель ФЭУ-106. Сигнал ФЭУ регистрируется осциллографом Tektronix TDS 1012, который дает возможность записать временную зависимость интенсивности сигнала с разрешением 2 нс. Вся информация от осциллографа и спектрометра сохраняется и обрабатывается на персональном компьютере.

Проведенные эксперименты

В ходе исследования с целью определения исследования люминесценции эксимерной молекулы XeBr^{*} в смеси Ar-Xe- CF₃CHClBr была проведена серия экспериментов. В этих экспериментах в смесь, содержащую 760 торр Ar, 15 торр Xe, добавлялись различные концентрации примеси CF₃CHClBr от 0,01 до 0,1 торр с шагом 0,01 торр. При этом схема эксперимента была следующей: 1) подготовка и очистка смеси Ar-Xe;

 добавление CF₃CHClBr и перемешивание полученной смеси;

3) пуск ускорителя и запись параметров люминесценции.

Данные, полученные в ходе этих экспериментов, представляют собой спектры люминесценции и временные зависимости интенсивностей люминесценции эксимерной молекулы XeBr^{*}, характерный вид которых для смеси с парциальным составом 760:15:0,05 изображен на рис. 3.



Обработка полученных данных

Рассматривая временную зависимость интенсивности люминесценции в логарифмическом масштабе, представленную на рис. 5, можно сделать несколько важных предположений. В первую очередь время накачки как минимум на порядок меньше времени полного распада всех молекул XeBr.



Рис. 3. Данные экспериментов: а – спектр люминесценции, б – временная зависимость интенсивности люминесценции эксимерной молекулы XeBr

После того как была проведена первая серия опытов, была выявлена зависимость интенсивности люминесценции от давления фторотана в смеси. Эта зависимость позволила определить оптимальную концентрацию добавки CF₃CHClBr. Кроме того, временные зависимости, полученные в этих экспериментах, позволили получить информацию о некоторых важных кинетических характеристиках.

Другая серия экспериментов была направлена на выяснение возможности усиления линии 282 нм полученной смеси Ar-Xe-CF₃CHClBr (760:15:0,05) давлением 1 атм, а также на получение данных, которые бы позволили оценить коэффициент усиления среды. С этой целью была построена оптическая схема, изображенная на рис. 4, в которой часть света покидающая камеру через одно из окон, возвращалась в камеру зеркалом. Спектр люминесценции регистрировался, при помощи спектрометра. Далее зеркало убиралось и записывался спектр люминесценции той же смеси. На основе сравнения двух спектров, полученных таким образом, производилась оценка усилительных возможностей среды методом, который будет описан ниже.



Рис. 4. Оптическая схема эксперимента по изучению усиления среды



Рис. 5. Зависимость логорифма интенсивности люминесценции от времени для смеси Ar-Xe-CF₃CHClBr (760:15:0,05)

Это позволяет воспользоваться зависимостью наклона кривой высвечивания от концентрации добавки, чтобы определить константу тушения молекулы XeBr* фторотаном. Однако стоит заметить, что спад люминесценции в логарифмическом масштабе имеет несколько линейных участков, что скорее всего свидетельствует о довольно сложном механизме тушения, в котором участвуют по меньшей мере 3 компоненты смеси. Кроме того, возможно, что в области спада интенсивности люминесценции все еще происходит образование молекулы XeBr*, по средствам других более медленных реакций. Все эти факты говорят о том, что для более точного описания характеристик полученной среды необходимо построить довольно сложную кинетическую модель, в которой необходимо учесть большое число плазмохимических реакций образования и распада молекул XeBr*. Однако для первоначальной грубой оценки можно воспользоваться упрощенной моделью. Для этого предложим, что на всей кривой высвечивания имеется линейный участок, наклон которого к оси, все же зависит от концентрации фторотана,

и характеризует скорость процесса тушения эксимерной молекулы этой добавкой. В таком случае, анализируя все участки кривой в зависимости от концентрации фторотана можно заметить, что наклон средней области имеет зависимость от концентрации, в то время как для других участков эта зависимость относительно мала. Примем этот участок спада интенсивности как искомый, тогда анализ графика зависимости обратного времени высвечивания от концентрации (рис. 6) позволит приближенно оценить константу тушения фторотаном, а также эффективное время высвечивания эксимерной молекулы XeBr* в смеси Ar-Xe-CF₃CHClBr. Анализ результатов измерений показал, что величина константы тушения фторотаном составляет 3 ± 1.10^{-10} см³/с, эта оценка хорошо согласуется с данными для других доноров брома, исследованных в работе [5]. Эффективное время высвечивания составило примерно $1.8 \pm 0.3 * 10^{-7}$ c.



Рис. 6. Зависимость обратного времени высвечивания среды от давления фторотана

Для оценки коэффициента усиления воспользуемся следующей моделью. Для оптической схемы, изображенной на рис. 4, в предположении, что коэффициент усиления не зависит от времени, поток света пришедший за время импульса люминесценции в светоприемник:

$$\Phi_1(\lambda) = \int \frac{N_0 S}{4\pi (a-x)^2} e^{\mu(\lambda)(l-x)} dx.$$

В случае, когда присутствует зеркало, с коэффициентом отражения, к потоку добавляетя поток:

$$\Phi_2(\lambda) = \rho(\lambda) \int \frac{N_0 S}{4\pi (2b + x + a)^2} e^{\mu(\lambda)(x+l)} dx.$$

Отношение двух этих потоков имеет явную зависимость от коэффициента усиления, такую же, как и отношение интенсивностей линий люминесценции среды на различных длинах волн, которые измеряются экспериментально. Зная этот факт, можно построить расчетные кривые для зависимости отношения двух потоков от коэффициента усиления. Далее откладывая на них экспериментальные точки отношений интенсивностей пиков, определить коэффициент усиления на данной длине волны. К сожалению, такое определение коэффициента усиления является довольно грубой оценкой, так как на самом деле параметры среды довольно сильно меняются с течением импульса. Кроме того, геометрические параметры активной зоны сильно зависят от параметра пуска электронов, что так же вносит ошибку в сделанную оценку. Однако, несмотря на это, данный метод позволяет качественно оценить усилительные возможности среды, а также произвести первичную грубую оценку коэффициента усиления, который исходя из полученных данных составляет не менее чем 1,3 · 10⁻³ см⁻¹.

Заключение

В ходе экспериментального исследования удалось получить достаточно высокую интенсивность люминесценции эксимерной молекулы XeBr^{*} (282 нм) при возбуждении смеси Ar-Xe- CF₃CHClBr пучком заряженных электронов. Для смеси Ar-Xe-CF₃CHClBr, с парциальным составом аргона и ксенона 760:15, использующей в качестве донора молекулы Br фторотан, была проведена оптимизация по давлению донора. Максимальная люминесценция смеси на длине волны 282 нм, была получена при давлении фторотана 0.05 ± 0.001 Торр. Кроме того, данные полученные в ходе эксперимента позволили оценить величину коэффициента тушения фторотаном, а также эффективное времени высвечивания среды. Анализ усилительных свойств среды показал, что данная смесь имеет положительный коэффициент усиления на длине волны 282 нм. Все эти факты говорят о том, что исследованная молекула CF₃CHClBr подходит в качестве донора Br в эксимерной лазерно-активной среде. По мнению автора, целесообразно дальнейшее изучение свойств данной молекулы, с целью создания эксимерного лазера на ее основе.

Автор выражает свою глубочайшую признательность, всем сотрудникам отдела 111 АО ГНЦ РФ - ФЭИ оказывавшим поддержку в исследовании, как на этапах создания экспериментальной установки, так и на этапе проведения экспериментов и обсуждения их результатов. В особенности хочется поблагодарить А. И. Миськевича, который является научным руководителем автора данной работы, так как его роль оказалась решающей при выборе данной темы исследования.

Литература

1 Birks J. B. The exciplex. N. Y. – San-Francisco - L.:Acad. Press, 1975. P. 39-74.

2 Басов Н. Г., Данилычев В. А., Ходкевич Д. Д. // Письма в ЖЭТФ. 1970. V. 12, № 10, С. 473.

3 Фортов В. Е. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Серия Б, том 11, книга 4. – М.: Издво «Наука», 2005, 831 с.

4 Basting D., Pippert K., Stamm U. History and future prospects of excimer laser technology. RIKEN Review, No. 43, 2002.

5 Wilson W. L., Jr., Williams R. A., Sauerbrey R. Formation and quenching kinetics of electron beam excited Xe₂Br. Houston, Texas 77251.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ПОЛОЖЕНИЯ ПУЧКА ДЛЯ РЕЗОНАНСНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ БЕТА-8

<u>Л. Е. Поляков</u>, Н. Н. Курапов, А. М. Опекунов, А. В. Тельнов, Э. А. Шаравин, А. Н. Шеин, И. В. Шориков, И. А. Юрьев

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

Создаваемый в РФЯЦ-ВНИИЭФ резонансный ускоритель электронов БЕТА-8 предназначен для генерации электронного пучка со средней энергией ускоренных электронов от 1,5 до 7,5 МэВ и средней мощностью пучка до 300 кВт [1]. Чтобы минимизировать потери электронов на стенках резонатора и в каналах транспортировки, необходимо разработать систему диагностики и корректировки положения пучка.

Для определения положения пучка разработана система электростатических датчиков, представляющая собой цилиндрическую камеру и четыре электрода (пикап-электроды) в виде небольших дисков, смонтированных заподлицо с внешней поверхностью камеры.

Разработан магнитный корректор положения пучка, который служит для изменения (корректировки) траектории пучка в поперечной плоскости. При соответствующей реализации электрической схемы питания обмоток, корректор может работать как квадрупольная линза.

Для отработки режимов работы системы диагностики были проведены тестовые испытания на лабораторном стенде. Результаты испытаний хорошо согласуются с теоретическими расчетами.

Введение

Принцип работы (рис. 1) ускорителя БЕТА-8 основан на многократном проходе электронного пучка через один ускоряющий резонатор [1]. Возможность многократного прохода электронов через ускоряющие зазоры резонатора осуществляется с помощью поворотных электромагнитов, расположенных снаружи корпуса резонатора.



Рис. 1. Схема ускорения — траектория движения пучка; D1 – D7 – поворотные дипольные магниты; S – соленоид; Q1 – Q9 – квадрупольные магнитные линзы

Исходя из высоких требований к качеству транспортируемого электронного пучка в ускорителе, используемый метод диагностики положения пучка на разных участках траектории должен оказывать минимальное воздействие на пучок и не разрушать его. Ниже представлены результаты разработки монитора положения пучка на основе системы емкостных датчиков.

В случае однопроходного режима работы ускорителя, рассматриваемого в настоящей работе, магнитный корректор устанавливается на выходе из резонатора. После корректора устанавливается монитор положения пучка, позволяющий диагностировать отклонение пучка, от центральной оси. Управляя током в катушках корректора, можно отклонять электронный пучок на некоторые углы и, таким образом, задавать требуемое положение пучка, необходимое для успешного прохода через поворотный магнит и выхода на следующий этап ускорения.

Такую работу необходимо выполнять на каждом этапе ускорения электронов перед последовательным включением следующих поворотных магнитов.

Физические принципы действия емкостного датчика

В общем случае емкостной датчик представляет собой систему из двух проводников, один из которых является сигнальным электродом, а другой заземлен.

Идея измерений состоит в том, что электрическое поле, создаваемое пучком заряженных частиц, индуцирует ток в цепи, в которую включен электрод (рис. 2). Так как поле, создаваемое пучком, изменяется во времени, то на этом электроде мы можем определить изменяющийся во времени сигнал [2].



Рис. 2. Принцип работы датчика тока



Рис. 3. Принцип работы емкостного датчика и его эквивалентная схема

Пусть пластина, расположенная на расстоянии a от оси пучка, имеет площадь A и длину l вдоль оси пучка (рис. 3).

Ток $I_{\text{нав}}$, создаваемый зарядом $Q_{\text{нав}}$, который наводится на пластину электрическим полем пролетающего пучка, определяется, как

$$I_{\text{HaB}}(t) = \frac{dQ_{\text{HaB}}}{dt} = -\frac{A}{2\pi al} \frac{dQ_{\text{ПУЧКА}}(t)}{dt}.$$
 (1)

Ток пучка электронов, имеющих скорость β, можно определить по формуле [2]

$$\frac{dQ_{\Pi Y^{\rm YKA}}}{dt} = \frac{l}{\beta c} \frac{dI_{\Pi Y^{\rm YKA}}}{dt} = -\frac{l}{\beta c} \cdot i\omega I_{\Pi Y^{\rm YKA}} \left(\omega\right), \qquad (2)$$

где ток пучка выражен в частотно зависимой форме $I_{\text{пучка}}(\omega) = I_0 e^{-i\omega t}$, ω – частота ускоряющего электрического поля.

В качестве сигнала датчика принимается падение напряжение на резисторе *R*

$$U_{\text{HaB}}(\omega) = RI_{\text{HaB}} = Z_{\text{датчика}}(\omega) \cdot I_{\text{пучка}}(\omega), \quad (3)$$

где Z_{датчика} – полное сопротивление датчика.

Датчик имеет некоторую емкость *C*, которая определяется расстоянием от его поверхности до пучка и емкостью кабеля. Тогда, используя эквивалентную схему датчика (рис. 2), можно вычислить полное сопротивление датчика

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{R} + i\omega C \quad \Leftrightarrow \quad Z = \frac{R}{1 + i\omega RC}.$$
 (4)

В итоге напряжение на выходной цепи датчика определяется следующим образом [2]

$$U_{\text{HAB}}(\omega) = \frac{R}{z + i\omega RC} \cdot I_{\text{HAB}} = \frac{1}{\beta c} \cdot \frac{1}{C} \cdot \frac{A}{2\pi a l} \times (5)$$
$$\times \frac{i\omega RC}{1 + i\omega RC} \cdot I_{\text{ПУЧКА}} = Z_{\text{ДАТЧИКА}}(\omega) \cdot I_{\text{ПУЧКА}}(\omega).$$

Моделирование монитора положения пучка

Монитор положения пучка представляет собой цилиндрическую камеру и четыре электрода (пикапэлектроды) в виде небольших дисков, смонтированных заподлицо с камерой. Каждый электрод подключен к внешней цепи через вакуумный ввод с согласованным сопротивлением 50 Ом (рис. 4).



Рис. 4. Устройство монитора положения пучка

Принцип определения положения пучка основан на сравнении амплитуд напряжений сигналов с двух противоположных датчиков [3]. Так как датчики равноудалены от центральной оси камеры, то при пролете пучка вдоль нее они должны фиксировать одинаковые сигналы, а при отклонении пучка по одной из поперечных осей сигнал будет меняться на соответствующей паре датчиков (рис. 5). Причем чем меньше расстояние от одной из пластин до центра масс пучка, тем выше наводимое напряжение.



Рис. 5. Схематичное изображение работы монитора положения пучка (разность напряжений $\Delta U = U_{\text{Hu3}} - U_{\text{Bepx}}$ есть показатель отклонения пучка от оси)

Так как в качестве вакуумного ввода датчиков использован ВЧ разъем СРГ-50-312ФВ, который имеет штырь под распайку, то геометрия секции вакуумной камеры и самих датчиков выбрана с учетом размеров разъема. Апертура канала транспортировки пучка составляет 60 мм.

В программе трехмерного электродинамического моделирования построена модель монитора положения пучка. Получены расчетные импульсы напряжений на датчиках положения при прохождении электронного пучка, как по оси канала транспортировки, так и с некоторым смещением от нее.

В первом случае сигналы с датчиков считывались перед входным отверстием в резонатор на расстоянии 840 мм от катода инжектора. В плоскости эмиссии задавался заряд пучка величиной 0,4 нКл. Длительность импульса составляла 1 нс. После прохождения ускоряющего зазора ВЧ инжектора [4] и системы фокусирующих соленоидов, пучок имеет среднюю энергию 96 кэВ, максимальный поперечный размер – 15 мм. Длительность сгустка – 0,85 нс. На рис. 6 представлены смоделированные зависимости выходного напряжения четырех датчиков положения пучка от времени, причем буквенные индексы обозначения напряжений соответствуют определенному расположению датчиков в канале транспортировки пучка.





При прохождении пучка по центру канала транспортировки все датчики имеют одинаковые пиковые значения напряжения. Минимум амплитуды напряжения составляет – 660 мВ, а максимум – 460 мВ. Время между пиками соответствует времени пролета самого электронного сгустка.

Для проверки теоретических выводов моделировалось смещение пучка по оси у на 10 мм от центра (рис. 7). Результаты моделирования представлены на рис. 8.

Сравнивая рис. 6 и рис. 8, можно сделать вывод, что уменьшение расстояния от пучка до датчика с индексом *A* приводит к увеличению минимального и максимального пиковых значений амплитуды напряжений до – 1,49 В и 880 мВ. Отдаление датчика *С* от центра пучка приводит к снижению амплитуд напряжений до – 310 мВ и 260 мВ, соответственно. Небольшое снижение сигналов на остальных датчиках обусловлено также увеличением расстояния до пучка.



Рис. 7. Схематичное расположение датчиков в канале транспортировки пучка

В дополнение к этому были рассчитаны зависимости импульсов напряжений сигналов с датчиков монитора положения пучка, установленного после одного прохода через ускоряющий резонатор, где средняя энергия электронов составляет 1,688 МэВ. Максимальный поперечным размером пучка электронов в данном месте – 18 мм, длительность электронного импульса 0,7 нс. На рис. 9 представлены результаты данных



Рис. 8. Расчетные зависимости импульсов напряжений с четырех датчиков (энергия электронов 96 кэВ, пучок смещен вдоль оси у на 10 мм)

расчетов. Минимум напряжения составляет – 940 мВ, а максимум – 750 мВ. Смещение пучка на 10 мм дает увеличение амплитуды напряжения сигнала на датчике A до –1,7 В в минимуме, и до 1,1 В в максимуме, а на датчике C – 650 мВ в минимальной точке и 750 мВ – в максимальной (рис. 10).

Можно сделать вывод, что данные сигналы будет возможно зафиксировать с помощью осциллографа. При этом следует отметить, что в расчетах не учитывается реальное ослабление сигнала в передающей цепи, что может внести определенную поправку при проведении экспериментальных измерений.



c

Рис. 9. Расчетные зависимости импульсов напряжений с четырех датчиков (энергия электронов 1,688 МэВ)

Экспериментальная часть

Перед проведением тестовых испытаний работоспособности монитора положения пучка была проведена его калибровка.

В процессе калибровки установлено, что при одинаковых условиях имеет место некоторая неравномерность в распределении потенциалов в датчиках, которая может быть обусловлена не полной идентичностью в изготовлении данных узлов. Эта проблема решена путем расположения попарно каждого датчика-электрода таким образом, чтобы каждый из них давал примерно одинаковый сигнал.

Для калибровочных измерений использовался возбудительный элемент, на который подавался импульсный сигнал длительностью 100 нс с амплитудой напряжения в диапазоне 20–60 мВ. Каждый датчик поочередно устанавливался на расстоянии 2 мм от этого возбудителя и подключался к осциллографу. Результаты калибровочных измерений амплитуд напряжений на датчиках (U_{max}, U_{min}) при различных напряжениях питающего генератора представлены в таблице.

четырех датчиков (энергия электронов 1,688 МэВ,

положение пучка смещено вдоль оси у на 10 мм)

По результатам выборки, представленным в таблице, датчики были распределены на следующие пары: 1–2 и 3–4. Несмотря на то, что сигналы датчиков из одной пары отличаются от сигналов датчиков другой, такая выборка позволяет по разности амплитуд сигналов адекватно оценивать положение пучка в канале транспортировки.

Для проведения тестовых испытаний монитора положения пучка будет использован стенд с диагностическим оборудованием для испытаний ВЧ инжектора ускорителя БЕТА-8. Схематическое изображение диагностической части стенда представлено на рис. 11.

U _{ren} , B	Датчик 1		Датчик 2		Датчик 3		Датчик 4	
	U _{max} , мВ	U _{min} , мВ	U _{max} , мВ	U _{min} , мВ	U _{max} , мВ	U _{min} , мВ	U _{max} , мВ	U _{min} , мВ
20	36,8	-30	35,8	-27,6	40	-32	38	-30,8
40	54,4	-45	52,4	-42,8	58,8	-50	57,6	-48
60	71,2	-60,8	69,2	-57,8	75,2	-63,6	73,6	-61,6

Результаты калибровочных измерений



Рис. 11. Схематическое изображение диагностической части стенда: 1 – ВЧ инжектор; 2 – фокусирующие соленоиды; 3 – высоковакуумный шибер;4 – корректор положения пучка; 5 – соленоид для получения необходимого профиля пучка на оконечном устройстве; 6 – резистивные датчики тока; 7 – монитор положения пучка; 8 – водоохлаждаемый поглотитель пучка; 9 – магниторазрядные насосы

При небольших смещениях пучка от центра датчика для вычисления координат его центра масс могут быть применены линейные комбинации сигналов с использованием масштабных нормировочных коэффициентов [3]. Для датчика, координаты центра электродов которого расположены на осях *x* и *y* (рис. 6), можно применить следующие соотношения:

$$x = M_x \frac{U_A - U_C}{U_A + U_C} \qquad \text{if } y = M_y \frac{U_B - U_D}{U_B + U_D}, \quad (6)$$

где U_A , U_B , U_C , U_D – выходные напряжения датчиков с обозначениями, соответствующими их схематичному расположению (рисунок 7), M_x , M_y – масштабные нормировочные коэффициенты соответствующих поперечных осей.

Аналитический расчет масштабных коэффициентов с учетом нелинейности для монитора положения пучка круглого сечения основан на применении теоремы Грина о взаимности [5]. Измерение сигналов датчиков на стенде и их последующая обработка с помощью численных методов может являться альтернативным методом расчета характеристик датчиков [6].

Заключение

В связи с необходимостью создания системы диагностики положения пучка в ускорителе БЕТА-8 спроектирован монитор положения пучка на основе емкостных датчиков. Выбор такого метода диагностики обусловлен наличием многопроходной системы проводки пучка в разрабатываемой установке и, соответственно, требованием минимизации влияния внешних возмущающих факторов на пучок.

В программе трехмерного электродинамического моделирования была создана модель монитора положения пучка, рассчитаны сигналы напряжений датчиков положения для пучка электронов. Смоделирована работа монитора положения пучка в случае смещения центра масс сгустка относительно продольной оси. Датчик сконструирован и рассчитан таким образом, чтобы в реальных условиях можно было регистрировать импульсы напряжений с электродов непосредственно на осциллографе без предварительного усиления сигнала.

Система диагностики пучка в дальнейшем будет отработана на испытательном стенде.

Литература

1. Гладышев Е. Н., Гордеев В. С., Завьялов Н. В., Кузнецова Н. Н. и др. Состояние работ по проекту создания электронного резонансного ускорителя непрерывного действия БЕТА-8. // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. Сер. Научно-исследовательское издание. 2015. Вып. 20. Ч. 1. С. 184–193.

2. Fork P. Lecture Notes of Beam Instrumentation and Diagnostics // Proc. Of JUAS 2011. Darmstadt, Germany, 2011.

3. Смалюк В. В. Диагностика пучков заряженных частиц в ускорителях // Параллель, Новосибирск, 2009.

4. Volkov V. N., Arbuzov V. S., Chernov K. N., Kurkin G. Ya. et. al. CW 100 keV electron RF injector for 40 mA average beam current // Proceeding of XXIV Russian Particle Accelerator Conference RUPAC. 2014. P. 309–311.

5. Kim S. H. Calculating BPM Coefficients with Green's Reciprocation Theorem // Proc. Of PAC 2001. Chicago, USA, 2001. Vol. 2. P. 1348–1350.

6. Shinoe K., Nakamura N., Katsura T., Kamiya Y. Design and Calibration of Picap-Electrodes for Beam Position Monitoring at SOR-RING // Proc. Of PAC 1993. Washington, USA, 1993. P. 2337–2339.

ЗАВИСИМОСТЬ СПЕКТРАЛЬНЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗЛУЧЕНИЯ Fe²⁺:ZnSe-ЛАЗЕРА С НАКАЧКОЙ DF-ЛАЗЕРОМ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ АКТИВНОГО ЭЛЕМЕНТА

Е. В. Салтыков, А. А. Манешкин, Р. С. Чуваткин, С. В. Харитонов, В. С. Цыкин, А. В. Захряпа

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

Исследованию различных кристаллов в качестве лазерных активных веществ, спектр излучения которых находится в диапазоне длин волн от 3 мкм до 5 мкм, уделяется большое внимание [1–10] в связи с нарастающей потребностью таких излучателей в технических и научно-исследовательских приложениях. Одной из перспективных лазерных сред для указанного спектрального диапазона являются кристаллы на основе соединения ZnSe, легированными ионами Fe²⁺ [1, 11].

Кристалл Fe²⁺:ZnSe имеет сильную зависимость времени жизни верхнего лазерного уровня иона Fe²⁺ от температуры [1, 7, 12–15]: ≈100 мкс при температуре жидкого азота и не более 360 нс при 292 К [7, 13, 15]. Для эффективной накачки данного кристалла необходимо подобрать лазерный источник, спектр излучения которого попадает в область наибольшего поглощения данного активного элемента. Таким образом, использование для накачки нецепного электро-разрядного DF-лазера с длительностью лазерного импульса ≈250 нс, спектр излучения которого полностью попадает в полосу поглощения кристалла Fe²⁺:ZnSe, позволяет получать генерацию Fe²⁺:ZnSe-лазера в широком диапазоне температур. Применение DF-лазера для накачки так же дает возможность реализации импульсно-периодического режима работы.

Экспериментальная установка

Активный элемент (АЭ) (рис. 1) Fe^{2+} :ZnSeлазера был вырезан из монокристалла Fe^{2+} :ZnSe, выращенного из паровой фазы химическим транспортом в водороде на монокристаллической затравке [16–18]. Легирование ионами Fe^{2+} проводилось непосредственно в процессе роста. Концентрация ионов Fe^{2+} составила $0.8 \cdot 10^{18}$ см⁻³.

На рис. 2 приведена схема экспериментальной установки по исследованию спектральных и энергетических характеристик Fe^{2+} :ZnSe-лазера при накачке излучением DF-лазера. Лазер накачки работал как в моноимпульсном, так и в импульсно-периодическом режимах. Температура активного элемента варьировалась от -30 °C до +80 °C.



Рис. 1. Внешний вид АЭ - кристалла Fe²⁺:ZnSe

АЭ 6, рис. 2, представлял собой цилиндр с диаметром 30,4 мм и длиной (длина усиления) 10,6 мм, торцы которого были отполированы и не имели просветляющего покрытия. АЭ закреплялся в медном хладопроводе, изменение температуры осуществлялось с помощью термоэлектрического модуля. Теплоотвод осуществлялся системой с жидкостным охлаждением Accelero Hybrid. Резонатор лазера Fe²⁺:ZnSe образован «глухим» плоским зеркалом 7 и плоским полупрозрачным выходным зеркалом 8. Коэффициент отражения выходного зеркала на длине волны генерации составлял 80 %, длина резонатора – 130 мм. Fe²⁺:ZnSe –лазер находился внутри камеры, внешний вид которой представлен на рис. 3, излучение накачки заводилось через окно 4. Окна камеры 4,5 выполнены из плоскопараллельных пластин CaF2 без просветляющих покрытий. Для предотвращения появления конденсата на АЭ герметичная камера продувалась сухим техническим азотом до влажности ≈2 %.



Рис. 2. Схема экспериментальной установки Fe^{2+} :ZnSeлaзера: 1 – DF лазер, 2 – оптический растр, 3 – камера наполненная техническим азотом, 4 и 5 – окна камеры, 6 – кристалл Fe^{2+} :ZnSe, 7 и 8 – зеркала оптического резонатора



Рис. 3. Внешний вид камеры

Источником накачки служил импульснопериодический электроразрядный DF-лазер. Дли-

тельность импульса составляла 250 нс. Пятно излучения накачки диаметром 10 мм формировалось на поверхности АЭ с помощью оптического растра состоящего из зеркальных ячеек. Излучение накачки падало на АЭ под углом 20° к оптической оси резонатора. Спектр излучения DF-лазера полученный с помощью монохроматор-спектрографа MS5204i, состоял из нескольких линий, сосредоточенных

в диапазоне от 3,55 мкм до 4,1 мкм. Подробный спектр представлен на рис. 4.

Результаты экспериментов

На рис. 5 представлены спектры излучения генерации Fe^{2+} :ZnSe-лазера при различной температуре АЭ.

При комнатной температуре (+20 °C) АЭ спектр излучения Fe²⁺:ZnSe-лазера лежит в диапазоне от 4,32 мкм до 4,62 мкм, при -30 °С от 4,3 мкм до 4,55 мкм, при +80 °С от 4,45 мкм до 4,66 мкм. Отмечено изменение спектрального состава излучения: наблюдаются смещение пика и изменение формы спектрального распределения при изменении температуры. При охлаждении АЭ происходит смещение спектра генерации в коротковолновую часть (при температуре $A\Im = -30$ °C пик спектра генерации сместился на 45 нм), а при нагревании в длинноволновую часть спектра (при температуре $A\Im = +80$ °C пик спектра генерации сместился на 35 нм). По всей видимости, это происходит из-за изменения сечения усиления АЭ [14]. Ширина спектра по уровню 0,1 уменьшается как при нагревании, так и при охлаждении АЭ и составляет: при -30 °C $\Delta\lambda = 180$, при $+20 \degree C \Delta \lambda = 215$, при $+80 \degree C \Delta \lambda = 180$.



Рис. 5. Спектр излучения Fe²⁺:ZnSe-лазера при различной температуре АЭ: кривая 1 – при температуре АЭ –30 °C, кривая 2 – при температуре АЭ +20 °C, кривая 3 – при температуре АЭ +80 °C



Рис. 6. Осциллограммы: 1 – импульса излучения DF-лазера; 2 – импульса Fe²⁺:ZnSe-лазера при различной температуре АЭ

Получены формы импульсов накачки и генерации при различных температурах АЭ, результаты представлены на рис. 6.

Как видно из осциллограмм, при температурах АЭ +20 и +30 °С импульс генерации Fe²⁺:ZnSe лазера после начального резко выраженного пика повторяет форму импульса накачки. Однако при дальнейшем нагревании АЭ длительность импульса генерации по основанию уменьшается, из-за уменьшения коэффициента усиления АЭ. Длительность импульса накачки и генерации на полувысоте составляет от 200 нс до 280 нс и от 140 нс до 200 нс, соответственно. Видно, что импульс генерации задержан относительно импульса накачки на 120 нс.

На рис. 7 представлено изменение КПД Fe^{2+} :ZnSe-лазера по поглощенной энергии накачки в зависимости от температуры АЭ. Наблюдается увеличение КПД при охлаждении АЭ, и уменьшение КПД при нагреве АЭ. Причина данного изменения сильная зависимость времени жизни верхнего лазерного уровня иона Fe^{2+} от температуры [1, 7, 12–15].



Рис. 7. Изменение КПД Fe²⁺:ZnSe-лазера по поглощенной энергии накачки в зависимости от температуры АЭ

Реализована работа Fe²⁺:ZnSe-лазера с частотой следования импульсов 10Гц в течение 5секунд благодаря импульсно-периодическому режиму работы лазера накачки. На рис. 8 показана работа Fe²⁺:ZnSeлазера в импульсно-периодическом режиме. Видна высокая стабильность КПД Fe²⁺:ZnSe-лазера по поглощенной энергии накачки, наблюдается небольшое изменение энергии генерации, это связано с нестабильностью энергии DF-лазера от импульса к импульсу. Средняя мощность Fe²⁺:ZnSe-лазера при температуре AЭ –30 °C больше на 36 %, чем при при температуре AЭ +20 °C.



Рис. 8. Энергия генерации (а) и КПД Fe²⁺:ZnSe-лазера по поглощенной энергии накачки (б) в импульсно-периодическом режиме с частотой следования импульсов 10 Гц. Черные точки при температуре АЭ –30 °C, серые точки при температуре АЭ +20 °C

Заключение

В работе реализован импульсно-периодический режим работы Fe²⁺:ZnSe-лазера при накачке электроразрядным DF-лазером.

Получены спектры излучения генерации Fe²⁺:ZnSe-лазера при различной температуре АЭ. При охлаждении АЭ происходит смещение длины волны генерации в коротковолновую часть спектра, а при нагревании в длинноволновую часть спектра.

Получены формы и длительности лазерных импульсов DF-лазера и Fe²⁺:ZnSe-лазера при различной температуре AЭ. При нагревании АЭ длительность импульса генерации по основанию уменьшается.

Получена зависимость КПД Fe²⁺:ZnSe-лазера по поглощенной энергии накачки от температуры АЭ. Наблюдается увеличение КПД при охлаждении АЭ, и уменьшение КПД при нагреве АЭ. Максимальный КПД по поглощенной энергии накачки составил 35,2 %. Реализована стабильная работа Fe^{2+} :ZnSe-лазера с частотой следования импульсов 10Гц в течение 5секунд. Средняя мощность Fe^{2+} :ZnSe-лазера при температуре AЭ –30 °C больше на 36 %, чем при при температуре AЭ +20 °C.

Литература

1. Adams J. J., Bibeau C., Page R. H., Krol D. M., Furu L. H., Payne S. A. 4,0–4,5 μ m lasing of Fe:ZnSe below 180K, a new mid-infrared laser material, Optics Letters, 24 (1999) 1720–1722.

2. Акимов В. А., Воронов А. А., Козловский В. И., Коростелин Ю. В., Ландман А. И., Подмарьков Ю. П., Фролов М. П. Эффективный ИК лазер на кристалле ZnSe:Fe с плавной перестройкой в спектральном диапазоне 3,77–4,40 мкм, Квантовая электроника, 34 (2004) 912–914.

3. Kernal J., Fedorov V. V., Gallian A., Mirov S. B., Badikov V. V. 3,9-4,8 µm gain-switched lasing of Fe:ZnSe at room temperature, Optics Express, 13 (2005) 10608–10615.

4. Akimov V. A., Frolov M. P., Korostelin Y. V., Kozlovsky V. I., Landman A. I., Podmar'kov Y. P., Voronov A. A. Room-temperature operation of a Fe²⁺:ZnSe laser, Proceedings of SPIE, 6610 (2007) 661009-1-6.

5. Mirov S. B., Fedorov V. V., Moskalev I. S., Martyshkin D. V. Recent Progress in Transition-Metal-Doped II–VI Mid-IR Lasers [Invited Paper], IEEE Journal of quantum electronics, 13 (2007) 810-822.

6. Jelínková H., Koranda P., Doroshenko M. E., Šulc J., Jelínek M., Cech M., Basiev T. T., Badikov V. V., Badikov D. V. Room-temperature lasing, gainswitched bulk, tunable Fe:ZnSe laser, 7721 (2010) 772111-772116.

7. Mirov S., Fedorov V., Moskalev I., Martyshkin D., Kim C. Progress in Cr^{2+} and Fe^{2+} doped mid-IR laser materials, Laser & Photonics Reviews, 4 (2010) 21-41.

8. Mirov S. B., Fedorov V. V., Martyshkin D., Moskalev I. S., Mirov M. Progress in Mid-IR Lasers Based on Cr and Fe-Doped II–VI Chalcogenides, IEEE Journal of selected topics in quantum electronics, 21 (2015) 1601719.

9. Mirov S. B., Fedorov V. V., Martyshkin D. V., Moskalev I. S., Mirov M. S., Gafarov O., Martinez A., Peppers J., Smolski V., Vasilyev S., Gapontsev V. Mid-IR Gain Media Based on Transition Metal Doped II-VI Chalcogenides, Proceedings of SPIE, 9744 (2016) 97440A-1-8.

10. Mirov S., Fedorov V., Martyshkin D., Moskalev I., Mirov M., Vasilyev S. High Average Power Fe:ZnSe and Cr:ZnSe Mid-IR Solid State Lasers, Optical Sociey of America, (2015).

11. Великанов С. Д., Зарецкий Н. А., Зотов Е. А., Казанцев С. Ю., Кононов И. Г., Коростелин Ю. В., Манешкин А. А., Фирсов К. Н., Фролов М. П., Юткин И. М. Лазер на ZnSe:Fe²⁺ с энергией излучения 1,2 Дж при комнатной температуре, Квантовая электроника, (2015). 12. Fedorov V. V., Mirov S. B., Gallian A., Badikov D. V., Frolov M. P., Korostelin Y. V., Kozlovsky V. I., Landman A. I., Podmar'kov Y. P., Akimov V. A., Voronov A. A. 3,77–5,05-µm Tunable Solid-State Lasers Basedon Fe²⁺-Doped ZnSe Crystals Operating at Low and Room Temperatures, IEEE Journal of quantum electronics, 42 (2006) 907-917.

13. Myoung N., Fedorov V. V., Mirov S. B., Wenger L. E. Temperature and concentration quenching of mid-IR photoluminescence in iron doped ZnSe and ZnS laser crystals, Journal of Luminescence, 132 (2012) 600–606.

14. Adams J. J. New Crystalline Materials for Nonlinear Frequency Conversion, Electro-Optic Modulation, and Mid-Infrared Gain Media, in, (2002).

15. Frolov M. P., Korostelin Y. V., Kozlovsky V. I., Mislavskii V. V., Podmar'kov Y. P., Savinova S. A., Skasyrsky Y. K. Study of a 2-J pulsed Fe:ZnSe 4- μ m laser, Laser Physics Letters, 10 (2013). 16. Kozlovsky V. I., Akimov V. A., Frolov M. P., Korostelin Y. V., Landman A. I., Martovitsky V. P., Mislavskii V. V., Podmar'kov Y. P., Skasyrsky Y. K., Voronov A. A. Room-temperature tunable mid-infrared lasers on transition-metal doped II–VI compound crystals grown from vapor phase, Physica Status Solidi B, 247 (2010) 1553–1556.

17. Ландман А. И. Парофазный рост монокристаллов соединений А^{II}В^{VI}, легированных переходными металлами, для лазеров среднего ИК-диапазона, Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Долгопрудный, (2009), с. 151.

18. Akimov V. A., Frolov M. P., Korostelin Y. V., Kozlovsky V. I., Landman A. I., Podmar'kov Y. P., Voronov A. A. Vapour growth of II-VI single crystals doped by transition metals for mid-infrared lasers, Phys. Stat. Sol., 3 (2006) 1213–1216.

ЭФФЕКТИВНАЯ ДИОДНАЯ НАКАЧКА ЛАЗЕРНОГО КВАНТРОНА В ШИРОКОМ ТЕМПЕРАТУРНОМ ДИАПАЗОНЕ

Е. С. Сафронова, А. Е. Дормидонов

ФГУП «ВНИИА им. Н. Л. Духова», Москва

В докладе рассмотрена возможность использования мощных лазерных диодных решеток (ЛДР) плотной упаковки с интенсивностью излучения более 10 кВт/см² для накачки активных лазерных кристаллов твердотельных лазерных генераторов. Экспериментально и теоретически исследованы характеристики ЛДР в температурном диапазоне от минус 50 до плюс 50 °C. Определены оптимальные спектральные характеристики ЛДР, для обеспечения эффективного поглощения излучения активным кристаллом во всем рассмотренном температурном диапазоне.

Поколение твердотельных лазеров с полупроводниковой накачкой, по сравнению с лазерами с ламповой накачкой, обладает рядом важных преимуществ. Полупроводниковые лазерные диоды характеризуются высокой, до 60 %, эффективностью преобразования мощности электрического питания в мощность оптического излучения. Спектр излучения лазерных диодов представляет собой сравнительно узкую линию (2-4 нм), которую возможно эффективно согласовать с линиями поглощения ионов активного кристалла. Поэтому применение относительно дорогостоящей полупроводниковой накачки позволит достичь значения суммарного КПД лазера на уровне 2-3 %, тогда как КПД аналогичных ламповых систем на порядок ниже. Так, системы лазерной инициации взрывчатых составов, разрабатываемые в национальных лабораториях США (SandiaNLs) и Франции (TDA ARMEMENTS SAS) на основе радиационно-стойких твердотельных лазеров сламповой накачкой, имеют КПД порядка 0.5 % при времени срабатывания от 50 до100 мкс [1, 2].

Длина волны излучения лазерного диода значительно зависит от его температуры. Смещение длины волны $d\lambda/dT$ составляет от 0,22 до 0,33 нм/°С [3].

В диапазоне от -50 °C до +50 °C, соответствующем условиям, в которых необходимо обеспечить работоспособность лазерного генератора, сдвиг $\Delta\lambda_P$ центральной длины волны достигает до 33 нм. Так, если при 20 °C центральная длина волны λ_P полупроводникового излучателя равна 812 нм, то при изменении температуры лазерного диода в указанном диапазоне λ_P будет смещаться в интервале от 795 до 820 нм.

Сечение поглощения $\sigma(\lambda)$ кристаллов, легированных ионами Nd³⁺, использующихся в качестве активного элемента лазерного генератора, практически не зависит от температуры [4]. В спектре $\sigma(\lambda)$ кристалла Nd³⁺:YAG (рис. 1) присутствуют острые пики сильного поглощения и провалы, в которых поглощение мало. При изменении температуры лазерного диода на десятки градусов излучение накачки попадает в провалы спектра поглощения активных ионов Nd³⁺, что приводит к увеличению длины поглощения от нескольких миллиметров до сантиметра и более. Поэтому может происходить изменение распределения инверсной населенности в активном кристалле, что сказывается на режиме генерации и эффективности лазерного генератора.



Рис. 1. Сечение поглощения $\sigma(\lambda)$ кристалла Nd³⁺:YAG



Рис. 2. Фотография фрагмента излучающей области ЛДР

В качестве оптической накачки для лазерных генераторов предлагается использовать ЛДР СЛМ-П-2Н специально разработанные ОАО НПП «Инжект» по заказу ВНИИА. ЛДР СЛМ-П-2Н состоит из 16 плотно упакованных блоков (80 линеек), разделенных промежуточными охлаждающими пластинами. Отдельный блок состоит из пяти диодных линеек GaAlAs длиной 5 мм и толщиной 100 мкм. Мощность излучения каждой линейки в блоке составляет около 50 Вт при амплитуде силы тока питания 55 А. Размер излучающей области решетки равен 9,5 × 5 мм. Заявленная производителем максимальная световая мощность решетки составляет не менее

4 кВт, при этом плотность оптического излучения ЛЛР СЛМ-П-2Н достигает значения 8 кВт/см². Эффективность конверсии п_м мощности электрического питания в мощность оптического излучения составляет около 50 %. Расходимость излучения не превышает 40 ° по быстрой оси и 15 ° по медленной оси. На рис.2 приведена фотография увеличенного фрагмента излучающей области ЛДР серии СЛМ-П. Для исследования характеристик ЛДР накачки при изменении температуры рассмотрим ЛДР СЛМ-3, спектральные свойства которых аналогичны ЛДР СЛМ-П-2Н. ЛДР СЛМ-З является серийной продукцией ОАО НПП «Инжект» и состоит из 50-ти 25ваттных линеекGaAlAs. Суммарная световая мощность данной ЛДР составляет 1,25 кВт при амплитуде силы тока питания 30 А. Размер излучающей области решетки равен 25 × 5 мм. Схема измерительного стенда представлена на рис.3.

Пять ЛДР СЛМ-3 закреплялись внутри термостата с прозрачным корпусом. Охлаждение термостата осуществлялось жидким азотом, а повышение температуры – омическим нагревателем. Измерение температуры ЛДР производилось калиброванной платиновой термопарой. Через прозрачный корпус термостата поочередно регистрировались параметры излучения каждой из пяти ЛДР. Для измерения спектра использовался оригинальный спектрометр с перестраиваемой рабочей полосой шириной до 100 нм и спектральным разрешением 0,3 нм. Мощность излучения регистрировалась пироэлектрическим сенсором Ophir PE-50.



Рис. 3. Схема измерительного стенда

На рис. 4 в относительных единицах приведен спектр излучения $P(\lambda)$ ЛДР СЛМ-3 (серийный номер SM4), измеренный при различной температуре. При 25 °С центр спектральной кривой находится на длине волны 805,7 нм. Ширина спектра по полувысоте составляет около 2 нм. С изменением температуры происходит сдвиг спектрального максимума излучения ЛДР, достигающий $\Delta \lambda_P \approx 14$ нм при $\Delta T = 50$ °С. При этом форма спектра остается практически неизменной.

Зависимости центральной длины волны спектра и мощности ЛДР от температуры приведены на рис. 5. Как видно из рис. 5,а центральная длина волны излучения практически линейно зависит от температуры. Рассчитанное методом наименьших квадратов смещение длины волны $d\lambda/dT$ составляет

в среднем 0,28 нм/°С. Световая мощность начинает падать с нагревом ЛДР (рис.5б). При температуре 70 °С уменьшение мощности составляет около 15 %.



Рис. 5. Зависимости от температуры: а – центральной длины волны спектра, б – мощности ЛДР СЛМ-3

Зависимость ширины запрещенной зоны от температуры описывает эмпирическая формула, применимая для многих полупроводников:

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta}.$$
 (1)

Для GaAs $E_g(0) = 1,519$, коэффициенты $\alpha \approx -0.9 \times 10^{-4}$ мЭв/К, $\beta \approx 204$ К. Из выражения (1) получим смещение длины волны генерации:

$$\frac{d\lambda}{dT} = -\frac{\lambda^2}{c} \frac{1}{h} \frac{dE_g}{dT} = \frac{\alpha \lambda^2}{hc} \left(1 - \left(\frac{\beta}{T+\beta}\right)^2 \right)$$
(2)

В окрестности 800 нм расчетное значение $d\lambda/dT \approx 0.25$ нм/°С, что хорошо согласуется с экспериментальным значением.

Длина поглощения (по уровню мощности e^{-1}) $l_{abs}(T)$ излучения накачки в активном кристалле находится из решения трансцендентного интегрального уравнения

$$\int P_P(\lambda, T) \exp\{-\sigma(\lambda) N_{GM} l_{abs}(T)\} d\lambda =$$

$$= e^{-1} \int P_P(\lambda, T) d\lambda$$
(3)

где $\sigma(\lambda)$ – сечение поглощения активного элемента (рис. 1), N_{GM} – концентрация активных ионов в кристалле.

На рис. 6 сплошной линией приведено решение данного уравнения для ЛДР СЛМ-3 в диапазоне изменения температуры от -25 °C до +75 °C при концентрации ионов Nd³⁺ 1 % ат. В рассмотренном диапазоне величина l_{abs} изменяется от 2 до 12 мм.



Рис. 6. Длина поглощения *l*_{abs} излучения ЛДР СЛМ-3 в кристалле Nd³⁺:YAG 1 % ат

Пунктирной линией представлена длина поглощения излучения с шириной спектра 10 нм. Видно, что в данном случае амплитуда изменения l_{abs} становится меньше в три раза, по сравнению с узкополосной ЛДР. Кроме того, ЛДР с широким спектром дешевле, так как при их изготовлении не требуется точная спектральная селекция составляющих линеек.

Из анализа экспериментальных и теоретических исследований характеристик ЛДР в температурном диапазоне от -50 °C до +50 °C определены оптимальные спектральные характеристики ЛДР, для обеспечения эффективного поглощения излучения активном кристаллом во всем рассмотренном температурном диапазоне. Установлено, что для эффективной накачки активных кристаллов лазерного генератора необходимо использовать ЛДР с шириной спектра излучения 8–10 нм.

Литература

1. Morelli G., *Design and Assembly Strategies for Two Laser-Optical Firing Systems*. Proc. of SPIE, 2007. 6662: P. 666202.

2. Goujon J. et al. Synchronous initiation of optical detonators by Q-Switched solid laser sources. Proc. of SPIE, 2008. 7115: p. 71150P.

3. Schilling B. W. et al. *End-pumped monoblock laser for eyesafe targeting systems*, 2006, US ARMY RDECOM CERDEC Night Vision and Electronic Sensors Directorate (NVESD) Ft. Belvoir, VA 22060.

4. Ernst Wintner, et al., *Laser Ignition of Engines* – A Contribution to Environmental Protection and a Challenge to Laser Technology. ANNUAL JOURNAL OF ELECTRONICS, 2014.
РАСЧЕТ ИНДУКТИВНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В КОНСТРУКЦИИ СУБНАНОСЕКУНДНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ

А. А. Селезнев, С. Л. Эльяш, А. Л. Юрьев

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

В РФЯЦ-ВНИИЭФ осуществляется разработка экспериментального образца субнаносекундного ускорителя электронов на базе малогабаритного ускорителя APCA [1] с газонаполненным формирователем. Длительность субнаносекундного импульса не должна превышать 0,3 нс при максимальной энергии электронов 800 кэВ.

Для того чтобы получить подобные временные параметры импульса, применяются обостряющие и срезающие разрядники. При этом, чтобы обеспечить малые времена переходных процессов и уменьшить длительность импульса, разрядники должны обладать минимальной индуктивностью.

Цель работы – расчет индуктивности срезающего разрядника и выбор конструкции разрядника, позволяющей уменьшить его индуктивность.

Актуальность работы заключается в том, что в предлагаемой конструкции формирователя электроды разрядников имеют сложную форму и малую индуктивность (единицы нГн), которую нельзя измерить или рассчитать, используя аналитические формулы [2, 3]. Ниже приводятся некоторые способы решения данной проблемы.

1. Устройство и принцип работы формирователя субнаносекундных импульсов напряжения

На рис. 1 схематично представлена конструкция формирователя субнаносекундных импульсов напряжения. Его работа заключается в следующем. На формирующую линию 1 с генератора Аркадьева-Маркса поступает импульс напряжения с длительностью фронта т < 10 нс. При срабатывании разрядника 2 происходит зарядка короткой формирующей линии 5 от линии 1 за время, меньшее 1 нс. Катушка индуктивности 4 при этом служит для зарядки межэлектродной емкости разрядника 2. После зарядки короткой линии 5 срабатывает разрядник 6, и линия 5 разряжается на передающую линию 7. При этом в линии 7 формируется импульс напряжения с субнаносекундным фронтом и длительностью, которая определяется двойным пробегом волны разрядки по короткой линии 5 и равна 0,3 нс. Дополнительное сокращение длительности импульса осуществляется при помощи срезающего разрядника 8, который срабатывает на вершине субнаносекундного импульса и уменьшает длительность его среза (спада).

Срезающий разрядник состоит из выдвижного электрода 9 и участка внутреннего электрода 10 пе-

редающей линии 7. Передающая линия подключена к ускорительной трубке 11. Внутренние детали трубки сконструированы как проводники линии с распределенными параметрами, что позволяет предельно снизить искажения поступающего на трубку субнаносекундного импульса.

Эффективность работы срезающего разрядника сильно зависит от суммарной индуктивности искрового пробоя и электродов разрядника [4]. Увеличение индуктивности элементов срезающего разрядника приводит к увеличению длительности импульса и паразитным колебаниям. Поэтому на этапе разработки конструкции разрядника необходимо определять его индуктивность и принимать меры для ее снижения.



Рис. 1. Конструкция формирующего устройства: 1 – формирующая линия; 2, 6 – обостряющие разрядники; 3 – наносекундный делитель напряжения; 4 – катушка индуктивности; 5 – короткая формирующая линия; 7 – передающая линия; 8 – межэлектродный зазор срезающего разрядника; 9 – выдвижной электрод срезающего разрядника; 10 – участок внутреннего электрода передающей линии; 11 – ускорительная трубка

5 1 15

2. Способы определения индуктивности

Для решения поставленной задачи были предложены следующие способы:

1) Проведение расчета, используя аналитические формулы. Для этого необходимо: разбить поверхностный ток в электродах разрядника на элементарные нити тока, просуммировать собственные и взаимные индуктивности для каждой нити тока, используя аналитические формулы, и найти значение общей индуктивности. Вычисления осложнены расчетом взаимных индуктивностей нитей тока из-за наличия несимметричных элементов.

 Проведение расчета, используя теорию четырехполюсников. Для этого: представить разрядник в виде четырехполюсника с эквивалентной схемой;

 в программе моделирования физических процессов смоделировать прохождение импульсов тока и напряжения через разрядник;

 – разложить в ряды Фурье эти импульсы и провести их спектральный анализ;

 – решить уравнения четырехполюсника и определить его индуктивность для каждого значения частоты.

Трудности заключаются в составлении эквивалентной схемы замещения, в которой бы исключалась магнитная связь между индуктивными элементами.

3) Проведение расчета в программе моделирования физических процессов. Для этого в магнитостатическом режиме рассчитать индуктивности электродов разрядника по выделившейся электромагнитной энергии W при прохождении по ним тока величиной I по формуле (1):

$$L = \frac{2W}{I^2} \tag{1}$$

4) Проведение расчета, измеряя индуктивности макетов электродов больших размеров. Для этого:

 изготовить макеты электродов разрядника в масштабе, значительно большем единицы (5:1, 10:1 и т. д.);
 измерить их индуктивности и определить за-

висимость от масштаба; — определить искомую индуктивность при масштабе, равном единице.

Для расчетов был выбран третий способ, как наиболее простой.

3. Расчеты в программе моделирования физических процессов

3.1. Построение расчетных моделей

Индуктивность срезающего разрядника рассчитывалась как сумма индуктивностей участка внутреннего электрода передающей линии 7 (рис. 1) и выдвижного электрода срезающего разрядника с каналом искрового пробоя.

Модель выдвижного электрода срезающего разрядника с каналом искрового пробоя представлена на рис. 2. Она построена по сочетанию выдвижного электрода длиной $l_{3\pi}$ и последовательно соединенного с ним канала искрового разряда длиной l_{pagp} .

Искровой пробой моделировался в виде сплошного цилиндрического проводника диаметром 1 мм. Длина разряда $l_{pasp} = 4$ мм обусловлена требованием величины напряжения пробоя азотного промежутка 800 кВ при его давлении 40 атм. Выдвижной электрод также выполнен сплошным, его диаметр равен 4 мм.

Имитация подачи тока осуществлялась при помощи токового порта, подающего постоянный ток величиной 1 А через торцевую поверхность сечения проводников модели.

С целью снижения индуктивности срезающего разрядника было предложено выполнить участок *10* (рис. 1) в виде двух усеченных конусов. Для расчета индуктивности этого участка построена расчетная модель (рис. 3) половины биконического электрода, которая участвует в процессе среза импульса.



Рис. 2. Модель выдвижного срезающего разрядника с каналом искрового пробоя: 1 – канал искрового пробоя; 2 – выдвижной электрод

Построение расчетной модели проводилось для импульсов длительностью не более 0,3 нс, что соответствует частоте порядка нескольких ГГц. Для такойчастоты характерно распространение токов в некотором поверхностном слое металлических проводников (скин-слое), толщину которого можно оценить по формуле [5] (2):

$$\Delta = c \sqrt{2 \frac{\varepsilon_0}{\omega \mu_m} \rho} \tag{2}$$

где $\varepsilon_0 = 8,85419 \cdot 10^{-12} \, \Phi/\text{м}$ – диэлектрическая постоянная вакуума, ρ – удельное сопротивление, *c* – скорость света, μ_m –относительная магнитная проницаемость, $\omega=2\cdot\pi\cdot f$ – циклическая частота, *f* – частота. Для рассматриваемого случая толщина скин-слоя составляет 0,7 мкм.

Для упрощения расчетов предполагалось, что ток распространяется только в скин-слое, равномерно распределяясь по его сечению. Поэтому модель представляет собой тонкую (толщина 50 мкм) проводящую оболочку в виде усеченного конуса с основаниями диаметром 17 мм и $(37-2 \cdot l_{37})$ мм, где l_{37} – длина выступающей части электрода срезающего разрядника. Длина l_{37} изменялась в диапазоне от 2 мм до 10 мм с шагом 0,5 мм. Такой диапазон обусловлен кострукцией и принципом работы срезающего разрядника в данных условиях.



Рис. 3. Модель половины биконического электрода

При длине выдвижного электрода $l_{3\pi} = 10$ мм биконический электрод в виде усеченного конуса вырождается в цилиндрический.

3.2. Экспериментальная проверка корректности результатов расчета

Для оценки корректности расчетов индуктивностей было сделано следующее:

 в программе моделирования физических процессов построена расчетная модель биконического электрода, которая представляет собой медную оболочку толщиной 50 мкм (рис. 4). Размеры оболочки были выбраны таким образом, чтобы ее индуктивность была достаточной для измерения приборами. Согласно расчету, она составляет;

2) из медной фольги толщиной 50 мкм по размерам модели был изготовлен макет;

3) произведен замер индуктивности макета на измерителе иммитанса МНИПИ Е7-20 (диапазон измерения индуктивности $10^{-11} - 10^4$ Гн, базовая погрешность ±0,1 %). Подключение макета осуществлялось через подводящие провода. Индуктивность макета не превышает десятков нГн, поэтому при ее измерении необходимо учитывать индуктивность подводящих проводов. В этом случае индуктивность макета определяется как разность суммарной индуктивности и индуктивностей подводящих проводов;



Рис. 4. Расчетная модель конусной оболочки

Индуктивность подводящих проводов зависит от их взаимного расположения, поэтому при ее измерениях макет конусной оболочки заменялся на медный проводник длиной l = 160 мм и диаметром d = 0,9 мм, индуктивность который рассчитывается по формуле:

$$L = 2 \cdot l \cdot \left(\frac{\ln(4 \cdot l)}{d} - 1\right) \tag{3}$$

и равна 178 нГн. Измеренное значение суммарной индуктивности проводника равно 230 нГн. Тогда индуктивность подводящих проводов будет равна:

$$L_{\text{пров}} = 230 - 178 = 52 \text{ н}\Gamma\text{н}$$

Далее была замерена суммарная индуктивность модели конусной оболочки с подводящими проводами, ее значение равно 93 нГн. Тогда индуктивность $L_{\text{к.о.}}$ модели равна:

$$L_{\text{K.O.}} = 93 - L_{\text{пров}} = 41 \,\text{н}\Gamma\text{н}$$

При расчетах индуктивности конусной оболочки в программе моделирования физических процессов было получено значение $L_{\kappa.o.}^{\text{теор}} \approx 48,1 \,\text{нГн.}$

4) сравнение $L_{\kappa.o.}$ и $L_{\kappa.o.}^{\text{теор}}$ показало, что они отличаются друг от друга не более чем на 15 %. Это демонстрируют хорошее соответствие экспериментальных результатов с расчетами, проводимых в программе моделирования физических процессов.

3.3. Результаты расчетов

В расчетах вычислялись значения собственной индуктивности элементов срезающего разрядника в зависимости от длины $l_{3Л}$ выдвижного электрода. При этом диаметр основания конуса внутреннего проводника d_{KOH} зависел от длины $l_{3Л}$ следующим образом:

$$d_{\rm KOH} = 37 - 2 \cdot l_{\rm 2H} \tag{4}$$

В табл. 1 приведены результаты расчетов суммарной индуктивности выдвижного электрода и канала искрового пробоя в зависимости от длины $l_{2\pi}$.

Результаты расчетов суммарной индуктивности выдвижного электрода и канала искрового пробоя от длины *l*_{эл}.

$l_{_{\rm ЭЛ}},$ мм	Индуктивность, нГн
10,0	13,19
9,5	12,76
9,0	12,35
8,5	11,91
8,0	11,49
7,5	11,06
7,0	10,64
6,5	10,21
6,0	9,79
5,5	9,36
5,0	8,93
4,5	8,51
4,0	8,08
3,5	7,66
3,0	7,23
2,5	6,81
2,0	6,38

Согласно полученным результатам суммарная индуктивность выдвижного электрода и канала искрового пробоя растет по мере увеличения длины $l_{3\pi}$.

В табл. 2 приведены результаты расчетов собственной индуктивности половины биконического электрода в зависимости от длины $l_{2\pi}$.

Собственная индуктивность половины биконического электрода также растет по мере увеличения длины $l_{\rm Эл}$. Однако скорость нарастания индуктивности половины биконического электрода меньше чем у выдвижного электрода и канала искрового пробоя. Таким образом, основной вклад в индуктивность срезающего разрядника будет вносить выдвижной электрод. Следовательно для достижения минимально возможной индуктивности разрядника необходимо обеспечить минимальную длину выдвижного электрода.

Таблица 2

Результаты расчетов собственной индуктивности
половины биконического электрода от длины
$l_{\mathfrak{III}}$. выдвижного электрода

$l_{ m Эл},$ мм	Собственная индуктивность, нГн
10,0	13,85
9,5	13,81
9,0	13,76
8,5	13,72
8,0	13,68
7,5	13,64
7,0	13,61
6,5	13,57
6,0	13,54
5,5	13,50
5,0	13,54
4,5	13,42
4,0	13,40
3,5	13,36
3,0	13,34
2,5	13,30
2,0	13,28

Индуктивность срезающего разрядника рассчитывалась согласно разделу 3.1. На рис. 5 представлен график зависимости суммарной индуктивности срезающего разрядника от длины выдвижного электрода $l_{2\pi}$. При длине $l_{2\pi} = 10$ мм электрод участка 10 (рис. 1) внутреннего проводника линии 7 является цилиндрическим, и индуктивность срезающего разрядника равна 18,74 нГн. Когда *l*_{эп} < 10 мм, электрод является биконическим, при этом индуктивность разрядника меньше чем в случае цилиндрического электрода. При длине выдвижного электрода $l_{2\pi} = 2 \text{ MM}$ значение индуктивности срезающего разрядника равно 11,34 нГн.



Рис. 5. Зависимость индуктивности срезающего разрядника от длины *l*_{эл}

4. Определение индуктивности электрода с помощью масштабирования

Программа моделирования физических процессов позволяет проводить расчеты только для осесимметричных объектов. Поэтому был рассмотрен еще один способ определения индуктивности для электродов сложной формы. Анализ аналитических формул для расчета индуктивностей проводников показал, что их индуктивность растет при увеличении их размеров. Было сделано предположение, что индуктивность тел сложной формы также растет с увеличением размеров при сохранении конфигурации. Т. е., вводя коэффициент масштабирования k, который показывает во сколько раз размеры одного проводника больше размеров другого, по известной индуктивности одного из проводников можно рассчитать индуктивность второго.

В этом случае (в случае истинности данного предположения) Чтобы определить индуктивность рабочего электрода, нужно сделать следующее:

1) изготовить несколько макетов электрода с разным коэффициентом масштабирования k > 1 и провести измерения их индуктивностей;

2) определить функцию зависимости индуктивности от коэффициента масштабирования *k*;

3) рассчитать индуктивность электрода при коэффициенте масштабирования k = 1.

В качестве примера построения такой кривой была исследована зависимость собственной индуктивности половины биконического электрода от его размеров. Для этого в программе моделирования физических процессов проводились расчеты при различных k, значения которого варьировались от 0,2 до 10. Результаты расчетов приведены на рис. 6.



Рис. 6. Зависимость собственной индуктивности половины биконического электрода при различных значениях коэффициента масштабирования k

На графике отчетливо видна линейная зависимость собственной индуктивности половины биконического электрода от коэффициента масштабирования *k*. При аппроксимации точек графика методом наименьших квадратов, получена следующая зависимость:

$$L \approx 13,33 \cdot k \left[\Gamma \mathrm{H} \right] \tag{5}$$

Как и предполагалось, индуктивность половины биконического электрода растет при увеличении k.

Таким образом, зная зависимость индуктивности электрода от коэффициента масштабирования, можно определить искомую индуктивность при k = 1. Кроме того, данный способ позволит решить обратную задачу подбора размеров электрода для обеспечения необходимой индуктивности.

Заключение

1. В ходе решения задачи по определению малой индуктивности срезающего разрядника с элементами сложной формы рассмотрены некоторые способы ее решения. Такую индуктивность трудно рассчитать при помощи аналитических формул и нельзя измерить без большой погрешности. Расчет индуктивности проводился в программе моделирования физических процессов по выделившейся электромагнитной энергии W, вызванной током I.

2. Для проведения расчетов построены модели элементов конструкции срезающего разрядника. В результате расчетов получено, что:

 основной вклад в индуктивность срезающего разрядника будет вносить выдвижной электрод, уменьшая длину которого, можно достичь минимального значения индуктивности разрядника;

– при выполнении электрода на внутреннем проводнике передающей линии в виде цилиндра индуктивность разрядника составит 18,74 нГн, а выполнение электрода в виде двух усеченных конусов, соединенных своими основаниями, позволит снизить индуктивность до 11,34 нГн.

3. Проведено измерение индуктивности биконического электрода, для этого из медной фольги изготовлен его макет, увеличенного размера. Результаты измерений индуктивности отличаются от расчетных значений не более чем на 15 %, что демонстрирует их хорошее соответствие.

4. Рассмотрен способ определения индуктивности электрода с помощью масштабирования. На примере половины биконического электрода построена зависимость значений его индуктивности от коэффициента масштабирования k. Данный метод позволит не только определить искомую индуктивность при k = 1, но и решить обратную задачу подбора размеров электрода для обеспечения необходимой индуктивности.

Литература

1. Эльяш С. Л., Александрин А. И., Донской Е. Н., Калиновская Н. И. и др. Ускоритель АРСА – малогабаритный источник импульсов рентгеновского и электронного излучений // Сборник научных трудов ядерных центров России. 1996. № 5 С. 229–237.

2. Калантаров П. Л., Цейтлин А. А. Расчет индуктивностей: Справочная книга. – Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1986.

 Гинкин Г. Г. Справочник по радиотехнике. – М.: Государственное энергетическое издательство, 1948.

4. Желтов К. А. Пикосекундные сильноточные ускорители. – М.: Энергоатомиздат, 1991.

5. Власов А. А. Макроскопическая электродинамика. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ ДЕТОНАЦИИ ВВ РАСХОДЯЩЕЙСЯ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

И. А. Спирин, А. А. Седов, А. А. Шалыгин, О. В. Шевлягин, В. Н. Князев, Д. А. Пронин

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

Введение

Исследование ударно-волновой чувствительности (УВЧ) взрывчатых веществ (ВВ) является одним из важнейших направлений в работе ВНИИЭФ. При конструировании боеприпасов в ряду важнейших характеристик заряда ВВ рассматривается его чувствительность к ударной волне (УВ) и режимы развития детонации. Особый интерес представляет изучение процесса формирования детонации при ударноволновом инициировании расходящейся УВ, который в настоящее время мало изучен.

Для исследований УВЧ ВВ расходящейся УВ во ВНИИЭФ были разработаны метод блока контроля задержки (БКЗ) и метод порогового давления инициирования (ПДИ), которые являются развитием хорошо известного метода «Gap-test» [1].

БКЗ дает оценку УВЧ по времени задержки детонации ($\tau_{3ad, MKC}$), ПДИ – по минимальному значению давления инициирующей ударной волны, при воздействии которой в исследуемом ВВ еще происходит развитие детонационного процесса. В основе этих методов заложено определение скорости развития взрывчатого превращения в ВВ путем регистрации моментов времени входа инициирующей УВ в пассивный заряд (ПЗ) и выхода детонационной волны из него с помощью системы электроконтактов.

Для получения более полного представления о процессах развития детонации в ВВ при инициировании их расходящейся УВ используемые методы исследования УВЧ ВВ (БКЗ и ПДИ) были дополнены радиоинтерферометрической методикой исследования быстропротекающих процессов (РИФ) [2, 3], которая, в отличие от применяемой в БКЗ и ПДИ электроконтактной методики, позволяет непрерывно регистрировать перемещения ударных и детонационных волн по исследуемому ВВ при отсутствии вносимых возмущений в регистрируемые процессы. Дополнение РИФ в методы БКЗ и ПДИ позволило также получить существенно больший объем информации по сравнению со штатной электроконтактной методикой.

Целью настоящей работы является исследование процессов возбуждения детонации ВВ при инициировании их расходящейся УВ с амплитудой в интервале от 2,7 ГПа до 19 ГПа с помощью методов БКЗ и ПДИ с РИФ.

Постановка опытов

Объектом исследований служили детали из BB на основе октогена (далее – октоген) и на основе триаминотринитробензола (смеси ТАТБ) с октогеном (далее – ТАТБ-октоген).

Эскиз экспериментальной сборки по исследованию возбуждения детонации ВВ расходящейся УВ представлена на рис. 1.



Рис. 1. Эскиз экспериментальной сборки: 1 – ЭД; 2 – активный заряд (АЗ) из ВВ на основе октогена; 3 – преграда из органического стекла; 4 – пассивный заряд (ПЗ) из исследуемого ВВ; 5 – основания из органического стекла; 6 – конический облучатель; 7 – диэлектрический волновод

В данной постановке опыта, рис. 1, детонация в исследуемых деталях 4 из ВВ $\varnothing 40 \times 20$ мм (БКЗ) или $\varnothing 60 \times 60$ мм (ПДИ) возбуждается расходящейся ударной волной, выходящей из преграды 3, изготовленной из оргстекла в форме диска $\varnothing 40$ мм (БКЗ) или $\varnothing 60$ мм (ПДИ) и генерируемой АЗ 2 из ВВ на основе октогена $\varnothing 40 \times 7,1$ мм (БКЗ) или $\varnothing 60 \times 30$ мм (ПДИ).

В опытах варьировалась толщина преграды 3 из оргстекла (*L*, мм), тем самым изменялась интенсивность инициирующей УВ.

С помощью двух электроконтактов (К1 и К2) регистрировали время от момента входа инициирующей ударной волны (ИУВ) в деталь 4 из исследуемого ВВ до момента выхода детонационной волны на ее противоположный торец.

Кроме регистрации времени прохождения УВ по детали 4 из ВВ с помощью электроконтактов все стадии процесса инициирования детонации в ПЗ регистрировали с помощью радиоинтерферометра

ПРИ–03, конический излучатель которого 6 примыкал к основанию 5, изготовленному из оргстекла.

Типичный пример экспериментальной интерферограммы, зарегистрированной радиоинтерферометром ПРИ-03 в одном из опытов с детонацией ПЗ, представлен на рис. 2.

Время задержки рассчитывали по формуле (1) как разность между экспериментально измеренным временем и временем, необходимым для прохождения стационарной детонационной волны всей длины ПЗ ($h_{\Pi 3}$, мм):

$$\tau_{3a\partial} = t_{\partial em} - h_{nacc} / D \tag{1}$$

Глубину возбуждения детонации (*H*, мм) определяли по результатам обработки экспериментальных интерферограмм (рис. 2)

Давление инициирующей ударной волны, входящей в ПЗ, определяли путем решением задачи о распаде разрыва в P-и координатах [4].

По сделанным оценкам, погрешность определения давления (P, ГПа) инициирующей УВ данным методом не превышает ~7 %.

Данные по результатам опыта приведены в табл. 1



Рис. 2. Интерферограмма эксперимента в постановке ПДИ: t_1-t_2 – детонация АЗ; t_2-t_3 – УВ в преграде; t_3-t_4 – переходной процесс ударная волна-детонация в ПЗ; t_4-t_5 – детона-

ция ПЗ; *t*₅-*t*₆ - ударная волна в основании

Таблица 1

Результаты опытов по определению времени задержки детонации и глубины ее возбуждения

Метод	Исследуемое ВВ	<i>L</i> , мм	<i>Р</i> , ГПа	<i>τ_{зад}</i> , мкс	$ au_{\it PH\Phi},$ мкс	<i>Н</i> , мм		
		3	18,8	0,12	0,11	2		
		6	10,7	0,25	0,28	3		
		9	7,1	0,43	0,46	4,6		
	TATE OUTOFOU	16	4,3	1,39	1,33	10,1		
	ТАТБ-октоген	19	3,8	-	1,74	12,7		
		21	3,6	-	1,88	13,4		
		23	3,3	_	2,44	17		
EV.2		26	3,1	_	_	**		
DKJ		6,5	9,9	0,21	0,22	2,2		
		9,5	6,6	0,40	0,44	3,3		
		12,5	5,2	0,72	0,77	5,5		
	Октоген	16	4,2	1,12	1,24	8,3		
		20	3,7	1,74	1,80	11,5		
		23	3,3	2,12	2,18	13,9		
		27	2,9	_	-	*		
		31	2,6	_	-	**		
		12,5	11,9	-	_	2,3		
		34,5	6,2			5		
ТАТБ-октоген		45	4,9	0,78	0,86	7,4		
	ТАТБ-октоген	48,6	4,4	1,13	1,20	9,7		
		52,5	4	1,94	2,01	14,5		
		54,6	3,7	3,17	2,87	19,4		
пли		60	3	-	_	**		
пдп		15,5	10,1	_	_	0,8		
		37,8	5,7			4		
		51	4	1,56	1,63	11		
	Октоген	54	3,7	2,15	2,21	13,7		
		57	3,3	3,80	3,82	23,6		
		60	3	_	_	*		
63 2,7 – **								
* – в опытах	к детонация ПЗ не зарег	истрирован	на, наблюда	ется ускорение ИУВ. Дав.	пение ИУВ в таки	х опытах		
принималось за г	юроговое давление ини	циирования	і ;					
** – в опыта	ах детонация ПЗ не заре	гистрирова	на, наблюда	ается затухание ИУВ.				

По данным табл. 1 определены пороговые давления инициирования ВВ.

Полученные значения порогового давления инициирования ВВ представлены в табл. 2.

Таблица 2

Пороговое давление инициирования ВВ, определенных методами БКЗ и ПДИ

BB	Пороговое давление инициирования, ГПа				
	БКЗ	пди			
ТАТБ-октоген	от 3,1 ± 0,3 до 3,3 ± 0,3	от 3± 0,3 до 3,7± 0,4			
Октоген	$2{,}9\pm0{,}3$	3 ± 0,3			

Как видно из табл. 2, значения порогового давления инициирования ВВ ТАТБ-октоген и октоген, определенных методами БКЗ и ПДИ, совпадают в пределах погрешности определения давления ИУВ. Полученные результаты указывают на возможность использования сборок БКЗ для оценки порогового давления инициирования исследуемых ВВ.

Зависимость глубины возбуждения детонации от давления ИУВ

По данным табл.1 построены графики зависимости глубины возбуждения детонации в исследуемых ВВ (*H*) от давления на фронте ИУВ (*P*), которые представлены в логарифмических координатах на рис. 3 и рис. 4.

На рис. З изображены графики зависимости глубины возбуждения детонации в деталях из ВВ ТАТБоктоген и октоген (H) от давления на фронте ИУВ (P) для метода БКЗ, а на рис. 4 – для метода ПДИ.



Рис. 3. Зависимости глубины возбуждения детонации в деталях Ø40 из ВВ ТАТБ-октоген и октоген от давления на фронте ИУВ для метода БКЗ

Из рис. З видно, что зависимость глубины возбуждения детонации в ВВ ТАТБ-октоген от давления в исследованном интервале давлений близка к подобным зависимостям для BB октоген. При этом в интервале давлений 3–5 ГПа значения глубины возбуждения детонации для BB октоген и ТАТБ-октоген совпадают в пределах погрешности эксперимента, что может свидетельствовать о ведущей роли октогена в процессе формирования детонационного режима в BB ТАТБ-октоген в данном интервале.



Рис. 4. Зависимости глубины возбуждения детонации в деталях Ø60 из ВВ ТАТБ-октоген и октоген от давления на фронте ИУВ для метода ПДИ

Зависимости H(P), приведенные на рис. 4, качественно не отличаются от зависимостей, приведенных на рис. 3. Однако они отличаются количественно.

Сравнение зависимостей *H*(*P*), полученных с использованием методов БКЗ и ПДИ

На рис. 5 и рис. 6 проведено сопоставление зависимостей H(P) в логарифмических координатах, полученных с использованием методов БКЗ и ПДИ, для ВВ ТАТБ-октоген и октоген соответственно.



Рис. 5. Зависимости глубины возбуждения детонации в деталях из ВВ ТАТБ-октоген от давления на фронте ИУВ



Рис. 6. Зависимости глубины возбуждения детонации в деталях из ВВ октогена от давления на фронте ИУВ

Из рис. 5 и рис. 6 видно, что имеется различие в характере зависимостей, полученных с использованием БКЗ и ПДИ, для исследованных ВВ на всем исследованном интервале давлений. В интервале давлений УВ от 3 до 5 ГПа значения глубины возбуждения детонации при инициировании ВВ АЗ \emptyset 60 × 30 мм для исследованных ВВ превышают, значения глубины возбуждения детонации при инициировании ВВ АЗ \emptyset 40 × 7,1 мм, а в интервале от 5 до 19 ГПа наблюдается обратная картина.

Кривизна фронта УВ

С помощью щелевого фотохронографа «*Mks*-*UV*» получены фотохронограммы выхода УВ на торец преграды из оргстекла различной толщины.

Схема опытов представлена на рис. 7.



Рис. 7. Схема опытов по получению фотохронограмм выхода УВ на торец преграды из оргстекла: 1 – ЭД; 2 – АЗ из ВВ октоген; 3 – прокладка из органического стекла; 4 – отсечка; 5 – крышка и основание из органического стекла

Типичный пример фотохронограммы выхода УВ на торец преграды из оргстекла, зарегистрированной фотохроногром «*Mks-UV*» в одном из опытов, представлен на рис. 8.

В результате обработки фотохронограмм выхода УВ определены радиусы кривизны в зависимости от толщины преграды из оргстекла по схеме описанной в [5].

Направление развертки – слева направо



Рис. 8. Фотохронограмма выхода УВ на торец преграды из оргстекла, АЗ ВВ Ø60×30 мм, время развертки 20 мкс, масштаб 1:1: а – предварительный снимок, б – рабочий

Использованная при определении скорость УВ найдена из D-и соотношений для оргстекла. Результаты приведены в табл. 3.

Таблица 3

Радиус кривизны УВ

A3	АЗ Толщина прокладки оргстекла, мм	
	8	45
Ø40 $ imes$ 7,1 мм	16	52
	20	55
	25	78
	19	148
Ø60 × 30 мм	29	161
	43	188
	53	210

Как видно из табл. 3, радиус кривизны УВ, генерируемой АЗ \emptyset 60 × 30 мм, практически во всем интервале исследуемых прокладок в 3 раза превышает радиус кривизны УВ, генерируемой АЗ \emptyset 40 × 7,1 мм.

Численное моделирование

С целью установки причины отличия результатов экспериментов по исследованию УВЧ ВВ методами БКЗ и ПДИ проведено численное моделирование двух опытов с ВВ октоген (см. табл.1):

метод БКЗ, толщина преграды из оргстекла
 23 мм, давление входящей в пассивный заряд УВ –
 3,3 ГПа;

 метод ПДИ, толщина преграды из оргстекла 57 мм, давление входящей в пассивный заряд УВ – 3,3 ГПа.

Из табл.1 видно, что, не смотря на существенные отличия в постановке этих экспериментов, оценки амплитуды падающей на ПЗ ВВ УВ, в обоих случаях дают одинаковые значения – 3,3 ГПа. При этом время задержки детонации и глубина ее возбуждения, определенные методом БКЗ, существенно (в ≈2раза) меньше, чем в опытах ПДИ (см. табл. 1). Следует отметить, что при давлении, входящей в ПЗ УВ менее 5 ГПа, аналогичная ситуация наблюдается и в экспериментах с ВВ ТАТБ-октоген. Одной из причин данного расхождения может быть отличие спектра термодинамических состояний, реализующихся в ПЗ данных, полученных методами БКЗ и ПДИ, вследствие влияния волн разгрузки со свободных поверхностей экспериментальных сборок, имеющих разную геометрию. Для проверки этого предположения с помощью программного комплекса AUTODYN [6] проведены модельные расчеты, цель которых – качественно и количественно сравнить пространственно-временные распределения термодинамических величин в ПЗ методов БКЗ и ПДИ.

В экспериментах ПЗ ВВ в расчетах моделировался инертным веществом с соответствующими параметрами.

Параметры уравнения состояния Shock оргстекла и ВВ октоген представлены в табл. 4. Расчеты проводились в двумерной постановке, в осесимметричном приближении на неподвижной прямоугольной сетке с помощью эйлерового решателя. Размер счетной ячейки в эйлеровой области составлял $0,1 \times 0,1$ мм. Схема постановки расчетов методов БКЗ и ПДИ представлены на рис. 9 и рис. 10 соответственно. В области ПЗ ВВ размещены датчики с шагом 5 мм.

На рис. 11 приведено сравнение расчетного профиля давления в центральной части ПЗ ВВ на момент выхода УВ на глубину 7,5 мм в методах БКЗ И ПДИ. Как видно из рис. 11, максимальное расчетное давление в методе ПДИ выше, чем в методе БКЗ. При этом градиент спада давления за фронтом УВ в методе ПДИ несколько больше по сравнению с методом БКЗ.



Рис. 9. Схема постановки расчетов метода БКЗ



Рис. 10. Схема постановки расчетов метода ПДИ

Таблица 4

Параметры оргстекла и пассивного ВВ

Вещество	ρ ₀ , г/см ³	Г	C1 км/с	S_{I}
оргстекло	1,186	0,97	2,598	1,516
Пассивное ВВ	1,89	0	2,65	1,93
Пассивное ВВ	1,89	0	2,65	

 ρ_0 – начальная плотность; Γ – коэффициент Грюнайзена; C_1 и S_1 – параметры ударной адиабаты (*D*-*U* соотношения)



Рис. 11. Профили давления в центральной части пассивного ВВ на момент выхода УВ на глубину 7,5 мм

На рис. 12 приведено сравнение расчетного профиля давления в центральной части пассивного заряда ВВ на момент выхода УВ на глубину 15 мм в методах БКЗ и ПДИ. Как видно из рис. 12, максимальное расчетное давление в методе ПДИ незначительно больше, чем в методе БКЗ, при этом градиент спада давления в методе ПДИ заметно меньше по сравнению с методом БКЗ.



Рис. 12. Профиль давления в центральной части пассивного ВВ на момент выхода УВ на глубину 15 мм

На рис. 13 приведены расчетные диаграммы давления, полученные в датчиках № 1 (см. рис. 9 и рис. 10), расположенных на оси симметрии сборки, на стыке оргстекло – ПЗ ВВ.

Как видно из рис. 13, максимальное давление выше в расчетах, моделирующих эксперимент ПДИ, а градиент спада давления в методе ПДИ несколько больше по сравнению с методом БКЗ



Рис. 13. Диаграммы давления, полученные в расчетах экспериментов БКЗ и ПДИ

Таким образом, по расчетам в рассматриваемых экспериментах время задержки и глубина возбуждения детонации, определенные методами БКЗ и ПДИ должны были либо совпасть, либо быть меньше в методе ПДИ, чем в БКЗ. То есть, по результатам данной серии расчетов можно сделать вывод о том, что в соответствии с расчетом существенного улучшения условий для возбуждения детонации в ПЗ ВВ в постановке опыта ПДИ по сравнению с БКЗ не обеспечивается.

Данный вывод, основанный на результатах численного моделирования, противоречит экспериментальным результатам. В опытах время задержки детонации и глубина ее возбуждения, определенные методом БКЗ, существенно (в ≈2 раза) меньше, чем в опытах ПДИ.

Таким образом, предположение, объясняющее отличие результатов методов БКЗ и ПДИ влиянием только волн разгрузки на состояния в ПЗ ВВ, расчетно не подтверждается. Более того, результаты численного моделирования сами противоречат экспериментальным данным. Объяснить противоречие между результатами экспериментов и расчетов можно предположив, что в расчетах некорректно описывается затухание ударной волны в преграде из оргстекла. В работе [7] показано, что при распространении расходящейся и плоской ударных волн в экранах из оргстекла, затухание волны за фронтом немонотонно при давлениях И имеет аномалии ~1.3 ГПа и ~5,0 ГПа. Вследствие отсутствия соответствующего уравнения состояния оргстекла, в расчетах не имеется возможности адекватно описать отмеченные особенности поведения оргстекла. В экспериментах данные аномалии в совокупности с действием волн разгрузки могли существенно изменить картину течения и повлиять на процесс возбуждения детонации в экспериментах.

Заключение

Проведено исследование процессов возбуждения детонации ВВ ТАТБ-октоген и октоген расходящимися УВ с использованием методов БКЗ и ПДИ дополненных радиоинтерферометрической методикой.

Для исследованных ВВ получены зависимости глубины возбуждения детонации от давления во фронте ИУВ.

Расхождение в зависимостях глубины возбуждения детонации исследованных ВВ от давления ИУВ в исследованном интервале давлений (для БКЗ и ПДИ), вероятнее всего можно объяснить немонотонным затуханием УВ в преградах из оргстекла, которое в совокупности с действием волн разгрузки, оказывает влияние на процесс возбуждения детонации в экспериментах.

Пороговые давления инициирования исследуемых ВВ, полученные с использованием метода БКЗ и с метода ПДИ, близки между собой в пределах экспериментальной погрешности и составляют:

– ВВ ТАТБ-октоген от $(3,1 \pm 0,3)$ ГПа до $(3,3 \pm 0,3)$ ГПа;

- ВВ октоген (2,9 ± 0,3) ГПа.

Литература

1. Жерноклетов М. В. Методы исследования свойств материалов при интенсивных ди намических нагрузках. – Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003.

2. Родионов А.В., Бельский В.М., Богданов Е. Н. и др. Определение глубины возбуждения детонации радиоволновым методом в пластифицированных октогене и ТАТБ. // Труды международной конференции «XI Харитоновские тематические научные чтения. Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны», РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, 2009, С. 69–73.

3. Бельский В. М., Михайлов А. Л., Родионов А. В., Седов А. А. Микроволновая диагностика ударноволновых и детонационных процессов. // Труды международной конференции «XIII Харитоновские тематические научные чтения. Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны», РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, 2011, С. 785–794.

4. Физика взрыва / Под ред. Л. П. Орленко, Т. 2. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002.

5. Михайлов А.Л. Невозмущающие методы диагностики быстропротекающих процессов. – Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2015.

6. AUTODYN explicit software for Nonlinear Dynamics. Theory Manual revision 4.3. Century Dynamics Incorporated.

7. Кузьминский И. В. О влиянии фазовых превращений на фронте ударной волны в ПММА на темп затухания волны и ее структуру. // Труды международной конференции «VII Харитоновские тематические научные чтения. Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны», РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, 2005, С. 289–300.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЮСТИРОВКИ ОДНОГО КАНАЛА УСТАНОВКИ «ИСКРА-5»

А. А. Султанова, А. А. Верещагин, Е. В. Гаганов

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

Необходимость разработки системы автоматической юстировки для установки «Искра-5» определяется как сокращением числа персонала настройщиков, так и значительным сокращением времени настройки перед проведением опытов, так же улучшением точности позиционирования пучков на оптических элементах. На рис. 1 представлена оптическая схема одного из лазерных каналов установки «Искра-5». которые устанавливаются в излучение прошедшее через зеркало ЗТ4 и излучение отраженное от пластины установленной перед ЗТ4 (не показана на схеме). В фокальной плоскости измерительных линз установлены марки с перекрестием. Предварительная стыковка излучений основного и финальных настроечных лазеров осуществляется на базе ЗТЗ – апертурный визир (AB). Окончательная стыковка осуществляется по маркам в фокальной плоскости измерительных линз. Вся настройка осуществляется в ручном режиме.



Рис. 1. Оптическая схема одного из каналов установки «Искра-5»: ЗГ – задающий генератор, Р01, Р1, Р2, Р3 – пространственные фильтры, Л1...12 – линзы телескопических пар, ЖФ1...ЖФ3 (ЖФ4) – жидкостные фильтры, ЗТ1...ЗТ4 – поворотные зеркала тракта, У0, У1, У2, У21 – ламповые усилители, АВ – апертурный визир, У4м – финальный усилительный каскад, DKDP – кристалл преобразователь

Настройка установки «Искра-5» осуществляется с помощью четырнадцати Не-Ne лазеров. Первый лазер настраивает задающий генератор ЗГ. На входе в усилитель УО осуществляется стыковка лазера ЗГ и основного настроечного лазера, по которому настраиваются все двенадцать усилительных каналов. При прохождении большого количества элементов настроечный луч существенно ослабляется, что ведет к ухудшению точности (невозможности) настройки мишени, поэтому применяются дополнительные финальные настроечные лазеры, в каждом из двенадцати каналов. С помощью финальных настроечных лазеров осуществляется наведение излучения на мишень и настройка диагностических комплексов. Диагностические комплексы включают измерительные линзы, Целью настройки лазерных систем является прохождение рабочего излучения по всем элементам без виньетирования. Классический метод настройки сложных оптических систем состоит в применении излучения настроечного лазера, по которому последовательно настроиваются все элементы в ручном режиме, как это происходит на установке «Искра-5». На установке «Луч» реализован автоматизированный метод настройки с помощью настроечного лазера. Вместо экранов для ручного режима за поворотными зеркалами и в отражениях от пластин тракта установлены цифровые камеры. Изображения с камер выводятся на монитор пульта управления. С пульта осуществляется дистанционное управление зеркалами. В такой системе луч настраивается на камеру, а положение апертур элементов не контролируется. Развитием предыдущего метода является маркерный метод, при котором дополнительно к настроечному лазеру апертуры элементов снабжаются световыми источниками. Этот метод юстировки основан на контроле с помощью цифровых камер взаимного положения центров оптических элементов, которые снабжены маркерами и настроечного луча. Центр каждого оптического элемента при этом задается серединой отрезка между световыми маркерами. На основе маркерного метода проще осуществлять автоматическую настройку наряду с автоматизированной.

В качестве первого шага реализации автоматической настройки лазерного канала установки «ИСКРА-5» предлагается установить по два световых маркера на следующие оптические элементы: ЗТЗ и АВ. Две точки, являющиеся серединами отрезков соединяющих парные маркеры, будут задавать ось участка тракта, содержащего силовой усилитель. На рис. 2 показано расположение маркеров.



Рис. 2. Расположение маркеров на оптических элементах канала установки «Искра-5»

В качестве излучающих элементов маркеров были выбраны лазерные диоды. Предполагается использовать лазерные диоды фирмы THORLABS, модель DL3148-025, работающие в видимом диапазоне с длиной волны излучения $\lambda = 635$ нм и рабочей мощностью излучения 5 мВт. Применение диодов видимого диапазона (635 нм) обусловлено удобством работы. Внешний вид и схема выводов лазерного диода DL3148-025 представлены на рис. 3.



Рис. 3. Лазерный диод DL3148-025: а – внешний вид, б –схема выводов

Для питания маркеров предлагается на первом этапе работы использовать регулируемый лабораторный источника тока. Преимуществом данной системы является ее простота и быстрое изготовление.

Для контроля совмещения центров парных маркеров и настроечных лучей необходимо использовать датчик автоматической настройки (ДАН). Датчик устанавливается за линзой Л13 (рис. 2). Оптическая схема датчика автоматической настройки приведена на рис. 4. Излучение маркеров попадает на матрицу цифровой камеры через поворотное зеркало З' и линзу Л'. Датчик позволяет получать изображения маркеров ЗТЗ и маркеров АВ.



Рис. 4. Оптическая схема датчика автоматической настройки

Цифровая камера PixeLINK B741EG имеет разрешение 1280 × 1024 пикселей. Размер матрицы составляет 8,6 × 6,8 мм, размер пикселя 6,7 мкм, глубина цвета – 256 градаций серого. Камера установлена на линейном моторизованном трансляторе Standa 8MT200-100, что позволяет осуществлять ее дистанционное продольное перемещение. Для того чтобы изображение всех маркеров перестраивалось на цифровую камеру, в состав датчика входит линза Л'.

Перед проведением настройки необходимо вручную установить З'. Далее совмещается настроечный луч с маркерами зеркала ЗТЗ при помощи ЗТ2 на матрице камеры. Затем датчик настраивается на плоскость АВ. При помощи ЗТЗ совмещается настроечный луч с маркерами АВ на матрице камеры. На следующем этапе перекрываем настроечный луч в области ЗТ2. Аналогично осуществляется настройка финального луча совмещением с маркерами в двух плоскостях. Финальный луч заводится в канал через зеркало ЗТЗ при помощи зеркал З1 и З2. Зеркала системы заведения предполагается снабдить приводами, что позволит осуществлять их дистанционное управление. Наличие управления и контроля позволит автоматизировать настройку финального луча.

Требуемая точность настройки финального луча составляет 10^{-4} радиан. При величине базы настройки 40 метров, точность настройки в каждой плоскости составит 2 мм. Размер апертуры перестраиваемой на матрицу камеры составляет 400 мм. Для матрицы

Литература

1000 × 1000 на один пиксель приходится 0,4 мм.что предположительно позволит провести настройку с точностью 2 мм. При настройке в дальней зоне, например, в фокусе линзы 40 метров, будет двойное преимущество по точности из-за компенсации однонаправленных ошибок. Требуемая точность составит 4 мм.

1. Чернов В. Н. и др. Методы и алгоритм автоматической юстировки модуля многопучковой лазерной установки Искра-6. Оптический журнал, Т. 73, № 1, Январь, 2006.

2. Бредерлов Г., Филл Э., Витте К. Мощный йодный лазер. – М.: Энергоатомиздат, 1985.

3. Ландсберг Г. С. Оптика. – М.: «Наука», 1976.

ПРОГРАММНО-АППАРАТНАЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ СЛОЖНОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

А. В. Тетеревков, А. Н. Панченко, В. А. Пикарь

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

В процессе подготовки к исследованиям радиационной стойкости сложнофункциональных микросхему испытателя возникает необходимость в выборе или создании (если нет готовых вариантов) измерительной системы, обеспечивающей задание режима работы и контроль параметров критериев годности исследуемого образца микросхемы. Применение готовых тестовых решений, используемых производителем микросхем при производстве, чаще всего невозможно. Поэтому, в большинстве случаев, испытателям приходится самостоятельно разрабатывать и изготавливать системы для тестирования микросхем. Разработка измерительной оснастки осложняется в тех случаях, когда исследуемый образец обладает большим количеством (несколько десятков) информационных выводов и тестовые векторы для функционального контроля имеют большую (несколько тысяч тактов) длину. Для таких случаев целесообразно разработать унифицированную программноаппаратную измерительную систему(ПАИС), которая в автоматическом режиме будет проводить тестирование образцов во время проведения радиационного эксперимента с возможностью простой перенастройки на различные типономиналы исследуемых микросхем путем загрузки соответствующих тестовых векторов.

Исследование стойкости при статическом радиационном воздействии

Изначально, ПАИС разрабатывалась для исследования радиационной стойкости при статическом

радиационном воздействии. По результатам [1] было принято решение построить систему на базе модульного измерительного оборудования компании National Instruments. ПАИС (рис. 1) представляет собой шасси, объединяющее между собой измерительные модули, управляющий контроллер и измерительные модули, обладающие необходимыми функциями.

Критериальными параметрами для оценки работоспособности большинства исследуемых микросхем являются: динамический ток потребления, выходное напряжение логического «нуля» и «единицы» и функциональный контроль на всем протяжении эксперимента.

Для обеспечения ПАИС требуемыми функциями использовались следующие модули формата РХІ:

 NI PXI-4110 – трехканальный источникизмеритель, который питает исследуемый образец и с высокой частотой (3 кГц) измеряет ток потребления;

– NI PXIe-6556 – 24-х канальный генератор – анализатор цифровых сигналов, который воспроизводит тестовые последовательности, регистрирует ответные сигналы и сравнивает с эталоном. Также, модуль NI PXIe-6556 реализует функцию измерения логических уровней «нуля» и «единицы» в заданные пользователем моменты времени.

В случаях, когда количество необходимых цифровых каналов превышает 24 и приходится использовать более одного генератора NIPXIe-6556, синхронизацию измерительных модулей между собой обеспечивает шасси NIPXIe-1085, которое обладает 100 МГц шиной синхронизации и возможностью установки до 8-ми генераторов-анализаторов одновременно.



8-слотовое РХІ шасси

Рис. 1. Внешний вид (вид спереди) ПАИС на базе оборудования NationalInstruments

Выбор оборудования National Instruments также был продиктован широкими возможностями автоматизации измерений с помощью написания управляющих программ в среде Lab View [2, 3]. Программное обеспечение (ПО) для разрабатываемой ПАИС должно обладать следующими функциями:

 загрузка тестовых векторов в память генератора-анализатора;

настройка, запуск и управление процессом тестирования;

 – регистрация отказов, подсчет количества ошибок и вывод в виде графика;

 – считывание и отображение данных об уровнях «нуля» и «единицы» и тока потребления;

 парирование падения напряжения питания на линиях связи;

– сохранение полученных в процессе эксперимента данных в файл.

Большинство необходимых функций ПО (рис. 2) реализованы стандартными средствами среды программирования Lab View.



Рис. 2. Внешний вид главного окна управляющей программы

Загрузка тестовых векторов в память генератора NIPXIe-6556 возможна в различных форматах данных: строка символов, символьный массив, числовой тип, Hierarchical Waveform Storage (HWS), Direct Memory Access (DMA). Проанализировав все возможные варианты записи данных в генератор, был выбран формат HWS. Основные преимущество формата Hierarchical Waveform Storage это простота его использования и возможность прямой записи тестовых последовательностей в генератор, минуя оперативную память контроллера.

Для парирования падения напряжения на линиях связи было принято решение установить модуль мультиметра (NIPXI-4072), который будет измерять напряжение непосредственно на объекте в процессе эксперимента. Управляющее ПО, по результатам этих измерений, изменяет выходное напряжение источника питания NIPXI-4110 поддерживая, таким образом, постоянным напряжение на объекте вне зависимости от его тока потребления. С помощью разработанной ПАИС произведены исследования радиационной стойкости нескольких образцов базового матричного кристалла (БМК).

Образец БМК содержит 240 выводов. Из них 133 цифровых вывода применяются для функционального тестирования, 58 используются для электропитания, остальные 49 выводов не задействованы Критериальными параметрами для оценки работоспособности исследуемого БМК являются: динамический ток потребления, выходное напряжение логического «нуля» и «единицы». Также, работоспособность БМК оценивалось по результатам проведения функционального контроля. Для этого разработчиками были представлены 25 тестов, каждый из которых содержал более миллиона строк.

Для тестирования данного БМК в ПАИС было установлено 6 модулей генератора-анализатора NIPXIe-6556, которые обеспечили 144 канала цифрового ввода-вывода.

Исходные данные для тестирования БМК, предоставленные разработчиками – тестовые векторы в формате avc. Формат avc представляет собой текстовый файл в кодировке ASCII, содержащий командные символы, определяющие действия теста контроллера. Такие строки называются тестовыми векторами.

Всего заказчиком было предоставлено 25 аvc файлов, каждый из которых содержал тестовую последовательность для определенного логического блока БМК. Общая длина тестовых векторов составила 20 310 198 тактов, а объем, занимаемый на жестком диске, 5270,2 Мбайт. Из этого следует, что обработка файлов тестовых последовательностей без применения специализированного ПО затруднена, если совсем не возможна. ПО для обработки тестовых векторов должно обладать следующими возможностями:

 – обработка формата avc для записи в память генераторов, разделение векторов на части для загрузки в генераторы;

 переназначение каналов-векторов в зависимости от схемы коммутации и вида теста.

Для этих целей была написана специальная подпрограмма – парсер¹. Разработанная подпрограмма показала свою эффективность в плане использования оперативной памяти (потребление не более до 100 Mб). Обработка файлов блоками и распараллеливание вычислений, средствами LabView, на все доступные ядра процессора значительно повысили скорость выполнения операций и время обработки всех файлов сократилось с 24-х до 2-х часов.

Типовые зависимости критериальных параметров от времени облучения представлены на рис. 3 и рис. 4.

У образца №2 во время эксперимента наблюдалось постепенное возрастание тока потребления и выход за установленные пределы.

¹ Парсер – программа (или подпрограмма) для автоматизации процесса обработки информации по определенному алгоритму.



Рис. 3. Зависимость динамического тока потребления БМК от времени облучения



Рис. 4. Зависимость возникновения ошибок во время функционального тестирования БМК образец № 2 от времени облучения (Название графика соответствует тесту, в котором возникла ошибка)

Разработанная ПАИС выполняет следующие функции в автоматизированном режиме: генерация управляющих векторов, считывание ответных сигналов с БМК и сравнение с эталонными; измерение уровней логических «нуля» и «единицы»; измерение динамического тока потребления отдельно для каждого теста; парирование падения напряжения на линиях связи. Разработанная концепция ПАИС позволяет варьировать количество цифровых каналов ввода-вывода в зависимости от поставленной задачи. Также, с помощью технологии РХІтс, существует возможность объединять несколько шасси с оборудованием, что дает неограниченные возможности по расширению.

Исследование стойкости при импульсном радиационном воздействии

После отработки ПАИС при статическом радиационном воздействии было принято решение ее модифицировать с целью использования в составе автоматизированного рабочего места (APM)[4] на базе малогабаритных импульсных ускорителей.

Особенностью исследования стойкости при импульсном радиационном воздействии является необходимость облучать объект точно в момент его функционирования (есть вероятность облучить в промежуток между тестами или в момент измерения электрических параметров) и регистрация быстропротекающих процессов. Для выполнения поставленных условий в разработанную ПАИС были внесены следующие модификации:

– синхронизация тестирования выполнена с помощью модуля осциллографа NIPXI-5152, который при регистрации предпускового импульса дает генераторам сигнал о начале тестирования, до этого генераторы находятся в состоянии готовности. Выбор осциллографа NIPXI-5152 обусловлен широкой полосой пропускания(300 МГц), что позволяет производить запуск от коротких импульсов.

– регистрация быстропротекающих процессов реализована связкой модуля мультиплексора NIPXIе-2515 и осциллографа Tectronix 3054B. Модуль NIPXIe-2515 включается в разрыв кабеля между генератором анализатором NIPXIe-6556 и исследуемым объектом и позволяет вывести сигнал с любого канала генератора на разъем типа BNC, к которому подключен осциллограф Tectronix 3054B. На осциллографе регистрируется реакция выходных сигналов на импульсное радиационное воздействие.

С помощью модифицированной ПАИС, входящей в состав АРМ, проведены исследования стойкости БМК при импульсном радиационном воздействии, результаты приведены на рис. 5.



Ошибки, зарегистрированные во время действия ИИ

Рис. 5. Внешний вид главного окна управляющей программы во время исследования радиационной стойкости образца БМК при импульсном радиационном воздействии

Проведенные испытания макетных образцов БМК показали возможность использования ПАИС для испытаний сложнофункциональных микросхем типа БМК как при статическом, так и импульсном радиационном воздействии, а также возможность расширения функций ПАИС в зависимости от исследуемого образца и условий, поставленных заказчиком.

Литература

1. Кудрявцев Ю. Г., Копкин А. Ю., Панченко А. Н., Тетеревков А. В. Применение оборудования National Instruments для исследования радиационной стойкости интегральных микросхем. «Молодежь в науке». Сборник докладов одиннадцатой научно – технической конференции. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013.

2. Бутырин П. А., Васьковская Т. А., Каратаева В. В. и др. Автоматизация физических исследований и эксперимента: компьютерные измерения и виртуальные приборы на основе LabVIEW 7 – ДМК пресс, 2005. С. 264.

3. Федосова В. П. Цифровая обработка сигналов в LabVIEW – ДМК Пресс, 2007. С. 456.

4. Панченко А. Н., Полиенко Г. А., Эльяш С. Л., Родигин А. В., Тетеревков А. В. Автоматизированное рабочее место для проведения радиационных испытаний ЭКБ. «Вопросы атомной науки и техники». Серия: «Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру» Вып. 1, 2016. Лыткарино: ФГУП «НИИП»С. 62–65.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ЙОДНОГО ЛАЗЕРА «ИСКРА-5» НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ТРЕТЬЮ ГАРМОНИКУ

И. В. Тимонин, А. В. Зубков, В. П. Коваленко

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

Введение

Мощная лазерная установка «Искра-5» [1, 2] разработана во ВНИИЭФ для исследований в области лазерного термоядерного синтеза и представляет собой импульсный 12-канальный йодный фотодиссоционный лазер с длиной волны излучения $\lambda = 1315$ нм.

В настоящее время на одном из каналов установки проводится серия экспериментов по преобразованию основного излучения в третью гармонику [3]. Одна из главных задач, которую необходимо решить при этом, заключается в получении максимального коэффициента преобразования энергии $\eta_{3\omega} \sim 50$ %. Для этого, очевидно, необходимо определить и оптимизировать факторы, влияющие на процесс преобразования.

В связи с этим, наряду с экспериментальными исследованиями, было решено построить расчетную модель зависимости эффективности преобразования от параметров системы «излучение – кристаллыпреобразователи». Для этого была написана специальная программа, позволяющая моделировать на персональном компьютере процессы преобразования излучения йодного лазера в третью гармонику в нелинейных кристаллах DKDP.

Модель для расчета процесса преобразования

Для преобразования излучения йодного лазера в третью гармонику в основном используются кристаллы DKDP, так как они имеют большую лучевую прочность при облучении импульсами субнаносекундной длительности, небольшое линейное и двухфотонное поглощение на длинах волн 1 ω , 2 ω и 3 ω , и могут быть выращены в виде монокристаллов больших размеров (до 40–50 см) высокого оптического качества [4, 5].

Для преобразования излучения в 3 ω обычно используется каскадное преобразование частоты в двух, последовательно расположенных кристаллах – удвоителе и смесителе. В первом кристалле происходит удвоение частоты (1 ω + 1 ω = 2 ω), а во втором – смешивание (сложение) излучения полученной второй гармоники 2 ω и непреобразованной части 1 ω (2 ω° + 1 ω = 3 ω). Наиболее распространенной схемой утроения в йодном лазере (по типам взаимодействия волн) является схема тип II/тип II из-за больших сложностей изготовления кристаллов DKDP большой апертуры для синхронизма 1-го типа.

Из двух основных схем утроения частоты со вторым типом синхронизма (схема с угловой расстройкой и схема поляризационного рассогласования [6]), для йодного лазера наиболее оптимальной является схема поляризационного рассогласования, так как она имеет относительно широкий диапазон интенсивностей основного излучения, в пределах которого сохраняется эффективность преобразования.



Рис. 1. Классическая схема преобразования излучения в третью гармонику с поляризационным рассогласованием [6]

В схеме, рис. 1, оба кристалла (для генерации второй гармоники (ГВГ) и генерации третьей гармоники (ГТГ)) используют взаимодействия 2-го типа, причем угол поворота плоскости поляризации волны 1 относительно о-поляризации составляет величину $\phi = \operatorname{arctg}(1/\sqrt{2}) = 35^{\circ}18'$. Это связано с условием равенства числа фотонов 1ω и 2ω, необходимого для достижения максимального преобразования в третью гармонику, что приводит к отношению их энергий как 1:2 на выходе кристалла-удвоителя. Это значит, что при использовании кристаллов с непросветленными гранями нужно получить эффективность преобразования во вторую гармонику в первом кристалле ~55 %. При этом, непреобразованное излучение на частоте 1 имеет подходящую поляризацию для следующего каскада утроения.

Расчетная модель так же была разделена на два этапа. На первом этапе происходит расчет процесса удвоения в первом кристалле. Исходное излучение 100 при входе в кристалл-удвоитель разлагается на обыкновенную и необыкновенную волну, и они, распространяясь в одном направлении в нелинейной среде, возбуждают третью волну. Частным случаем процесса генерации третьей волны является вырожденное взаимодействие, когда частоты обеих падающих волн ω₁ и ω₂ равны. В этом случае частота генерируемой волны $\omega_3 = 2 \cdot \omega_1 = 2 \cdot \omega_2$. То есть, в среде распространяется три волны: две с равными частотами и третья с удвоенной частотой. Распространение волн в направлении оси z описывается системой четырех действительных уравнений для приведенных амплитуд и обобщенной фазы трех взаимодействующих волн [7]:

$$\frac{\partial u_1}{\partial z} = -0, 5 \cdot \alpha_1 \cdot u_1 - \beta \cdot u_2 \cdot u_3 \cdot \sin(u_4)$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial z} = -0, 5 \cdot \alpha_2 \cdot u_2 - \beta \cdot u_1 \cdot u_3 \cdot \sin(u_4)$$

$$\frac{\partial u_3}{\partial z} = -0, 5 \cdot \alpha_3 \cdot u_3 + \beta \cdot u_2 \cdot u_1 \cdot \sin(u_4)$$

$$\frac{\partial u_4}{\partial z} = \Delta k + \beta \cdot \left(\frac{u_1 \cdot u_2}{u_3} - \frac{u_2 \cdot u_3}{u_1} - \frac{u_1 \cdot u_3}{u_2}\right) \cdot \cos(u_4)$$
(1)

где: и₄ – разность фаз между генерируемой в нелинейной среде и входящими в нее волнами, u_1 и u_2 – нормированные амплитуды входящих волн, и₃ – нормированная амплитуда волны, генерируемой в нелинейной среде; a_1, a_2, a_3 – коэффициенты поглощения среды для соответствующих составляющих; другие переменные, входящие в (1), имеют следующий

смысл: $\Delta k = \frac{n_3 \cdot \omega_3}{c} - \frac{n_2 \cdot \omega_2}{c} - \frac{n_1 \cdot \omega_1}{c}$; – волновая рас-стройка, $\beta = \frac{def}{c} \cdot \sqrt{\frac{\omega_1 \cdot \omega_2 \cdot \omega_3}{n_1 \cdot n_2 \cdot n_3}}$ – коэффициент нели-

нейной связи (def - эффективная нелинейность среды: $def = d_{36} \cdot \sin(2 \cdot \Theta_c)$, Θ_c – угол синхронизма, d_{36} – коэффициент нелинейной связи); n_1 , n_2 , n_3 , w_1 , w₂, w₃ -показатели преломления и частоты соответствующих волн; с – скорость света в вакууме.

В нашем случае нелинейной средой является отрицательный $(n_o > n_e)$ одноосный кристалл DKDP. В выбранном направлении в анизотропном одноосном кристалле в общем случае распространяются две линейно поляризованных во взаимно перпендикулярных направлениях волны на одной и той же частоте. Они распространяются с различными фазовыми скоростями из-за разницы показателей преломления ($n_o \neq n_e$).

Условие, когда волновая расстройка равна нулю, есть условие фазового синхронизма: $k_1 + k_2 = k_3$. Из условия фазового синхронизма определяются углы синхронизма.

Крупноапертурные кристаллы DKDP $(33 \times 32 \times 2 \text{ см})$ со II типом синхронизма, используемые на установке «Искра-5», выращены в ИПФРАН (г. Нижний Новгород) методом скоростного роста [8]. Угол между оптической осью кристалла и нормалью к его поверхности ~43°.

В литературе [5, 9] существует несколько способов вычисления показателей преломления для данного материала и длины волны падающего излучения. И, как показали вычисления, все они приводят к несколько различным результатам. Нами был выбран способ [3], для которого угол синхронизма был наиболее близок к углу синхронизма полученного экспериментально ($\Theta_c = 52,8372^\circ$).

В итоге, проинтегрировав систему (1) от 0 до L (путь, пройденный волнами в нелинейной среде) можно найти интенсивности второй гармоники с необыкновенной поляризацией (но для кристалласмесителя эта поляризация будет обыкновенной) и первой гармоники с обыкновенной поляризацией (но для кристалла-смесителя эта поляризация будет необыкновенной) на выходе из кристалла-удвоителя в следующем виде:

$$I^{e}_{2w} = \frac{4n_{3}w_{3}}{2Z_{0}(n_{3}+1)^{2}}(u_{3})^{2};$$

$$I^{o}_{w} = \frac{4n_{3}w_{2}}{2Z_{0}(n_{2}+1)^{2}}(u_{2})^{2}$$
(2)

где Z₀ – волновое сопротивление вакуума.

Далее, на втором этапе расчетной модели, производится расчет процесса смешивания частот во втором кристалле путем решения аналогичной системы уравнений, записанной для процесса смешивания частот.

Основные аспекты программы

Программа была написана в системе Matlab. Временная форма импульса лазерного излучения считалась гауссовой. и для интегрирования (1) она разбивалась на 10 временных интервалов. В модели деполяризации излучения учитывалось общее отклонение вектора исходной поляризации от вертикали. Переменными параметрами в программе являлись энергия первой гармоники на входе системы преобразования, ошибка попадания излучения в угол синхронизма (при котором фазы волн согласованы), длительность импульса по уровню 0,5 и угол деполяризации падающего на кристалл излучения.

Расчетные зависимости эффективности преобразования во вторую гармонику в схеме поляризационного рассогласования от интенсивности накачки

На первом этапе экспериментов по исследованию преобразования в третью гармонику нужно было получить эффективность преобразования в 200 близкую к 55 %. В связи с этим предварительно провели расчеты по первой части программы. Далее была проведена серия экспериментов на выходе одного из каналов установки «Искра-5» по преобразованию во вторую гармонику при повороте кристалла на угол $\phi = 35^{\circ}18'$. На рис.2 представлены расчетные зависимости эффективности преобразования в 2ю от интенсивности накачки для кристаллов толщиной 14,9 и 13,4 мм и полученные экспериментальные значения. В расчете бралась деполяризация основного излучения 0,5 %, ошибка наведения на угол синхронизма равнялась 100 мкрад. Видно неплохое согласование эксперимента с расчетом.





Расчетные зависимости эффективности преобразования в третью гармонику в схеме поляризационного рассогласования от параметров излучения

На втором этапе экспериментов нужно было получить эффективность преобразования в 3ω близкую к 50 %. При подготовке экспериментов по вышеописанной программе были рассчитаны зависимости эффективности преобразования в 3ω от параметров системы излучение-кристаллы.

На рис. 3 показаны расчетные зависимости эффективности преобразования от интенсивности накачки для различных комбинаций толщин кристалллов (удвоителя и смесителя). Для получения максимальной энергии в третьей гармонике при интенсивностях накачки в диапазоне 1–3 ГВт/см² был выбран вариант с толщиной кристалла-удвоителя 13,5 мм и толщиной кристалла-смесителя 15 мм. Далее расчетные зависимости представлены именно для этого варианта соотношения толщин.

Расчетные зависимости эффективности преобразования от интенсивности накачки для отклонения углов φ (рис. 1) поворота плоскости поляризации волны 1 ω от величины $\varphi = 35^{\circ}18'$ представлены на рис. 4. Из него можно оценить влияние поворота вектора поляризации на эффективность преобразования.



Рис. 3. Расчетная зависимость эффективности преобразования 3ω от интенсивности накачки для разных толщин кристаллов-преобразователей



Рис. 4. Расчетная зависимость эффективности преобразования в 3ω от интенсивности накачки для разных углов φ (рис. 1) поворота поляризации основного излучения 1ω



Рис. 5. Расчетная зависимость эффективности преобразования в 3ω от интенсивности накачки при различных углах отклонения от направления синхронизма

На рис. 5 приведены расчетные кривые эффективности преобразования при различных отклонениях от синхронизма (ошибка наведения).

После проведения экспериментов по преобразованию основного излучения в 3ю для двух соотношений толщин кристаллов экспериментальные точки были нанесены на расчетные графики. Полученные результаты представлены на рис. 6. Из него видны характерные зависимости для различных соотношений толщин кристаллов-преобразователей и неплохое соотношение экспериментальных результатов с расчетом.

В расчете бралась деполяризация основного излучения равная 0,5 %, ошибка наведения на угол синхронизма равнялась 100 мкрад.



Рис. 6. Расчетные зависимости эффективности преобразования в 300 от интенсивности накачки (сплошная линия – 14,9 мм удвоитель и 20,4 мм смеситель, пунктирная линия – 13,4 мм удвоитель и 14,9 мм смеситель) и экспериментальные результаты (маркеры)

Выводы

В результате проведенной работы написана программа, позволяющая моделировать на персональном компьютере процессы преобразования излучения йодного лазера во третью гармонику в нелинейных кристаллах DKDP в условиях установки «Искра-5» в зависимости от параметров излучения первой гармоники и параметров кристалла. Полученная расчетная программа позволяет оценить степень влияния различных параметров системы «излучение– кристаллы–преобразователи» на эффективность преобразования в третью гармонику.

Расчетным способом подтверждено, что при использовании кристаллов II-го типа DKDP с толщиной 13-15 мм, повернутых на угол $\phi = 35^{\circ}18'$, на установке «Искра-5» получена практически максимальная эффективность преобразования в третью гармонику с $\eta_{3\omega} = 49$ %.

Результаты численных расчетов удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными, полученными на установке «Искра-5».

Литература

1. Анненков В. И., Багрецов В. А., Кротов В. А. и др. Импульсный лазер мощностью 120 ТВт «Искра–5». – *Квантовая электроника*, 1991 том <u>18</u>, № 5, С. 536–537. 2. Анненков В. И., Беспалов В. И., Бредихин В. И. и др. Перевод йодного лазера «Искра-5» в режим работы на второй гармонике. – *Квант. электроника*, 2005, том <u>35</u>, № 11, С. 993–995.

3. Zubkov A. V., Kalipanov S. V., Kovalenko V. P., Kurnopyalov S. P, Fayzullin V. S. The efficiency research of laser energy conversion to the third harmonic for «Iskra-5» iodine laser. – 17th International Conference «Laser Optics 2016», Saint-Petersburg, Russia, June 27–July 1, 2016.

4. Бредерлов Г., Филл Э., Витте К. Мощный йодный лазер. – М.: «Энергоатомиздат», 1985, 160 с.

5. Гурзадян Г. Г., Дмитриев В. Г., Никогосян Д. Н. Нелинейно-оптические кристаллы. Свойства и применения в квантовой электронике: справочник. – М.: «Радио и связь», 1991, 160 с.

6. Craxton R. S. High efficiency tripling schemes for high-power Nd:glass lasers. – *IEEE J. Quantum Electron.*, 1981, Vol. **QE-17**, № 9, P. 1771–1782.

7. Ярив А. Квантовая электроника: Пер. с англ. / Под ред. Я. И. Ханина. 2-е изд. – М.: «Сов. Радио», 1990, 488 с.

8. Беспалов В. И., Бредихин В. И., Ершов В. П. и др. Оптические свойства кристаллов КDP и DKDP, выращенных с большой скоростью. – *Квантовая электроника*, 1982, том **9**, № 11, С. 2343–2345.

9. Бредихин В. И., Кузнецов С. П. Исследование дисперсии показателей преломления кристаллов DKDP методом генерации гармоник. – Оптика и спектроскопия, 1986, Т. 61. Вып. 1, С.103–106.

ВЗРЫВНОЙ ПЬЕЗОГЕНЕРАТОР С ЭНЕРГИЕЙ 50 Дж ДЛЯ АВТОНОМНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

<u>А. А. Утенков</u>, М. В. Антипов, А. В. Блинов, А. Л. Михайлов, В. А. Огородников, И. В. Юртов

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

Для создания начального тока в рабочем объеме нагрузки, в качестве которой применяются спиральные магнитокумулятивные генераторы (МКГ) *1*, рис. 1, представляющие интерес как источники мощных импульсов тока, требуется сторонний источник энергии. В качестве источника начальной запитки выступает взрывной пьезогенератор (ВПГ) 2, рис. 1, представляющий собой источник электрических импульсов однократного действия, использующий энергию взрывчатого вещества. ВПГ находят применение в случаях, когда требуется автономный, малогабаритный, постоянно готовый к работе, не требующий обслуживания источник электрических импульсов.



Рис. 1. ВПГ в составе автономного источника: 1 – МКГ, 2 – ВПГ, 3 – электродетонатор (ЭД)

На рис. 2 представлены этапы развития и совершенствования конструкций ВПГ, в которых последовательно пройден путь получения энергий $6 \ Дж \rightarrow 12 \ Дж \rightarrow 25 \ Дж \rightarrow 50 \ Дж$, при различных вариантах нагружения.

Нагружение блока пьезокерамики (ПК) ВПГ проводили:

- одной плоской ударной волной (УВ) - 6 Дж,

 плоской и клиновидной УВ – 12 Дж (двухстороннее нагружение),

 двумя сходящимися клиновидными УВ при цилиндрической – 25 Дж и прямоугольной – 50 Дж форме блока ПК.

При создании конструкции ВПГ-1050 на 50 Дж разработана технология одноразовой заливки элек-

трического блока без последующей доработки, рис. 3. Плоские нагружаемые поверхности получаются применением съемной технологической оснастки, в которую осуществляется заливка компаундом со стороны токовыводов.



Рис. 2. Развитие конструкций ВПГ для запитки ВМГ

Поскольку объем ПК модернизированного ВПГ (вариант 4, рис. 2) увеличен на 50 %, по сравнению с вариантом 3, использовали в качестве внешней оболочки изолирующий компаунд. Для крепления технологической оснастки, а затем и нагружающих устройств использовали угловые упоры, которые образовывали вместе с отвержденным компаундом внешнюю изолирующую оболочку ВПГ. Пьезоэлементы в ВПГ расположили вдоль оси запитываемого МКГ.

Этапы изготовления модернизированной конструкции ВПГ представлены на рис. 3.

Заливка компаундом осуществляется в отверстия технологической оснастки 1, рис. 3,а, расположенные между токовыводами 2 ВПГ, рис. 3. Таким образом, возникающие в процессе отверждения компаунда неоднородности не требуется дорабатывать, рис. 3,б, так как они находятся вне зоны нагружения, что существенно упрощает цикл подготовки сборки к опыту (рис. 3,в,г).

Схема ВПГ с нагружением блока ПК двумя клиновидными ударными волнами показана на рис. 4.



Рис. 3. Этапы изготовления модернизированной конструкции: а – сборка в технологической оснастке до заливки: 1 – отверстия для заливки компаунда, 2 – токовывод, 3 – технологическая оснастка; б – сборка залитая компаундом: 4 – отвержденный компаунд; в – сборка после снятия технологической оснастки: 6 – угловые упоры; г – сборка подготовлена к опыту: 5 – нагружающие устройства (НУ)



Рис. 4. Схема нагружения ВПГ сходящимися клиновидными ударными волнами: а – блок ПК, нагружаемый двумя клиновидными УВ, б – эквивалентная схема ВПГ

В соответствии с представленной схемой, рис.4, ударного нагружения блока ПК, его ток деполяризации может быть представлен в виде:

$$I_0(t) = \frac{\Delta \Pr}{x_0} \cdot \frac{dV_{CHC}}{dt}$$
(1)

где $V_{c,\infty} = x_0 \cdot n \cdot S(t)$ – ударно-сжатый объем блока ПК, S(t) – площадь сжатой зоны одной из пьезопластин, x_0 – расстояние между электродами пьезоэлемента, n – число пьезопластин в блоке.

В процессе ударного нагружения блока можно выделить два интервала времени:

• во время первого интервала $0 < t < t_n$ блок ПК нагружается расходящейся клиновидной УВ. При этом время $t_n = y_0/2D$ равно времени полного нагружения ближней грани блока ПК, где D – скорость детонационной волны, y_0 – длина блока ПК;

• во время второго интервала $t_n < t < T$ блок ПК дополнительно нагружается сходящейся клиновидной волной, движущейся от одной к другой грани блока. При этом время $T-t_n = y_0/2D$ равно времени полного нагружения дальней грани блока.

Поскольку сжатие блока ПК происходит с двух сторон, то площадь электродов пьезопластин, соответствующая ударно сжатой части блока, можно записать сначала для первого интервала времени $0 < t < t_n$, а затем и для второго $t_n < t < T$ в виде:

$$S(t) = nDut^{2} + nDu\left(t - t_{n}\right)^{2}$$
⁽²⁾

$$S(t) = S_1(t) = nDut^2$$
(3)

Производная площади нагружения S(t) будет иметь один и тот же вид в первом и втором интервале времени работы ВПГ 0 < t < T:

$$\frac{dS(t)}{dt} = \frac{d(nDut^2)}{dt} = 2nDut \tag{4}$$

В соответствии с этим, выражение для тока деполяризации будут иметь вид:

$$I_0(t) = 2nP_r Dut \tag{5}$$

Электрическое состояние эквивалентной схемы (рис. 4,б) описывается уравнением 6

$$LC_0 \frac{d^2I}{dt^2} + I = 2nP_r uDt \tag{6}$$

Его решение при нулевых начальных условиях I(0) = 0 и $\dot{I}(0) = 0$ имеет вид:

$$I(t) = 2nP_r u D\left(t - \frac{1}{\omega}\sin(\omega t)\right)$$
(7)

Полученное решение хорошо согласуется с результатами эксперимента и используется при расчете конструкции ВПГ.

В рассматриваемом ВПГ первый генератор УВ нагружает блок ПК клиновидной расходящейся ударной волной. Второй генератор УВ срабатывает

через заданное время и отличался от первого тем, что его инициирование производится с помощью детонационного распределителя по двум линиям на краях электрического блока ВПГ (рис. 4), и образовывалась сходящаяся клиновидная УВ с отставанием в центре. В результате этого ударное нагружение блока ПК осуществлялось двумя движущимися навстречу клиновидными ударными волнами так, как это показано на рис. 5 и рис. 6.

При анализе работы ВПГ с энергией $W_0 \approx 25$ Дж, в котором блок ПК последовательно нагружался двумя клиновидными ударными волнами, было отмечено, что дальнейшее повышение вырабатываемой им энергии может быть осуществлено увеличением генерируемого тока за счет добавления еще одного пьезоэлемента в электрический блок ВПГ.

$$W = \frac{L \cdot I^2}{2} \tag{8}$$

где W – генерируемая энергия ВПГ, I – ток ВПГ, L – индуктивность нагрузки.

Поскольку существующая конструкция уже работала с параметрами, близкими к максимальным по напряженности поля E_0 внутри ПК и напряжению на выходе ВПГ V_0 , то в соответствии с [8]),

$$V_0 = I_0 \sqrt{\frac{L}{C}} \sin(\omega \cdot t)$$
(9)

использованы индуктивные датчики нуля ДИН-1 и ДИН-2, закрепленные на вставках розеток ЭД (рис. 5,б).



Рис. 5. Постановка датчиков МКСИ на экспериментальную сборку и ЭД: а – экспериментальная сборка с установленными индуктивными датчиками нуля (ДИН-1), б – установка ДИН – 1 на ЭД

Вид на распределители с местами установки ЭД, индуктивных датчиков нуля и ПО показан на рис. 6,а. Задержку времени срабатывания нагружающих устройств осуществляли за счет смещения расположения точек инициирования на каналах детонационной разводки.

Для предотвращения возможного электрического пробоя по поверхности электрического блока Таблица 1

			·······	1		· F · · ·			
№ опыта	L, мкГн	С _{пк} ,	(ε=1600),	Т _{вкл} ,	E ₀ ,	I _{max} , A	V ₀ , кВ	W ₀ , Дж	U _{пк} , см ³
Эпыт 25 Дж	1050	2,72		3,2	2,2	220	52	25,2	115,2
асчет 25 Дж	1050	2,04		3,2	2,2	220	52,6	25,3	115,2
асчет 50 Лж	1050	3 32		4 5	2.5	311	59	50.2	172.8

Параметры ВПГ в расчетах и эксперименте

 $T_{вкл}$ – задержка времени включения второго каскада (распределителя) НУ, E_0 – рабочее электрическое поле блока ПК, I_{max} – максимальный рабочий ток ВПГ, V_0 – максимальное рабочее напряжение на выходе ВПГ, W_0 – энергия, переданная в нагрузку, $U_{пк}$ – объем пьезокерамики ВПГ.

где С – собственная емкость ВПГ, $\omega = \sqrt{1/LC_0}$ потребовалось увеличить время включения второго каскада (распределителя) НУ на 1,3 мкс. При этом была уменьшена скорость нарастания тока в цепи нагрузки, что привело к сохранению напряжения на выходах ВПГ в допустимом диапазоне (см. табл. 1).

Проведен эксперимент в постановке, показанной на рис. 5 и рис. 6.

Поскольку редакция опыта предполагала для ограничения максимального напряжения в электрическом блоке ВПГ использовать сдвиг по времени между срабатываниями НУ, дополнительно проводили измерения их временных параметров. На наружных торцах концевых инициирующих элементов распределителей были установлены пьезоотметчики (ПО) методики контроля системы инициирования. Всего было установлено четыре ПО на одном и два ПО на другом распределителе, рис. 6. Для контроля срабатывания обоих задействованных в опыте ЭД были

ВПГ, он был помещен в контейнер с трансформаторным маслом (рис. 6,6), поэтому каждое НУ инициировалось своим ЭД.

В опыте получены следующие результаты:

 индуктивными датчиками нуля зарегистрированы токи в обоих ЭД. Разновременность прихода инициирующего импульса на ЭД составила менее 5 нс;

 пьезоотметчиками измерено время срабатывания распределителей и их разновременность.

В результате проведенного опыта:

• получен ток 320 А при напряжении 55 кВ на индуктивную нагрузку 1034 мкГн. Энергия запитки составила рекордное значение 53 Дж, что составляет ~0,3 Дж/см³. Полученный результат в целом совпадает с ожидаемыми расчетными значениями, что свидетельствует о корректной работе модели расчета;

• время от начала инициирования до максимума тока запитки индуктивной нагрузки составило (20,2 \pm 05) мкс.

Полученные результаты представлены в табл. 2.



Рис. 6. Постановка опыта: а – вид на ВПГ со стороны распределителей, б – макет ВПГ с установленными датчиками контроля системы инициирования



Рис. 7. Результаты опыта: а – результаты контроля системы инициирования, б – ток и напряжение в индуктивной нагрузке

Таблица 2

№ опыта	L, мкГн	Т _{вкл} , мкс	Е ₀ , кВ/мм	I _{Max} , A	V ₀ , кВ	W ₀ , Дж	U _{пк} , см ³
Опыт 25 Дж	1050	3,7	2,2	220	52	25,6	115,2
Расчет 50 Дж	1050	4,35	2,5	318	60	53,2	172,8
Опыт 50 Дж	1050	4,23	2,3	320	55	53	172,8

Параметры ВПГ в расчете и экспериментах

 $T_{вкл}$ – задержка времени включения второго каскада нагружающего устройства, E_0 – рабочее электрическое поле блока ПК, I_{max} – максимальный рабочий ток ВПГ, V_0 – максимальное рабочее напряжение на выходе ВПГ, W_0 – энергия, переданная в нагрузку, $U_{пк}$ – объем пьезокерамики ВПГ.

Таким образом за счет добавления еще одного пьезоэлемента в электрический блок ВПГ (увеличили объем пьезокерамики в 1,5 раза), при сохранение объема ВПГ, благодаря перестройке схемы сборки и применению новой технологии изготовления ВПГ, увеличили генерируемый взрывным пьезогенератором ток ~ в 1,5 раза с 220 А до 320 А. Энергия, передаваемая в индуктивную нагрузку, увеличилась в ~2 раза с 23 Дж до 53 Дж. Напряжение на выходе ВПГ за счет изменения времени включения второго нагружающего устройства осталось прежним ~55 кВ.

Литература

1. Демидов В. А., Пляшкевич Л. Н., Селемир В. Д. Магнитокумулятивные генераторы – импульсные источники энергии. моногр. // Саров: ВНИИЭФ, 2011, 439 с.

2. Demidov V. A., Sadunov V. D., Kazakov S. A., Golosov S. N., Utenkov A. A., Boriskin A. S., Antipov M. V., Blinov A. V., Yurtov I. V. Studying Autonomous Magneto-Cumulative Energy Source. // PLASMA SCIENCE, January 2015, Vol. 43, No 1, P. 339–343

3. Садунов В. Д., Трищенко Т. В., Утенков А. А., Блинов А. В., Антипов М. В., Демидов В. А. Патент РФ № 2419952. Способ генерирования электрического импульса в индуктивной нагрузке взрывного пьезогенератора. Опубл. в Бюл. № 15, 2011.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВОЙ СЖИМАЕМОСТИ АБС 20/20 С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДИК МАНГАНИНОВОГО ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ И МИКРОВОЛНОВОЙ ДИАГНОСТИКИ В ДИАПАЗОНЕ ДАВЛЕНИЙ 8–40 ГПА

<u>А. В. Цветков</u>, Е. Н. Богданов, М. Е. Шаврин, В. И. Буренин, А. В. Родионов, Г. А. Козлов, Е. В. Рычагов

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

Введение

Распространение ударных волн в органических веществах сопровождается физико-химическими превращениями, связанными с преобразованием формы молекул и разрывом связей в них. Практический интерес представляет конструкционный материал АБС 20/20 (сополимера стирола (C₈H₈) с бутадиеном (C_4H_6 , 20%) и акрилонитрилом (C_3H_3N , 20 %), $\rho_0 = 1,05$), который используется при изготовлении прецизионных устройств для генерации мощных ударных волн и при моделировании слоистых термоядерных мишеней. В интервале амплитуд ударных волн 8-40 ГПа АБС 20/20, как и многие другие органические вещества, претерпевает физикохимические превращения, что проявляется в виде излома на его ударной адиабате. Уравнения состояния полимеров в широком диапазоне изменения давления, учитывающие данные превращения, являются необходимым элементом для численного решения задач физики высоких плотностей энергии.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования ударно-волновой сжимаемости АБС 20/20. Целью работы являлось применение методик непрерывной регистрации для определения параметров ударного сжатия полимерных материалов. Исследования проведены с применением методик манганинового датчика и микроволновой диагностики с длинами волн зондирующего излучения 3,2 мм и 2,1 мм. Посредством последней в экспериментах регистрировались одновременно значения волновых D и массовых скоростей U, что вме-

сте с регистрацией профилей давления P за фронтом ударной волны манганиновыми датчиками делает измерения полными: $P = \rho_0 DU$, где ρ_0 – начальная плотность материала.

Постановка экспериментов

Эксперименты проводились по двум основным схемам, представленным на рис.1.

Ударная волна в образцах АБС 20/20 создавалась при распаде разрыва на границе с металлическим экраном. В схеме 1, рис. 1,а, ударная волна в экране формируется при торможении продуктов взрыва активного заряда взрывчатого вещества, в схеме 2, рис. 1,б, продукты взрыва активного заряда разгоняют металлический ударник, который, в свою очередь, взаимодействует с экраном. Плоский детонационный фронт в активном заряде диаметром 120 мм создавался при помощи генераторов плоской ударной волны. В качестве активных зарядов использовались цилиндрические детали из прессованного ТНТ и состава на основе гексогена разной длины и диаметром 120 мм. Исследуемые образцы АБС 20/20 диаметром 50 мм и толщиной 14 мм размещались вплотную к экранам.

Параметры конструкций нагружающих устройств, используемых в экспериментах, представлены в табл. 1.

Движение ударной волны в исследуемых образцах регистрировалось при помощи радиоинтерферометров [1–4] с длинами волн зондирующего излучения 3,2 мм и 2,1 мм, которое вводилось в образец через диэлектрический волновод из фторопласта-4 и излучатель из полистирола.



Рис. 1. Схемы проведения экспериментов: а – схема 1: 1 – электродетонатор, 2 – генератор плоской волны, 3 – активный заряд, 4 – воздушный зазор, 5 – экран (алюминий), 6 – манганиновые датчики, 7 – образец АБС 20/20, 8 – антенна радиоинтерферометра; 6 – схема 2: 1 – электродетонатор, 2 – генератор плоской волны, 3 – активный заряд, 4 – ударник (алюминий), 5 – воздушный зазор, 6 – экран (алюминий), 7 – манганиновые датчики, 8 – образец АБС 20/20, 9 – антенна радиоинтерферометра

Конструкции нагружающих устройств

№ опыта	Заряд ВВ, мм	Толщина ударника, мм	Толщина экрана, мм	Скорость свободной поверхности экрана W, км/с
1	Ø120 × 40	—	10	$1,90 \pm 0,02$
2	Ø120 × 40	—	10	$2,27 \pm 0,02$
3	Ø120 × 40	-	10	$2,27 \pm 0,02$
4	Ø120 × 180	-	10	$2,93 \pm 0,02$
5	Ø120 × 40	6	6	$3,15 \pm 0,02$
6	Ø120 × 180	—	10	$3,39 \pm 0,02$
7	Ø120 × 60	6	6	$4,14 \pm 0,02$
8	Ø120 × 100	6	6	$4,\!49 \pm 0,\!04$
9	$\emptyset 120 \times 100$	6	4	$4,\!49 \pm 0,\!04$

В данной работе использование радиоволнового метода позволило в экспериментах

непосредственно определить величины волновой *D* и массовой *U* скорости.

На рис. 2 представлена схема распространения радиоизлучения в исследуемой сборке.



Рис. 2. Падение радиоизлучения на систему фронт ударной волны – экран

В представленной на рис. 2 системе часть радиоизлучения будет отражаться от фронта ударной волны, другая же часть пройдет сквозь него, отразится от границы раздела сжатое вещество-экран и вновь пройдет сквозь ударный фронт.

Амплитуду принимаемого сигнала можно записать следующим образом [5]:

$$S(t) = \sum_{m} \sum_{n} A_{mn} \cos\left(\omega_0 t + 2\pi \left(\frac{2n(D-U)}{\lambda_0}\sqrt{\varepsilon_2} - \frac{2mD}{\lambda_0}\sqrt{\varepsilon_1}\right)t + \Delta\varphi_{mn}\right)$$
(1)

где ω_0 – круговая частота излучения, ε_1 и ε_2 – коэффициенты диэлектрической проницаемости невозмущенного и сжатого вещества соответственно, A_{mn} – коэффициенты мод излучения, а $\Delta \varphi_{mn}$ – сдвиг фаз мод. Анализируя данное выражение, можно увидеть, что в самом простом случае с отсутствием переотражений излучения (моды с m = 1 n = 0 и m = 1 n = 1) интерферограмма имеет вид:

$$A(t) = A_{10} \cos\left(2\pi \frac{2D}{\lambda_0} \sqrt{\varepsilon_1} t + \Delta \varphi_1\right) + A_{11} \cos\left(2\pi \left(\frac{2(D-U)}{\lambda_0} \sqrt{\varepsilon_2} - \frac{2D}{\lambda_0} \sqrt{\varepsilon_1}\right) t + \Delta \varphi_2\right)$$
(2)

Следует заметить, что в реальном эксперименте в сигнале данные спектральные компоненты являются преобладающими вследствие малой мощности высших гармоник сигнала из-за потерь энергии при переотражениях на границах раздела.

Сигнал (2) является суммой двух компонент – высокочастотной с частотой:

$$F_1 = \frac{2D}{\lambda_0} \sqrt{\varepsilon_1} \tag{3}$$

и низкочастотной с частотой:

$$F_2 = \frac{2D}{\lambda_0} \sqrt{\varepsilon_1} - \frac{2(D-U)}{\lambda_0} \sqrt{\varepsilon_2}$$
(4)

Для определения скорости ударной воны *D* необходимо отфильтровать компоненту с частотой $F_1 = \frac{2D}{\lambda_0} \sqrt{\varepsilon_1}$. Для определения массовой скорости *U*,

равной скорости границы раздела сжатое веществоэкран, необходимо знать коэффициент диэлектрической проницаемости сжатой среды ε_2 , который можно определить по отношению интенсивности компоненты сигнала, отраженного от фронта ударной вол-

ны (гармоника I_{10} с частотой $F_1 = \frac{2D}{\lambda_0} \sqrt{\varepsilon_1}$), к интен-

сивности сигнала, отраженного от экрана (гармоника

$$I_{11} \text{ с частотой } F_2 = \frac{2D}{\lambda_0} \sqrt{\varepsilon_1} - \frac{2(D-U)}{\lambda_0} \sqrt{\varepsilon_2} :$$
$$R = \frac{I_{10}}{I_{11}} = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{4\sqrt{\varepsilon_1}\sqrt{\varepsilon_2}}$$
(5)

Из соотношения (5) можно получить выражение для коэффициента диэлектрической проницаемости ударно-сжатого вещества ε_2 :

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 (1 + 8 R^2 + 4 R \sqrt{4 R^2 + 1}) \tag{6}$$

а из (4) – выражение для массовой скорости:

$$U = \frac{F_2 \lambda_0}{2\sqrt{\varepsilon_1}} + D \frac{(\sqrt{\varepsilon_2} - \sqrt{\varepsilon_1})}{\sqrt{\varepsilon_2}}$$
(7)

Таким образом, для определения массовой скорости U (скорости контактной границы) необходимо

определить волновую скорость D и провести амплитудно-частотный анализ экспериментальной интерферограммы с целью определения отношения R гармоник сигнала (5) и значения частоты F_2 .

Для регистрации профилей давления на границе экран-образец и определения значений амплитуд Pи скоростей D ударных волн в АБС 20/20 применялась методика манганинового датчика давления [6– 8]. Манганиновые датчики изготовлены из манганиновой фольги толщиной 30 мкм, полная толщина датчика вместе с изоляцией составляла около 230 мкм. Сопротивление активного элемента датчика составляет около 0,3 Ом. Переход от регистрируемого в эксперименте напряжения U на датчике к давлению P производится с использованием калибровочной зависимости электрического сопротивления манганина от давления ударного сжатия:

$$P = a + b(U/U_0 - 1) + c(U/U_0 - 1)^2 + + d(U/U_0 - 1)^3,$$
(8)

где U/U_0 – отношение амплитуд напряжений на датчике после и до прихода волны сжатия, которое определялось по экспериментальным осциллограммам, *a*, *b*, *c* и *d* – коэффициенты калибровочной зависимости манганинового датчика: *a* = 0,2854 ГПа, *b* = 35,051 ГПа, *c* = 1,7776 ГПа, *d* = 2,0568 ГПа. Погрешность определения давления манганиновыми датчиками составляет около 5 %.

Результаты экспериментов

На рис. 3 приведены характерные профили давления в АБС 20/20, зарегистрированные манганиновыми датчиками. Как видно из рис. 3, все профили имеют «столообразный» вид, спад давления на кривых 2 и 3 обусловлен приходом тыльной волны разрежения.

На рис. 4 для иллюстрации представлена экспериментальная интерферограмма, зарегистрированная в одном из экспериментов радиоинтерферометром с длиной волны зондирующего излучения 3,2 мм. Из графика, рис. 4, можно видеть, что сигнал является результатом биений двух синусоидальных сигналов с различными частотами и может быть описан выражением (2).



Рис. 3. Профили давления в АБС 20/20: 1 – опыт № 3; 2 – опыт № 6; 3 – опыт № 7



Рис. 4. Экспериментальная интерферограмма. Характерные моменты времени: t₁ – вход ударной волны в образец, t₂ – выход ударной волны из образца

Результаты всех опытов с использованием микроволновой диагностики представлены в табл. 2, с использованием методики манганинового датчика давления – в табл. 3. Экспериментальные точки на ударной адиабате для методики манганинового датчика давления определялись методом отражения ударных адиабат по измеренным значениям давления за фронтом ударной волны и изэнтропе расширения алюминия (материал экрана).

Таблица 2

	<i>D</i> _{РИФ} , км/с		U _{РИФ} , км/с		Р _{РИФ} , ГПа	
	$\lambda_0 = 2,1$ мм	$\lambda_0 = 3,2$ мм	$\lambda_0 = 2,1$ мм	$\lambda_0 = 3,2$ mm	$\lambda_0 = 2,1$ мм	$\lambda_0 = 3,2$ мм
1	-	$4,73 \pm 0,09$	-	$1,\!48 \pm 0,\!02$	-	$7,35 \pm 0,24$
2	—	$4,92 \pm 0,14$	—	$1,58 \pm 0,03$	-	$8,16 \pm 0,39$
3	$5,19 \pm 0,05$	$5,21 \pm 0,05$	$1,73 \pm 0,02$	$1,69 \pm 0,04$	$9,43 \pm 0,20$	$9,25 \pm 0,31$
4	-	$5,83 \pm 0,09$	-	$2,22 \pm 0,03$	-	$13,59 \pm 0,40$
5	$6,13 \pm 0,15$	—	$2,\!47 \pm 0,\!06$	_	$15,90 \pm 0,78$	_
6	_	$6,22 \pm 0,08$	_	$2,57 \pm 0,05$	-	$16{,}79\pm0{,}54$
7	6,64±0,06	$6,65 \pm 0,06$	$2,74 \pm 0,02$	$2,74 \pm 0,02$	$19,10 \pm 0,33$	$19,13 \pm 0,33$
8	_	$6,74 \pm 0,07$	_	$3,31 \pm 0,06$	-	$23,\!42 \pm 0,\!67$
9	_	$6,77 \pm 0,35$	_	$3,55 \pm 0,18$	_	$25,24 \pm 2,58$
10	$7,05 \pm 0,07$	$7,12 \pm 0,07$	$3,32 \pm 0,04$	$3,65 \pm 0,10$	$24,58 \pm 0,54$	$27,29 \pm 1,02$

Экспериментальные результаты с применением микроволновой диагностики

где λ_0 – длина волны излучения радиоинтерферометра, $D_{PU\Phi}$ – волновая скорость в образце, определенная радиоинтерферометром, $U_{PU\Phi}$ – массовая скорость в образце, определенная радиоинтерферометром, $P_{PU\Phi}$ – давление в образце, определенное по $D_{PU\Phi}$ и $U_{PU\Phi}$: $P_{PU\Phi} = \rho_0 D_{PU\Phi} U_{PU\Phi}$.

Экспериментальные результаты с применением методикиманганинового датчика давления

№ Опыта	3	6	7	8			
Р _М , ГПа	$9,26 \pm 0,46$	$15,5 \pm 0,78$	$21,61 \pm 1,08$	$23,43 \pm 1,17$			
D _{M,} км/с	$5,24 \pm 0,16$	$6,50 \pm 0,13$	$6,99 \pm 0,21$	$6,85 \pm 0,13$			
U _{M,} км/с	$1,68 \pm 0,03$	$2,27 \pm 0,07$	$2,94 \pm 0,06$	$3,26 \pm 0,10$			
где $P_{\rm M}$ – давление в образце, определенное манганиновым датчиком, $D_{\rm M}$ – волновая скорость в образце, определенная манганиновым датчиком, $U_{\rm M}$ – массовая скорость в образце, определенная по $P_{\rm M}$ и $D_{\rm M}$: $U_{\rm M} = P_{\rm M} / (\rho_0 D_{\rm M})$.							

На рис. 5 и рис.6 полученные результаты по ударно-волновой сжимаемости АБС 20/20 представлены в *D-U*-переменных. На графиках также приведены данные для полистирола – сополимера стирола – основного компонента АБС 20/20 [9, 10].



Рис. 5. Ударная адиабата в *D-U*-переменных. Метод микроволновой диагностики: 1 – полистирол [9]; 2 – полистирол [10]; 3 – радиоинтерферометр, настоящая работа, λ₀ = 3,2мм; 4 – радиоинтерферометр, настоящая работа, λ₀ = 2,1мм

Представленные на рис. 5 и рис. 6 данные показывают удовлетворительное согласие полученных в настоящей работе данных для АБС 20/20 с применением методик микроволновой диагностики и манганинового датчика давления с данными для полистирола.





На рис. 7 и рис. 8 полученные результаты по ударно-волновой сжимаемости АБС 20/20 представлены в *P*-р-переменных. На графиках также приведены данные для полистирола – сополимера стирола – основного компонента АБС 20/20 [9, 10].



Рис. 7. Ударная адиабата в *P*- ρ -переменных. Метод микроволновой диагностики: 1 – полистирол [9]; 2 – полистирол [10]; 3 – радиоинтерферометр, настоящая работа, $\lambda_0 = 3,2$ мм; 4 – радиоинтерферометр, настоящая работа, $\lambda_0 = 2,1$ мм



Рис. 8. Ударная адиабата в *Р*-р -переменных. Метод манганинового датчика давления: 1 – полистирол [9]; 2 – полистирол [10]; 3 – манганин настоящая работа

Заключение

Проведены экспериментальные исследования ударно-волновой сжимаемости АБС 20/20 в диапазоне давлений 7–25 ГПа. На основании полученных результатов показано, что данные по ударно-волновой сжимаемости АБС 20/20 хорошо согласуются с аналогичными данными для полистирола – сополимера стирола – основного компонента АБС 20/20. Зарегистрировано физико-химическое превращение, проявляющееся в виде излома на ударной адиабате, в диапазоне давлений 20,8–23,4 ГПа.

Отработана методика измерения полного набора параметров ударного сжатия: давления, массовой и волновой скоростей. Полученные данные могут быть использованы для верификации уравнений состояния полимеров.

Литература

1. Бельский В. М., Михайлов А. Л., Родионов А. В., Седов А. А. // ФГВ, 2011 г., т. 47, № 6, с. 29–41.

2. Rae P. J., Glover B. B., Gunderson J. A., Perry W. Lee // Shock Compression of Condensed Matter, 2011.

3. Невозмущающие методы диагностики быстропротекающих процессов \ Под ред. Доктора техн. наук. А. Л. Михайлова. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2015. 322 с.

4. Михайлов А. Л., Костюков В. Е., Орехов Ю. И. и др. Некоторые результаты применения в ИФВ РФЯЦ-ВНИИЭФ радиоинтерферометров миллиметрового диапазона длин волн для изучения газодинамических процессов. Труды международной конференции «VII Харитоновские тематические научные чтения. Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны». 14–18 марта 2005. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005, С. 649–654.

5. Родионов А.В., Бельский В.М., Богданов Е. Н. и др. Труды международной конференции «XI Харитоновские тематические научные чтения». Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2009, С. 69–73.

6. Павловский М. Н., Комиссаров В. В. Особенности фазового превращения висмута в волне разрежения. ЖЭТФ, 1982, Т. 83, № 6(12), С. 2146–2151.

7. Павловский М. Н., Комиссаров В. В. Полиморфные превращения олова в ударных волнах сжатия и разгрузки. ЖЭТФ, 1990, т. 98, №5(11), С. 1748–1751.

8. Бельский В. М., Комиссаров В. В. Инициирование пластифицированного октогена тремя ударными волнами. Труды международной конференции «VII Харитоновские тематические научные чтения. Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны» Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005. С. 148–151.

9. LASL Shock Hugoniot Data. Marsh S.P. U.California Press: Berkeley 1980, 658 c.

10. Экспериментальные данные по ударноволновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ / Под ред. Р. Ф. Трунина. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2006, 531 с.

РАСЧЕТНАЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДАТЧИКА ЧАСТОТНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ВЧ ГЕНЕРАТОРА УСКОРИТЕЛЯ БЕТА-8

<u>А. Н. Шеин</u>, А. В. Тельнов, М. Л. Сметанин, Л. Е. Поляков

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

В работе представлен способ трехмерного электродинамического моделирования индикаторной петли – датчика, работающего в цепи частотной обратной связи питающего ВЧ генератора электронного ускорителя БЕТА-8 [1]. ВЧ генератор в процессе эксплуатации должен оперативно подстраиваться в резонанс с высокодобротным (добротность ≈48000) ускоряющим коаксиальным резонатором, рабочая частота которого ≈99.9 МГц. Уходы частоты могут быть вызваны как изменением геометрии ускоряющего резонатора в зависимости от температуры его стенок, рабочего вакуума в его внутренней полости, так и ряда других возможных причин. Возможность подстройки частоты реализована по косвенному измерению коэффициента стоячей волны (КСВН) в месте возникновения локальных минимумов напряженности электрического поля (максимумах напряженности магнитного поля) в передающем фидере при частотной расстройке системы. Проведено моделирование и расчет собственно магнитной индикаторной петли, расположенной на корпусе передающего коаксиального ВЧ фидера. При этом выбрана ее оптимальная геометрия (эффективная площадь петли), обеспечивающая сигнальное электрическое напряжение с амплитудой 5-10 В (в случае стоячей волны при передаваемой средней мощности 180 кВт). Такой сигнал достаточен для функционирования обратной связи ВЧ генератора. Рассмотрено влияние электрического экрана, устанавливаемого на данную петлю для улучшения качества регистрируемого сигнала. Реализована расчетная модель передающей линии – коаксиального фидера (с установленной проектируемой петлей), нагруженного на резонансный контур - модель ускоряющего коаксиального резонатора. На финальном этапе создана полная расчетная модель ВЧ резонансной системы ускорителя БЕТА-8, для которой смоделированы как рабочий режим с оптимальной связью с ускоряющим резонатором на рабочей частоте, так и режим рассогласования, возникающий при частотной расстройке системы. Для каждого из режимов проведена расчетная калибровка разрабатываемого датчика.

Введение

Разработка резонансного электронного ускорителя БЕТА-8 осуществляется в РФЯЦ-ВНИИЭФ на протяжении ряда последних лет [1, 2]. Создание ускорительной установки со средней мощностью электронного пучка до 300 кВт с дискретным диапазоном регулировки энергий ускоренных электронов – от 1,5 до 7,5 МэВ, предназначенного для проведения радиационных исследований разрушения или модификации конструкционных материалов, основано на требованиях, обоснованных ранее [1, 3].

При включении ВЧ генератора – источника питания резонансного электронного ускорителя БЕТА-8 на ускоряющий коаксиальный резонатор требуется введение в действие двух цепей обратной связи генератора с резонатором. Первая цепь – частотной обратной связи, позволяет подстраивать рабочую частоту ВЧ генератора под резонансную частоту коаксиального ускоряющего резонатора (ускоряющий резонатор высокодобротная система, требующая для работы ВЧ питание с высокой стабильностью). Основным элементом данной цепи является индикаторная петля магнитной связи, устанавливаемая в передающем фидере, связывающем ВЧ генератор и узел ввода ВЧ мощности (УВМ), в месте возникновения узла напряжения при возможном рассогласовании. Рассогласованный режим передачи в ВЧ фидере может установиться при отклонении резонансной частоты передаваемого ВЧ сигнала от рабочего значения. При этом на петле наводится напряжение, которое будет зафиксировано системой управления ВЧ генератора. Генератор в этом случае автоматически начнет перестраивать несущую частоту до тех пор, пока на петле не перестанет наводиться напряжение. Его отсутствие будет говорить о том, что система настроена в резонанс с ускоряющим резонатором.

Ниже представлен способ трехмерного электродинамического моделирования индикаторной петли датчика, работающего в цепи частотной обратной связи питающего ВЧ генератора электронного ускорителя БЕТА-8.

Расчетная модель датчика и определение оптимальных геометрических параметров петли

В качестве ВЧ фидера, способного передавать сигнал в рабочем диапазоне системы ВЧ питания ускорителя БЕТА-8 (от 98 до 102 МГц), со средней мощностью до 180 кВт, используется коаксиальная линия воздушного заполнения. Волновое сопротивление линии – 50 Ом, внутренний диаметр внешнего проводника – 160 мм, внешний диаметр внутреннего проводника – 70 мм, материал проводников – медь. Данная линия способна обеспечивать как штатный

режим передачи ВЧ мощности (режим бегущей волны), так и в случае рассогласования и возникновения отражений от нагрузки способна выдерживать режим перенапряжения (режим стоячей волны).

Линия передачи связывает ВЧ генератор с УВМ, расположенным на верхней торцевой стенке ускоряющего коаксиального резонатора. Положение мест подключения линии к генератору с одной стороны и УВМ с другой определяет сложную трехмерную геометрию ВЧ фидера – перепад высот ≈ 2 м, горизонтальное расстояние между точками подключения $\approx 1,5-2$ м.На сегодняшний день конструкция такой линии передачи разработана, изготовлена и успешно испытана [2].

Для обеспечения функционирования ВЧ генератора требуется установить в линию передачи датчик, способный фиксировать возможное появление режима стоячей волны в фидере. Такой датчик используется в частотной обратной цепи связи с ВЧ генератором и должен обеспечивать наведение напряжения на своих зажимах в пределах от 5 до 10 Вв режиме рассогласования припередаче максимальной ВЧ мощности 180 кВт на рабочей частоте ускорителя – 99,9 МГц. Такие требования определены системой автоматического управления ВЧ генератора.

Датчик проектируется на основе петли связи с магнитным полем в фидере. Его место установки определяется нахождением узла напряженности электрического поля (максимумом напряженности магнитного поля) при возникновении стоячей волны в режиме рассогласования.

На первом этапе проектирования методом численного трехмерного моделирования решалась электродинамическая задача для модели, состоящей из прямолинейного отрезка коаксиального волновода (160/70мм) длиной 3 м с резистивной нагрузкой, величина которой изменялась в пределах 50–10000 Ом. Расчет проводился исходя из того, что на вход линии подается ВЧ сигнал с частотой 100 МГц и средней мощностью 180 кВт. Путем варьирования сопротивления нагрузки изменялся режим работы линии от согласованного до режима холостого хода. В поперечном сечении линии, соответствующем месту возникновения узла напряженности электрического поля (в режиме холостого хода), на внешнем проводнике вводилась модель измерительной петли (рис. 1).



Рис. 1. Фрагмент места расположения петли магнитной связи в передающем фидере

Индикаторная петля магнитной связи спроектирована на основе соединительного разъема СР-50-165ФВ и петли из полосы меди толщиной 1 мм и шириной 6 мм. Петля имеет дополнительный экран от возможных наводок со стороны электрического поля (рис. 2).



Рис. 2. Индикаторная петля магнитной связи

Величина напряжения, наводимого на петле, определяется ее площадью (произведением высоты и длины петли). Путем изменения площади петли исследовано изменение уровня напряжения на выходе датчика при установлении режима стоячей волны в линии. Площадь измерительной петли последовательно уменьшалась с изменением ее высоты и ширины в пределах от 125 до 30 мм² (см. таблицу). Напряжение сигнала определялось после нахождения коэффициента передачи по напряжению между выходом датчика и вводом ВЧ мощности.

Требуемое значение наводимого на петле напряжения сигнала достигается при площади петли – 30–50 мм².

I I I I I I I I I I I I I I I I I I I			
Длина петли, мм	Высота петли, мм	Площадь петли, мм ²	Напряжение на петле, В
25	5	125	21,70
20	5	100	17,55
15	5	75	13,46
10	7	70	12,65
10	5	50	9,48
10	3	30	6,53

Расчетная зависимость напряжения на петле от ее размеров и площади

Исследование влияния и целесообразности установки экрана осуществлялось при изменении длины петли с экраном и без него и сравнении напряжений на выходе датчика (рис. 3).

Как видно из рисунка, экран тем сильнее повышает уровень сигнала, чем больше длина петли. Это обусловлено тем, что экранируются наводки от электрической компоненты волны в волноводе, влияние которых усиливается с увеличением длины петли датчика. Для рассматриваемой модели экран не является необходимым, так как дает увеличение сигнала на ~0,5 В (\approx 5 %).


Рис. 3. Изменение амплитуды сигнала на выходе датчика в зависимости от длины петли с экраном и без

Расчетное нахождение местоположения индикаторной петли–датчика, в передающем ВЧ фидере

В силу того, что геометрия передающего фидера имеет сложную форму, нахождение места расположения индикаторной петли – узла напряженности электрического поля стоячей волны, представляет собой определенную трудность. Задачу осложняет то, что линия нагружена на высокодобротный ускоряющий резонатор с УВМ.

Решение задачи проводилось с использованием численных трехмерных электродинамических расчетов системы, состоящей из передающего фидера, УВМ и ускоряющего резонатора (рис. 4). УВМ обеспечивает согласование ВЧ системы в режиме так называемого «нулевого тока» пучка, когда вся передаваемая мощность ВЧ сигнала трансформируется в мощность потерь в стенках резонатора.

На рис. 6,а представлено распределение электрической напряженности в передающем фидере в случае согласования (частота 99,9351 МГц). Случай рассогласования с возникновением стоячей волны иллюстрирует рис. 6,6, на котором отображено распределение электрической напряженности в передающем фидере на частоте 100,05 МГц. Первый узел напряжения возникает на расстоянии в 618 мм от начала отсчета на линии проецирования, совпадающей с осью центрального проводника фидера (рис. 4). Начало отсчета соответствует месту подключения центрального проводника фидера к центральному проводнику УВМ.



Рис. 4. Расчетная модель резонансной ускоряющей системы: 1 – ускоряющий резонатор; 2 – УВМ; 3 – передающий фидер; 4 – линияпроецирования;5 – сечение для установки индикаторной петли

На рис. 5 приведена расчетная зависимость КСВН на входе резонансной ускоряющей системы. На частоте 99,9351 МГц КСВН = 1,11 – это режим согласования, при котором в передающем фидере устанавливается режим бегущей волны. ВЧ сигнал практически без потери мощности передается в резонатор.



Рис. 5. Расчетное значение КСВН на входе резонансной ускоряющей системы

Таким образом, определено место, где возможно установить индикаторную петлю–датчик частотной цепи обратной связи ВЧ генератора.



Рис. 6. Расчетные зависимости напряженности электрического поля вдоль оси передающего волновода: а – при согласовании, б – при рассогласовании

В дальнейшем в расчеты была включена полученная ранее модель датчика с выбранными геометрическими размерами петли. Датчик был установлен в найденное местоположение минимума электрической компоненты ВЧ поля полной расчетной модели ВЧ системы. В результате была получена следующая зависимость величины амплитуды напряжения на измерительной петле от частоты, которая представлена на рис. 7.



Рис. 7. Зависимость напряжения на измерительной петле от частоты (мощность ВЧ сигнала 180 кВт)

При согласовании с резонатором на частоте 99,9351 МГц величина амплитуды напряжения на петле составляет 4,7 В. При уходе частоты от резонансной (например – 99,94 МГц) значение амплитуды напряжения увеличивается до 9,0 В.

Экспериментальное определение места расположения петли-датчика в передающем ВЧ фидере

Положение минимума электрической напряженности ВЧ поля стоячей волны в передающем фидере было определено экспериментально. При его нахождении использовались результаты расчетов, представленные выше. На фидере было отмерено расстояние соответствующее 618 мм по линии проецирования от места подключения фидера к VBM. В измерениях использовался векторный анализатор цепей Agilent E5071C. В процессе работы проводились измерения коэффициента передачи по напряжению в режиме четырехполюсника. Система, состоящая из передающего фидера VBM и ускоряющего резонатора, запитывалась от одного из портов анализатора цепей, а на его второй порт заводился сигнал с зонда, вводимого в волновод в предполагаемом месте установки разрабатываемого измерительного датчика.

Ниже, на рис. 8, приведена амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) измеряемого коэффициента передачи. Необходимо отметить, что измерения проводились с системой, в которой ускоряющий резонатор, в силу обстоятельств, находился в развакуумированном состоянии, что обуславливает некоторое изменение его геометрии, а как следствие небольшой уход резонансной частоты от рабочего значения (99,9351 МГц [2]) к более низкой частоте 99,817 МГц. На рис. 9 показана фазо-частотная характеристика ФЧХ измеряемого коэффициента передачи.

По АЧХ видно, что наибольший коэффициент передачи соответствует резонансной частоте 99,817 МГц. Отклонение частоты от резонанса соответствует установлению в линии режима стоячей волны, и, как следствие, возникновению в месте измерения узла электрической напряженности, и уменьшению коэффициента передачи. Симметричность этой характеристики относительно резонансной частоты, а также вид ФЧХ, позволяют говорить о правильности проведенных расчетов и выбора места расположения петли-датчика.

В дальнейшем, в найденное место ВЧ передающего фидера будет установлена петля–датчик.



Рис. 8. Изображение АЧХ измеряемого коэффициента передачи



Рис. 9. Изображение ФЧХ измеряемого коэффициента передачи

Заключение

В результате выполненных исследований разработана измерительная петля-датчик частотной цепи обратной связи ВЧ генератора – источника питания резонансного ускорителя электронов БЕТА-8.

Расчетным способом установлена оптимальная геометрия петли связи (высота – 5 мм, длина – 10 мм), обеспечивающая при работе уровень напряжения (5–10 В), требуемый для функционирования системы управления ВЧ генератора.

Рассмотрено влияние электрического экрана, устанавливаемого на данную петлю для улучшения качества регистрируемого сигнала. При выбранных геометрических параметрах петли связи экран позволяет повысить амплитуду выходного сигнала датчика на ~5 %.

Реализована расчетная модель передающей линии – коаксиального фидера (с установленной проектируемой петлей), нагруженного на резонансный контур – модель ускоряющего коаксиального резонатора. При этом рассчитаны как рабочий режим с оптимальной связью с ускоряющим резонатором на резонансной частоте 99,9351 МГц, так и режим рассогласования на частоте 100,05 МГц. В результате расчетным образом найдено место расположения индикаторной петли в передающем фидере, что существенно облегчило экспериментальное определение положения узлов напряжения в линии в случае рассогласования. Найденное таким образом месторасположение петли с удовлетворительной точностью совпало с экспериментально установленным местом. Полученные результаты испытаний и результаты трехмерного компьютерного моделирования позволяют реализовать цепь частотной обратной связи ВЧ генератора для его согласования с ускоряющим резонатором.

Литература

1. Железов С. А., Завьялов Н. В., Назаренко С. Т., Порхаев В. В., Пунин В.Т., Путевской С. А., Сметанин М. Л., Тельнов А. В. Проект электронного резонансного ускорителя непрерывного действия // VIII Харитоновские чтения по проблемам физики высоких плотностей энергии. Сборник докладов. 2006.– Саров – С. 122–128.

2. Гладышев Е. Н., Гордеев В. С., Завьялов Н. В., Кузнецова Н. Н., Придчин С. М., Путевской С. А., Селин И. С., Ситников Н. П., Сметанин М. Л., Тельнов А. В., Тресков С. М., Шориков И. В., Юрлов В. Е. Состояние работ по проекту создания электронного резонансного ускорителя непрерывного действия БЕТА-8 // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. Вып. 20, Ч. 1. 2015. – Саров – С. 184–193.

3. Zavyalov N. V., Zhelezov S. A., Nazarenko S. T., Porkhaev V. V., Punin V. T., Putevskoy S. A., Smetanin M. L., Telnov A. V. ACW Electron Accelerator. The Planned Design and Electrophysical Characteristics // Problems of Atomic Science and Technology. 2006, $N_{\rm D}$ 2, Series: Nuclear Physics Investigations (46). – P. 8–10.

РАЗРАБОТКА МАГНИТНОГО КОРРЕКТОРА ДЛЯ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ПОЛОЖЕНИЯ ПУЧКА РЕЗОНАНСНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ БЕТА-8

<u>И. А. Юрьев</u>, Л. Е. Поляков, Н. Н. Курапов, А. М. Опекунов, А. В. Тельнов, Э. А. Шаравин, А. Н. Шеин, И. В. Шориков

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

Введение

В РФЯЦ-ВНИИЭФ ведутся работы по созданию резонансного ускорителя электронов БЕТА-8 [1], предназначенного для генерации электронного пучка со средней энергией ускоренных электронов от 1,5 до 7,5 МэВ и средней мощностью пучка до 300 кВт. Частью ускорителя, в которой происходит набор энергии электронами, является коаксиальный полуволновой резонатор, работающий на типе колебаний T₁ при частоте 100 МГц.

Принцип действия установки основан на многократном прохождении электронного пучка через ускоряющий резонатор, как показано на рис. 1. ВЧ инжектор электронов генерирует электронные сгустки с энергией 100 кэВ, частотой следования от 0.01 до 100 МГц и длительностью 1 нс, которые поступают на вход коаксиального резонатора. Ускорение электронов в резонаторе происходит на уровне медианной плоскости, где полностью отсутствует магнитная компонента ВЧ поля. Электронный пучок за один проход через резонатор увеличивает энергию на ~1,5 МэВ. Возвращение электронов в резонатор для повторного ускорения обеспечивают дипольные магниты, расположенные снаружи резонатора. Максимальная проектная энергия 7,5 МэВ достигается после пятикратного прохождения электронного пучка через резонатор. В процессе ускорения средняя энергия электронов приобретает ряд дискретных значений, из которых рабочими являются пучки с энергиями 1,5; 4,5 и 7,5 МэВ. После ускорения, в зависимости от выходной энергии, траектория электронного пучка пролегает в одном из трех каналов транспортировки, которые на конечном участке объединяются в один общий выводной канал.

Высокая мощность и сложность траектории электронного пучка накладывают высокие требования на точность проводки пучка, чтобы минимизировать или полностью исключить потери электронов в стенках резонатора и каналов транспортировки. Отклонение траектории электронного пучка от расчетной может быть вызвано разными причинами: погрешностью юстировки элементов тракта проводки пучка, отклонением от расчетного распределения магнитного поля в поворотных магнитах, взаимным влиянием близко расположенных поворотных магнитов. Поэтому, систему транспортировки пучка необходимо оснастить дополнительными магнитами (магнитными корректорами), которые обеспечат угловую коррекцию электронного пучка. В данной работе приведены разработка конструкции и результаты расчетов магнитного корректора.



Рис. 1. Схема ускорения: 1 – соленоид; 2 – магнитная квадрупольная линза; 3 – магнитный корректор; 4 – поворотный дипольный магнит; 5 – монитор положения пучка; 6 – поглотитель пучка; 7 – выводной канал

Назначение магнитного корректора

Магнитные корректоры [2] работают совместно с мониторами положения пучка (рис. 1) и являются составными элементами системы диагностики пучка. Основное назначение системы диагностики – обеспечить первичную проводку пучка с малым средним током (менее 40 мкА) по заданной траектории. Перед каждым поворотом пучка осуществляется мониторинг и, при необходимости, коррекция его траектории с помощью соответствующего магнитного корректора. После этого включается поворотный магнит и процедура повторяется на следующем участке канала проводки. После успешной проводки пучка через выводной канал (рис. 1) средний ток пучка поднимается до номинального значения (40 мА).

Магнитные корректоры будут размещаться в зазорах между корпусом резонатора и поворотными магнитами (рис. 1). Ввиду ограниченного пространства, магнитный корректор должен иметь компактные размеры и при этом обеспечивать одновременное отклонение пучка в двух плоскостях (горизонтальной и вертикальной).

Конструкция и режимы работы магнитного корректора

Магнитный корректор (рис. 2) представляет собой электромагнит с замкнутым магнитопроводом (1) квадратной формы. На каждой стороне сердечника расположены одинаковые обмотки питания (2). Магнит такой конструкции, в зависимости от способа включения обмоток, может выполнять функции как отклоняющего магнита (дипольный режим), так и квадрупольной линзы (квадрупольный режим).



Рис. 2. Общий вид магнитного корректора: 1 – магнитопровод; 2 – обмотка питания

На рис. 3,а показана схема включения обмоток питания для работы магнита в дипольном режиме. При включении вертикальных обмоток магнитный корректор отклоняет электронный пучок в горизонтальной плоскости. При включении горизонтальных обмоток – в вертикальной плоскости. При подаче питания на обе пары обмоток пучок можно отклонять в произвольном направлении.



Рис. 3. Схемы включения обмоток магнита: а –дипольный режим, б – квадрупольный режим

На рис. 4 показано направление векторов магнитного поля при включении магнита в режиме горизонтального и вертикального отклонения электронного пучка (дипольный режим).



Рис. 4. Направление векторов магнитной индукции при включении магнита в дипольном режиме: а – режим горизонтального отклонения, б – режим вертикального отклонения

Для использования магнита в качестве квадрупольной линзы обмотки питания необходимо включить как показано на рис. З,б. При этом, в зависимости от полярности питания, линза будет фокусировать пучок в горизонтальной или вертикальной плоскостях и расфокусировать, соответственно, в вертикальной или горизонтальной плоскостях. Направление векторов магнитного поля квадруполя показано на рис. 5.



Рис. 5. Направление векторов магнитной индукции при включении магнита в режиме квадрупольной линзы

Расчет магнитного корректора

Исходные данные для магнитного корректора были следующими:

 Магнитный корректор должен обеспечивать компенсацию углового отклонения пучка от расчетной траектории до 0,5° при максимальной энергии электронов 7,5 МэВ;

 Габаритные размеры магнита не должны превышать 200 мм в поперечнике и 50 мм в продольном направлении (по пучку);

3) Внутренняя апертура по обмоткам должна быть не менее 110 мм;

4) Магнит должен работать в условиях естественного воздушного охлаждения.

По исходным данным была разработана трехмерная модель магнита и рассчитаны распределения магнитного поля для дипольного и квадрупольного режимов. Результаты расчетов для дипольного и квадрупольного режимов показаны, соответственно, на рис. 6 и рис. 7.



Рис. 6. Распределения индукции магнитного поля магнита в дипольном режиме: а – по оси Z (направление пучка), б – по оси X (плоскость магнита)



Рис. 7. Распределения индукции магнитного поля магнита в квадрупольном режиме вдоль оси X от центра магнита до обмотки

После получения распределения магнитных полей была рассчитана динамика пучка с энергией 7,5 МэВ, проходящего через центр плоскости магнита. На рис. 8 показана траектория пучка, проходящего через магнит, включенный в дипольном режиме. А на рис. 9 и 10 изображены поперечные сечения электронного пучка на расстоянии 1000 мм от корректора.



Рис. 8. Траектория электронного пучка при работе магнита в дипольном режиме: 1 – инжектор, 2 – магнит, 3 – монитор частиц



Рис. 9. Изображение поперечного сечения пучка в начале и конце расчетной траектории при работе корректора в дипольном режиме



Рис.10. Изображение поперечного сечения пучка в начале и конце расчетной траектории при работе корректора в квадрупольном режиме

Заключение

Разработан компактный и не требующий принудительного охлаждения магнит для системы диагностики электронного пучка ускорителя БЕТА-8. Магнит, в зависимости от способа включения обмоток, может выполнять функции как отклоняющего магнита (дипольный режим), так и квадрупольной линзы (квадрупольный режим). Для разработки указанного магнита была создана его полномасштабная компьютерная модель и проведен расчет ее магнитных параметров.

Проведены расчеты динамики электронного пучка при работе магнита в дипольном и квадру-польном режимах.

Разработана КД и изготовлен макет магнита. Проведены измерения магнитного поля изготовленного магнита в дипольном и квадрупольном режимах. Измеренные распределения магнитной индукции оказались в хорошем соответствии с расчетными данными.

В настоящее время макет магнитного корректора установлен на измерительном стенде ВЧ инжектора ускорителя БЕТА-8 [3] для коррекции пучка и калибровки монитора положения пучка.

Литература

1. Гладышев Е. Н., Гордеев В. С., Завьялов Н. В., Кузнецова Н. Н. и др. Состояние работ по проекту создания электронного резонансного ускорителя непрерывного действия БЕТА-8. // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. Сер. Научно-исследовательское издание. 2015. Вып. 20. Ч. 1. С. 184–193.

2. Бенфорд А. Транспортировка пучков заряженных частиц. – М.: Атомиздат, 1969.

3. Опекунов А. М., Завьялов Н. В., Кузнецов В. В., Курапов Н. Н. и др. Экспериментальная отработка проводки электронного пучка ВЧ инжектора для резонансного ускорителя БЕТА-8 // Международная конференция «XVIII Харитоновские тематические научные чтения. Проблемы физики высоких плотностей энергии». Тезисы. 2016. С. 52.

СЕКЦИЯ З

Инженерные науки

Председатели секции:

д-р физ.-мат. наук В. С. Нефедов д-р техн. наук А. А. Юхимчук канд. техн. наук Б. Б. Профе

ПОВОРОТНОЕ ПРИСПОСОБЛЕНИЕ ДЛЯ СВАРКИ С СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ

А. И. Аккуратов

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

Введение

Сварка – это прогрессивный метод получения неразъемных соединений в промышленности, поэтому сварочное производство на заводе ВНИИЭФ непрерывно развивается.

В настоящее время на заводе ВНИИЭФ для сварки круговых швов (цилиндрических обечаек, корпусов) используются поворотные приспособления, оснащенные электродвигателями, не имеющими возможность регулирования частоты вращения шпинделя. Здесь линейную скорость сварки регулируют с помощью вариатора, встроенного в приспособление. Контроль времени одного оборота осуществляется с помощью секундомера. Данный метод устарел и не отвечает современным требованиям технического прогресса, точности, качества и безопасности производства. Это приводит к появлению вспомогательных технологических операций по настройке оборудования и, как следствие, растягивается производственный процесс изготовления изделий.

Целью данной работы является разработка новой конструкции поворотного приспособления для сварки круговых швов. Внедрение данного оборудования позволит увеличить качество свариваемых узлов, уменьшит время настройки, увеличит производительность труда, что приведет к снижению трудоемкости сварочного производства.

Общие сведения

К основным параметрам режима сварки относятся [1]:

• скорость сварки;

• величина, плотность, полярность и род сварочного тока;

• напряжение дуги;

• площадь сечения (диаметр) проволоки (электрода).

Выбор оптимальной скорости сварочного процесса находится в прямой зависимости от толщины металлической заготовки и толщины шва. А оптимальной она будет тогда, когда расплавленный металл электрода заполнит сварочную ванну таким образом, чтобы в месте ее сочленения с кромками металла свариваемого изделия образовался равномерный переход с возвышением без подрезов и наплывов.

В идеале необходимо придерживаться такой скорости движения, чтобы по своей ширине шов оказался в 1,5–2 раза больше диаметра электрода. При излишне медленном перемещении перед его движущимся наконечником будет накапливаться слишком много раскаленного металла. Он будет растекаться из ванны, мешать качественному провару стыка и приведет к образованию дефективного шва.

Если же слишком быстро проводить электрод вдоль стыка, рабочая зона не успеет в достаточной степени прогреться, это обязательно приведет к не проваренному соединению. После охлаждения такой шов может деформироваться и даже потрескаться. Влияние скорости сварки на качество шва показано на рис. 1.

Скорость сварки зависит от толщины свариваемых элементов, качества подготовки свариваемых кромок, размеров поперечного сечения сварного шва и величины сварочного тока. Скорость сварки указывается в технологическом процессе и устанавливается сварщиком. Поэтому возникает необходимость регулирования частоты вращения стола, на который устанавливаются свариваемые детали.



Рис. 1. Влияние скорости сварки на качество шва

Основные технические данные и характеристики поворотного приспособления

Круговую сварку можно осуществлять на поворотном приспособлении как с вертикальной, рис. 2, так и с горизонтальной, рис. 3, осью вращения, поворачивая горелку сварочного аппарата в необходимое положение.

Основные характеристики поворотного приспо-собления:

– габариты свариваемых сборочных единиц: диаметр: 10–150 мм, высота: 3–250 мм;

 масса свариваемых сборочных единиц: 0,003– 1,7 кг;

– усилие сжатия деталей при сварке: 5–50 кг;

- скорость вращения стола: 0,5-30 об/мин;

 имеется возможность плавного изменения скорости вращения с контролем процесса сварки;

крутящий момент на оси вращения стола:
 0,39 кг·м;

– наличие реверса у электродвигателя;

 справочные габаритные размеры поворотного приспособления: 600×430×300 мм.



Рис. 2. Сварка на поворотном приспособлении с вертикальной осью вращения

Поворотное приспособление для микроплазменной сварки и дуговой электросварки круговых швов в среде защитных газов – универсальное оборудование для центровки, фиксации и создания поджимающего усилия при сварке. Используется для установки деталей в положение, удобное для сварки и вращения детали с необходимой сварочной скоростью.



Рис. 3. Сварка на поворотном приспособлении с горизонтальной осью вращения

Система управления двигателем служит для контроля и регулирования скорости вращения стола, на которые устанавливаются свариваемые детали.

Использование поворотного приспособления имеет ряд преимуществ, значительно облегчая и оптимизируя процесс круговой сварки.

Устройство и принцип действия поворотного приспособления

Поворотное приспособление для сварки скомпоновано из трех функциональных узлов, механически связанных между собой в одно приспособление, рис. 4. Основным или связующим узлом, на котором закреплены два других, является основание. Основание представляет собой сборочную единицу, состоящую из корпуса, в который устанавливается вращающийся стол, мотор-редуктор и направляющая, по которой перемещается опора. Данная опора, второй основной элемент приспособления, является поджимным устройством для свариваемого узла. В верхнюю часть опоры устанавливается вращающийся элемент – центр. Детали, которые необходимо сварить, устанавливаются между столом и центром, далее происходит сжатие с усилием, оговоренным в КД на свариваемые детали.

При воздействии на маховик, вращательное движение передается винту, а он в свою очередь преобразовывает круговое движение в поступательное движение опоры. При перемещении опора толкает с одной стороны центр, зажимая изделие, а с другой стороны с точно такой же силой центр воздействует на пластинчатую пружину и перемещает ножку индикатора часового типа, жестко закрепленного на опоре. Таким образом, индикатор фиксирует значение перемещения пружины. Так как пружина предварительно оттарирована (согласно паспорту на приспособление, в котором перемещение пружины соответствует определенному усилию), следовательно, можно определить силу, с которой происходит сжатие деталей при сварке.

Третьим основным элементом приспособления является горелкодержатель. Он служит для фиксации сварочной горелки. Конструкция горелкодержателя позволяет перемещать горелку в пространстве по всем координатам.



Рис. 4. Устройство поворотного приспособления

При включении электродвигателя стол начинает вращаться, поворачивая свариваемые детали. Система управления двигателем позволяет регулировать частоту оборотов стола, перемещая детали с нужной сварочной скоростью. Это позволит точно и качественно производить сварку.

Расчет основных элементов конструкции

<u>Определение крутящего момента</u> <u>и выбор мотор-редуктора</u>

Мощность, необходимая для преодоления инерционных нагрузок находим как [2]:

$$N = M_{KP} \cdot \omega$$
,

где M_{KP} – крутящий момент, $H \cdot M$; $\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}$, c⁻¹ – угловая скорость.

$$M_{KP} = M_{UH} + M_{TP}, \ H \cdot M,$$

где M_{UH} – сумма моментов инерций всех материальных точек, которые участвуют в движении, M_{TP} – момент на преодоление силы трения, $H \cdot M$, n = 30 об/мин – примерная частота вращения выходного вала мотор – редуктора, тогда

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} = \frac{\pi \cdot 30}{30} = 3,14 \text{ c}^{-1}$$

Время цикла: $\tau = \frac{2 \cdot \pi}{\omega} = 2$ сек (то есть за 2 секун-

ды выходной вал мотор – редуктора делает 1 оборот).

Моменты инерции *М*_{ИН} вращающихся частей определим в САПР Компас 3D.

Момент инерции стола – $J_1 = 1, 7 \cdot 10^{-4} \kappa_2 \cdot M^2$.

Оснастка, если потребуется зажимать нестандартные детали:

Стальная деталь-переходник для упора в центр: $J_2 = 0,007 \ \kappa c \cdot m^2$.

Стальная деталь-переходник для упора в стол: $J_3 = 0,008 \kappa_2 \cdot M^2$.

Момент инерции изделия рассчитаем, исходя из исходных данных на свариваемые изделия: $J_4 = 0,008 \ \kappa c \cdot m^2$.

Так как все вращающиеся узлы и детали имеют одинаковую угловую скорость и ускорение, то общий момент инерции, приведенный к валу электродвигателя, найдем как:

$$M_{UH} = \sum J_i = 0,023$$
 кг · м

M_{TP} – момент на преодоление силы трения найдем как

$$M_{TP} = F \cdot \mu \cdot \frac{L}{2},$$

где *F* – усилие сжатия деталей при сварке и масса свариваемых изделий с переходной оснасткой, рис. 5

$$F = 50 + 8 = 58$$
 кг;

 $\mu = 0,05$ – коэффициент трения качения в подшипнике.

L = 40 мм – расстояние между опорами подшипника, рис. 5.

Гогда
$$M_{TP} = 58 \cdot 0,05 \cdot \frac{0,04}{2} = 0,06 \ \kappa r \cdot M$$

 $M_{KP} = M_{HH} + M_{TP} = 0,023 + 0,06 = 0,083 \ \kappa \epsilon \cdot M$ или $M_{KP} = 8,3 \ \kappa \epsilon \cdot cM$ или $M_{KP} = 0,83 \ H \cdot M$. Тогда потребляемая мощность электродвигателя должна быть: $N = M_{KP} \cdot \omega = 0,83 \cdot 3,14 = 2,6$ Вт. Следовательно, требуемая мощность двигателя:

$$N_{\Im.TP} = \frac{N}{\eta_{o \delta u u}} = \frac{2,6}{0,9} = 2,9$$
 BT

где $\eta_{o \delta u \mu} = \eta_M \cdot \eta_{\Pi} \cdot \eta_{ped} = 0,98 \cdot 0,95 \cdot 0,97 = 0,9;$ $\eta_{o \delta u \mu}$ – общий КПД привода; η_M – КПД соединительной муфты; η_{Π} – КПД подшипников качения; η_{Ped} - КПД редуктора.



Рис. 5. Схема действия силы F на опору стола

Исходя из полученного значения крутящего момента, выбираем шаговый электродвигатель FL57STH41-1006A. Двигатель поставляет компания «НПФ Электропривод» [4].

Шаговый электродвигатель – это электромеханическое устройство, преобразующее сигнал управления в угловое перемещение ротора с фиксацией его в заданном положении. Современные шаговые двигатели являются, по сути, синхронными двигателями без пусковой обмотки на роторе, что объясняется частотным пуском шагового двигателя. Последовательная активация обмоток двигателя вызывает дискретные угловые перемещения (шаги) ротора. Отличительная особенность шаговых двигателей – это возможность осуществлять позиционирование без датчика обратной связи по положению.

Шаговые двигатели относятся к классу бесколлекторных двигателей постоянного тока. Как и любые бесколлекторные электрические машины, они имеют высокую надежность и большой срок службы, что позволяет использовать их в индустриальных применениях.

Характеристики шагового электродвигателя приведены в таблице.

Наименование электродвига- теля	Крутя- щий мо- мент, кг•см	Длина, мм	Вес, кг
FL57STH41- 1006A	3,9	41	0,45

Характеристики шагового электродвигателя

Так как требуется крутящий момент $M_{KP} \ge 8,3 \kappa_{2} \cdot c_{M}$, то для стабильной и надежной работы приспособления, установим к данному двигателю редуктор, который рекомендует компания «НПФ Электропривод». Редуктор ЕL060 данной компании предназначен для применения в приводах различных машин и механизмов, для снижения угловых скоростей ведомого вала с целью повышения крутящих моментов.

Выберем редуктор EL060 с передаточным отношением $U_{Ped} = 10$. Следовательно, двигатель с редуктором будут создавать крутящий момент

$$M_{KP} = 3,9 \cdot 10 = 39 \ \kappa_2 \cdot c_M$$

39 кг·см > 8,3 кг·см, значит нагрузка меньше, чем номинальный крутящий момент выходного вала мотор-редуктора.

Следовательно, выбранный мотор-редуктор будет преодолевать возложенную на него нагрузку.

Расчет пластинчатой пружины изгиба

Для определения силы сжатия свариваемых деталей, в приспособление присутствует специальная пластинчатая пружина изгиба, рис. 6. В работе пружина испытывает многократные переменные нагрузки. Под действием нагрузки пружина упруго деформируется, а после прекращения действия нагрузки восстанавливает свою первоначальную форму и размеры. Особенностью работы является то, что при значительных статических и ударных нагрузках она должна испытывать только упругую деформацию, остаточная деформация не допускается.

Произведем расчет такой пружины, чтобы определить размеры сечения и деформацию [3].

Исходные данные:

– максимальная сила, с которой центр толкает пружину: $P_P = 50 \ \kappa c \approx 500 \ H$,

-длина пружины $L_{\rm o}\,{=}\,65\,$ мм, примем конструктивно.

Необходимо найти размеры сечения пружины b, s и деформацию пружины F_P при действии силы P_P .



Рис. 6. Пластинчатая пружина изгиба: F_1 , F_2 , F_3 – деформации пружины, мм, при нагрузке соответственно P_1 , P_2 , P_3 ; L_o – длина пружины, мм; P_1 , P_2 – рабочие нагрузки, H; P_3 – максимально допустимая нагрузка на пружину, H; $[\sigma_{\mu_3}]$ – допустимое напряжение при изгибе, МПа; Е – мо-

упругости (для стали 210000 МПа)

Берем холоднокатаную ленту из стали 65 Γ с допускаемым напряжением при изгибе [σ_{u_3}] = 700 МПа.

Толщину пружины s по конструктивным соображениям принимаем s = 4 мм, тогда ширина пружины:

$$b = \frac{6 \cdot P_P \cdot L_0}{s^2 \cdot [\sigma_{U3}]} = 17,4 \text{ MM}$$

Принимаем конструктивно b = 25 мм.

Определим максимально допустимую деформацию:

$$F_3 = \frac{2 \cdot L_0^2 \cdot [\sigma_{H3}]}{3 \cdot s \cdot E} = 2,34 \text{ MM}.$$

Определим максимальную деформацию при действии силы $P_P = 500 H$:

$$F_P = \frac{4 \cdot L_0^3 \cdot P_P}{s^3 \cdot b \cdot E} = 1,63 \text{ MM}.$$

Отсюда видно, что деформация пружины F_P при рабочей нагрузке не превышает максимально допустимую деформацию F_3 , поэтому пружина с такими расчетными геометрическими параметрами будет работать в области упругой деформации, что и требуется.

Заключение

Спроектированное технологическое оборудование позволяет осуществлять сварку круговых швов конструкций, как с вертикальной, так и с горизонтальной осью вращения. Принципиальная новизна поворотного приспособления по сравнению с предыдущими образцами

заключается в использовании мотор – редуктора с системой управления скоростью вращения шпинделя, что позволяет обеспечить плавную регулировку скорости сварки и ее контроль. Выполнена электрическая изоляция между электродвигателем и высокими токами сварочного аппарата, что исключает протекание высокого сварочного тока в сотни ампер через электродвигатель, что обеспечивает увеличение срока службы электродвигателя и безопасное управление процессом сварки.

Сила сжатия деталей при сварке (5–50 кг) достигнута применением специальной пластинчатой пружины, которая вместе с индикаторными часами позволяет измерить нагрузку на свариваемые детали.

Применение данного оборудования позволит увеличить качество свариваемых узлов, уменьшит время настройки, увеличит производительность труда, что приведет к снижению трудоемкости сварочного производства.

Литература

1. Геворкян В. Г. Основы сварочного дела: Учебник для строит. спец. техникумов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1985. 168 с.

2. Дунаев П. Ф., Леликов О. П. Конструирование узлов и деталей машин: Учеб. пособие для техн. спец. вузов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1998. 447 с.

3. Золин И. М., Зыбкин В. В. Справочник конструктора, в 2-х т. – Н. Новгород: Изд-во «Вента-2», 2003. т. 2. 501 с.

4. Каталог «НПФ Электропривод» Санкт-Петербург, 2015 г.

РАЗРАБОТКА БОРТОВЫХ ШИРОКОПОЛОСНЫХ АНТЕНН

<u>Д. Ф. Антонов,</u> А. Ф. Шишканов, С. А. Шрамко, П. В. Хохлов

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

Введение

Испытания измерительных вариантов беспилотных летательных аппаратов (ЛА) проводятся с целью получения телеметрической информации (ТМИ), содержащей сведения об:

- аэродинамических параметрах ЛА;

 механических и тепловых нагрузках, воздействующих на ЛА;

– циклограмме срабатывания блоков внутренней автоматики.

ТМИ передается с борта ЛА и фиксируется приемными средствами радиотелеметрической системы (PTC).

Усложнение ЛА и алгоритмов их работы приводит к увеличению объема передаваемой ТМИ и требует повышения информативности канала передачи данных [1].

Бортовые передающие антенны, применяемые в РТС, работают в полосе рабочих частот порядка $\approx 15-20$ МГц. Для возможности работы по двум и более каналам, т. е. для увеличения информативности передачи, необходимо увеличивать полосу рабочих частот антенны [2]. Кроме того, широкополосная антенна позволит уменьшить количество применяемых антенн, т. е. перекроет сразу несколько диапазонов частот.

В данной работе описан опыт разработки и экспериментального исследования бортовой антенны, обеспечивающей стабильность характеристик (коэффициент усиления (КУ), диаграмма направленности (ДН)) в широкой полосе частот.

1. Конструкция бортовой антенны

Для решения поставленной задачи была разработана передающая антенна, относящаяся к типу дисковых антенн. Конструкция и внешний вид бортовой антенны приведены на рис. 1.

Новизна конструкции, по сравнению с аналогом, состоит в том, что излучатель выполнен в виде двух проводников на подложке печатной платы, расположенных в одной плоскости и изогнутых под углом 90°.

Короткие и длинные отрезки проводников от точек изгиба расположены соосно и попарно равны, а длина и ширина отрезков каждого проводника выбраны таким образом, чтобы разность фаз токов между коротким и длинным отрезками составляла 90°.

Данная топология излучателя позволяет получить широкую полосу рабочих частот из-за взаимной компенсации реактивных входных сопротивлений проводников [3].

Антенна (рис. 1) состоит из открытого с одного конца цилиндрического резонатора (корпус) 1, заполненного диэлектриком 2,накладки 3, излучателя 4, втулки 5, коаксиального соединителя 6 с центральным проводником 7. Открытый с одного конца цилиндрический резонатор 1 является корпусом антенны, который оснащен элементами для закрепления на поверхности ЛА. Накладка 3 установлена сверху излучателя 4 и закреплена на корпусе 1 с помощью кольца 8.

Излучатель 4 жестко закреплен на диэлектрике 2 с помощью винтов 9. Коаксиальный соединитель 6 закреплен на нижней крышке 10 корпуса 1 таким образом, что его продольная ось перпендикулярна оси антенны.

На нижней крышке 10 корпуса 1 в диэлектрике 2 крепится втулка 5. Вдоль втулки 5 по направлению к нижней крышке 10 выполнен плавный срез для осуществления симметрирования токов, текущих по центральному проводнику 7 коаксиального соединителя 6 и втулке 5.





Рис. 1. Антенна: а – конструкция, б – внешний вид: 1 – резонатор (корпус), 2 – диэлектрик, 3 – накладка, 4 – излучатель, 5 – втулка, 6 – коаксиальный соединитель, 7 – проводник, 8 – кольцо, 9 – винт, 10 – нижняя крышка

Диэлектрик 2 и накладку 3 выполняют из радиотехнического материала. Проводники 11 и 12 (рис. 2) расположены в одной плоскости и изогнуты под углом 90°, причем короткие и длинные отрезки проводников от точек изгиба расположены соосно и попарно равны соответственно.



Рис. 2. Печатный излучатель

Длина и ширина отрезков каждого проводника выбраны таким образом, чтобы разность фаз токов между коротким и длинным отрезком составляла 90°.

Высокочастотный (ВЧ) сигнал от передатчика через коаксиальный соединитель 6 поступает к излучателю 4. Токи, протекающие в малых и больших отрезках проводников 11 и 12 отличаются по фазе на 90° (сдвиг по фазе определяется размерами отрезков проводников). Данные токи возбуждают электромагнитное поле с эллиптической поляризацией в раскрыве антенны.

Конструкция антенны защищена патентом № 2589462 «Антенна летательного аппарата» опуб. 10.07.2016 г. [4].

2. Электродинамические характеристики бортовой антенны

2.1. Полоса рабочих частот

На рис. 3 приведена характеристика согласования антенны.



Антенна имеет полосу рабочих частот $\Delta f \approx 220 \text{ M}\Gamma$ ц по уровню КСВн = 2,0, что позволяет ее использовать в высокоскоростных каналах передачи информации.

2.2. Коэффициент усиления

Значение коэффициента усиления (КУ) бортовой антенны в максимуме ДН, полученные по результатам натурных измерений на имитаторе корпуса ЛА, составляет 4,0 дБ.

2.3. Диаграмма направленности

На рис. 4 и 5 приведены нормированные диаграммы направленности в двух взаимно перпендикулярных плоскостях в центре полосы рабочих частот.



Рис. 4. Диаграмма направленности в плоскости, проходящей через центр антенны и короткие отрезки



Рис. 5. Диаграмма направленности в плоскости, проходящей через центр антенны и длинные отрезки

Ширина диаграмм направленности по уровню минус 10 дБ составляет не менее 185°.

2.4. Поляризация

Поляризация антенны эллиптическая. Коэффициент эллиптичности антенны (m) рассчитывался как:

$$m = \frac{U_{90}}{U_0}$$

где U_0 – уровень сигнала на выходе исследуемой (приемной) антенны при наилучшей ориентации приемной и передающей антенн; передающая антенна обладает линейной поляризацией; U_{90} – уровень сигнала на выходе исследуемой антенны при повороте передающей антенны на угол равный 90° в плоскости, перпендикулярной линии радиосвязи и неизменной ориентации приемной антенны.

Коэффициент эллиптичности антенны в осевом направлении равен 0,71.

3. Исследование эксплуатационных характеристик бортовой антенны

<u>3.1. Исследование стойкости к линейному ускорению,</u> воздействию радиации, вибрационными ударным нагрузкам, испытаниям, имитирующим хранение

В соответствии с утвержденными программами и методиками бортовая антенна прошла испытания на воздействие вибрационных и механических ударов, широкополосной случайной вибрации, линейного ускорения, перепадов температур и влажности, имитирующих условия хранения. Результаты испытаний положительные, конструкция антенны выдержала все заданные требования по стойкости к механическим и климатическим воздействиям.

3.2. Исследование стойкости к СВЧ пробою

Участок передачи ТМИ при полете ЛА характеризуется пониженным атмосферным давлением, которое при работе бортовых негерметичных передающих антенн способствует возникновению в них СВЧ пробоя. СВЧ пробой приводит к ухудшению электродинамических характеристик антенны и как следствие, к уменьшению излучаемой мощности и искажению формы излучаемого радиосигнала. Наличие СВЧ пробоя может стать причиной перерыва в радиосвязи.

Для подтверждения стойкости бортовой антенны к СВЧ пробою были проведены экспериментальные исследования, в которых антенна помещалась в радиопрозрачную вакуумную камеру, из которой откачивался воздух до достижения в ее объеме давления, соответствующего давлению в верхних слоях атмосферы. Далее давление в объеме камеры постепенно повышалось до нормальных условий, при этом через антенну осуществлялась передача сигнала в виде последовательности прямоугольных радиоимпульсов. Тем самым имитировались возможные условия работы антенны. По форме принимаемых от антенны радиоимпульсов делался вывод о наличии или отсутствии в ней СВЧ пробоя. Схема установки для проверки стойкости антенны к СВЧ пробою приведена на рис. 6.



Рис. 6.Схема установки для проверки стойкости антенны к СВЧ пробою

В ходе экспериментальных исследований с предложенной конструкцией антенны наличие СВЧ пробоя зафиксировано не было, т. е. экспериментально доказана электрическая прочность антенны в предполагаемых условиях применения.

Заключение

Разработанная бортовая широкополосная передающая антенна соответствует всем конструктивным, электродинамическим и эксплуатационным требованиям. Успешно прошла все предварительные испытания на механические и климатические воздействия. Антенна является стойкой к СВЧ пробою.

Результаты измерений показывают, что использование разработанной антенны позволяет расширить полосу рабочих частот до 220 МГц по уровню КСВн = 2,0, что позволяет ее использовать в высокоскоростных каналах передачи информации.

Литература

1. Резников Г. Б. Антенны летательных аппаратов. – М: Советское радио, 1967. 402 с.

2. Марков Г. Т., Сазонов Д. М. Антенны. – М: Энергия, 1975. 415 с.

3. Бененсон Л. С. Сверхширокополосные антенны. – М: Мир, 1967. 413 с.

4. Патент на изобретение № 2589462 «Антенна летательного аппарата» опуб. 10.07.2016 г.

ВЛИЯНИЕ АЛГОРИТМОВ РАБОТЫ РАДИАЦИОННЫХ ПОРТАЛЬНЫХ МОНИТОРОВ ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА НАДЕЖНОСТЬ ИХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

Е. А. Власенко, А. В. Никиенко

ФГУП «Горно-химический комбинат», г. Железногорск Красноярского края

Радиационные портальные мониторы (РПМ) являются важной частью комплексов инженернотехнических средств физической защиты как средства обнаружения проноса (провоза) запрещенных предметов, а именно ядерных материалов (ЯМ).

В соответствии с требованиями п. 39, п. 40 Правил физической защиты ядерных материалов, ядерных установок и пунктов хранения ядерных материалов, утвержденных постановлением Правительства РФ от 19 июля 2007 г. № 456, РПМ устанавливаются на контрольно-пропускных пунктах, обеспечивая досмотр людей и транспорта.

Наиболее важными техническими характеристиками радиационных портальных мониторов с точки зрения обеспечения надежного радиационного контроля являются следующие:

- порог обнаружения ядерных материалов;

 частота ложных срабатываний РПМ, когда источник ионизирующего излучения отсутствует в контролируемом пространстве РПМ;

 средняя наработка на отказ. Критерием отказа считается нарушение в работе РПМ, приводящее к несоответствию величины порога обнаружения и частоты ложных срабатываний требованиям ГОСТ Р 51635-2000.

Чтобы обнаружить ЯМ во время его перемещения через контролируемое пространство, РПМ должен выполнить следующие основные задачи:

1) набрать достаточную статистику измерений уровня фона N_{ϕ} в отсутствие источников ионизирующего излучения и посторонних объектов в контролируемом пространстве РПМ;

2) во время перемещения объекта через контролируемое пространство РПМ произвести измерение уровня излучения N_{ob} ;

3) выполнить проверку критерия обнаружения ядерного материала (сравнить уровень излучения от контролируемого объекта N_{o6} с пороговым уровнем окружающего фона N_{nop} , определенным по формуле (1));

4) в случае если критерий обнаружения ЯМ выполняется ($N_{ob} \ge N_{nop}$), предоставить оператору (контролеру) соответствующий световой или звуковой сигнал.

При этом возможно возникновение ошибок первого и второго рода. Ошибки первого рода (ложное срабатывание РПМ) могут возникать по следующим причинам: статистически при большом числе проходов через контролируемое пространство РПМ или его продолжительной непрерывной работе допускается возникновение ложных срабатываний даже в отсутствие объекта в контролируемом пространстве РПМ [1]. Это может быть связано с колебанием уровня окружающего фона, наличием электронных шумов в узлах РПМ, накоплением случайных ошибок измерений и т. д.;

 с увеличением чувствительности РПМ к изменению уровня ионизирующего излучения увеличивается и частота ложных срабатываний.

Возникновение ошибок второго рода, когда объект с источником ионизирующего излучения пересекает контролируемое пространство РПМ без выдачи сигнала тревоги, может быть обусловлено следующими причинами:

1) скорости счета, зарегистрированной блоками детектирования во время перемещения объекта с источником через контролируемое пространство РПМ, может быть недостаточно для выполнения критерия обнаружения ядерного материала.

2) недостаточно высокая производительность и надежность функционирования РПМ.

 применение настроек и алгоритмов работы
 РПМ без учета специфики места его размещения и условий функционирования.

С целью обеспечения надежного радиационного контроля в системе физической защиты ядерного объекта (ЯО) необходимо добиться снижения вероятности возникновения ошибок первого и второго рода.

Принцип работы РПМ, как правило, предусматривает два основных режима: измерение фона и измерение уровня излучения от контролируемого объекта.

После того, как РПМ определил уровень окружающего фона, дальнейший алгоритм работы монитора реализуется производителями двумя основными путями: РПМ переходит в режим непрерывного контроля (режим измерения уровня излучения от контролируемых объектов) или продолжает работать в «дежурном» режиме, периодически обновляя значение уровня фона и ожидая появление объекта в контролируемом пространстве.

Переход из «дежурного режима» в режим контроля объектов и обратно в автоматическом режиме работы РПМ осуществляется с помощью управляющего сигнала от внешних устройств. В основном в качестве внешних устройств, формирующих управляющий сигнал для перехода РПМ в режим контроля, применяются датчики присутствия, представляющие собой охранные извещатели.

Для расчета основных показателей надежности примем, что РПМ работает не как отдельное устройство, а является элементом автоматизированной системы физической защиты. Сигналы срабатывания РПМ регистрируются на автоматизированном рабочем месте (АРМ) оператора. Автоматизированная система в обоих случаях имеет последовательную структуру и состоит из непосредственно РПМ, контроллера нижнего уровня, контроллера верхнего уровня и АРМ оператора [2]. РПМ, работающий в режиме автоматического контроля, в дополнение к перечисленным выше элементам предполагает применение датчика присутствия.

Произведем расчет наработки на отказ системы для обоих вариантов ее построения. В качестве исходных данных для расчета приняты значения средней наработки на отказ T_i элементов, реально используемых в автоматизированных системах физической защиты, согласно эксплуатационной документации, см. таблицу. Интенсивность отказа элементов λ_i рассчитана по формуле $\lambda_i = 1/T_i$ [3].

В этом случае интенсивность отказа РПМ, работающего в режиме непрерывного контроля, будет равна $\lambda_c^{henp} = \lambda_{PIIM} + \lambda_{KHV} + \lambda_{KBV} + \lambda_{APM} = 0,000124 \text{ час}^{-1},$ а средняя наработка на отказ системы $T_c^{henp} = 1/\lambda_c^{henp} =$ = 8064 ч.

Для автоматического режима работы РПМ интенсивность отказа системы будет равна $\lambda_c^{aem} = \lambda_{\partial am} + \lambda_{PIIM} + \lambda_{KHV} + \lambda_{KBV} + \lambda_{APM} = 0,000141 \, \text{час}^{-1}$, средняя наработка на отказ $T_c^{aem} = 1/\lambda_c^{aem} = 7092 \, \text{ч}.$

Далее получим значение вероятностей безотказной работы системы для каждого из режимов работы РПМ, табулируя функцию $P_c(t) = e^{-\lambda_c t}$ на интервале от 0 до 10000 ч [4]. Графическая иллюстрация полученных значений представлена на рис. 1.

Как видно из рис. 1, вероятность безотказной работы системы, работающей в автоматическом режиме по датчику присутствия, несколько ниже за счет того, что в такой системе применяется большее количество элементов.

n v	~				
Значения спелнеи на	DADOTKU HA OTKAS	и интенсивности	OTKAZOB	ADEMENTOR	системы
эпа тепил средней на	puoorkn nu orkus	n minenembrioern	UTRUSOD	JICMENTOD	CHCICMDI

	Датчик присутствия	РПМ	Контроллер нижнего уровня	Контроллер верхнего уровня	АРМ оператора
Средняя наработка на отказ <i>Т_i</i> , ч	60000	12000	87600	87600	52560
Интенсивность отказа λ_i , ч ⁻¹	0,000017	0,000083	0,000011	0,000011	0,000019



Рис. 1. Функция вероятности безотказной работы системы $P_c(t)$ от времени: 1 – для режима непрерывного контроля, 2 - для режима автоматического контроля по датчику присутствия

Далее проведем анализ вероятности и частоты ложных срабатываний РПМ для обоих режимов работы. Для расчета воспользуемся последовательной схемой из двух элементов (РПМ и датчик присутствия), поскольку вероятность ложного срабатывания системы, инициируемого контроллерами и АРМ оператора, ввиду их конструктивных и технологических особенностей, а также выполняемых ими функций, пренебрежимо мала.

Согласно требованиям ГОСТ Р 51635-2000 частота ложных срабатываний РПМ должна составлять не более одного ложного срабатывания на 1000 проходов (проездов) и (или) не более одного ложного срабатывания за 8 часов непрерывной работы.

Для функционирования РПМ в системе физической защиты ЯО характерно некое среднее количество проходов (проездов) в сутки (смену), совершаемых с переменной интенсивностью, что может оказывать влияние на частоту и вероятность ложных срабатываний. Распределение числа проходов (проездов) через контролируемое пространство одного РПМ в течение суток было принято на основе статистических предприятия.

В случае работы РПМ в режиме непрерывного контроля важно отметить, что определить текущее количество проходов (проездов) в такой системе без использования средств контроля доступа не представляется возможным. Кроме того, ложное срабатывание в этом случае может возникнуть в любой момент, а не только в момент прохода (проезда). В связи с изложенными выше доводами частоту ложных срабатываний РПМ для режима непрерывного контроля λ_{nc}^{henp} целесообразно принять равной не более одного ложного срабатывания за 8 часов непрерывной работы.

Оценим вероятность ложного срабатывания РПМ, работающего в режиме непрерывного контроля, табулируя на интервале от 0 до 24 часов следующую функцию [5]:

$$Q_{\mathcal{AC}}^{\mathcal{H}enp}(t) = 1 - e^{-\lambda_{\mathcal{AC}}^{\mathcal{H}enp}t}$$
(2)

В реальных условиях эксплуатации датчика присутствия в составе РПМ высокая интенсивность помех (постоянное движение людей, вибрации и т. д.) может приводить к существенному увеличению частоты ложных срабатываний. По этой причине примем частоту ложных срабатываний датчика присутствия равной не более одного ложного срабатывания за 4 часа.

Для РПМ, работающего в автоматическом режиме по датчику присутствия, частоту ложных срабатываний $\lambda_{nc}^{aвm}$ целесообразно принять равной не более одного ложного срабатывания на 1000 проходов (проездов). При этом важно заметить, что с учетом ограниченного количества персонала и транспортных средств, которым разрешен проезд, количество проходов (проездов), равное 1000, может быть совершено за время более 8 часов. Кроме того, частота ложных срабатываний РПМ, работающего в режиме автоматического контроля, непосредственно зависит от интенсивности проходов (проездов): чем чаще совершаются проходы (проезды), тем выше частота ложных срабатываний РПМ. С учетом неравномерной интенсивности проходов (проездов), зависимость частоты ложных срабатываний РПМ от количества проходов (проездов), совершенных за время наблюдения, будет иметь следующий вид:

$$\lambda_{nc}^{a 6m}(t) = \frac{N_{np}}{1000 \cdot T}_{Ha 6n}, \qquad (3)$$

где *N_{np}* – суммарное количество проходов (проездов) за общее время наблюдения *T_{набл}*.

Получим графики зависимости частоты ложных срабатываний РПМ, работающего в режиме автоматического контроля, от времени наблюдения с учетом переменной интенсивности проходов и низкой интенсивности проездов (рис. 2).



Рис. 2. Значения частоты ложных срабатываний РПМ λ_{лс}(*t*), работающего в режиме автоматического контроля по датчику присутствия, в зависимости от времени наблюдения *t*: 1 – для пешеходного РПМ, 2 – для транспортного РПМ



Рис. 3. Функция вероятности ложного срабатывания $Q_{,nc}(t)$ от времени наблюдения: 1 – РПМ, работающего в режиме непрерывного контроля; 2 – системы на основе пешеходного РПМ, работающей в режиме автоматического контроля по датчику присутствия; 3 – системы на основе транспортного РПМ, работающей в режиме автоматического контроля по датчику присутствия

К ложному срабатыванию системы, работающей в автоматическом режиме, могут привести следующие события: одновременное ложное срабатывание датчика присутствия и РПМ, а также ложное срабатывание РПМ во время прохода (проезда) при нормальном функционировании датчика присутствия. Следует отметить, что ложное срабатывание датчика присутствия при нормальной работе РПМ не вызовет ложного срабатывания системы, а приведет лишь к переводу РПМ в режим контроля в отсутствие объекта. Данные о работоспособных состояниях системы, где Р – вероятность того, что элемент системы будет нормально функционировать, Q – вероятность того, что элемент системы вызовет ложное срабатывание, позволяют рассчитать вероятность ложного срабатывания системы, функционирующей в автоматическом режиме, как сумму вероятностей возникновения всех состояний, приводящих к ложному срабатыванию системы [3]:

$$Q_{\Lambda c}^{aam}(t) = P_{\partial am u} \cdot Q_{P\Pi M} + Q_{\partial am u} \cdot Q_{P\Pi M} =$$

$$= e^{-\lambda_{\Lambda c}^{\partial am u} \cdot t} \cdot (1 - e^{-\lambda_{\Lambda c}^{P\Pi M}(t) \cdot t}) +$$

$$+ (1 - e^{-\lambda_{\Lambda c}^{\partial am u} \cdot t}) \cdot (1 - e^{-\lambda_{\Lambda c}^{P\Pi M} \cdot (t) \cdot t})$$
(4)

Табулируя функцию (4) на интервале от 0 до 24 ч, с учетом значений частоты ложных срабатываний, рассчитанных по формуле 3, получим график функции вероятности ложных срабатываний системы, функционирующей в автоматическом режиме (рис. 3).

Как видно из рис. 3, вероятность ложного срабатывания РПМ является монотонно возрастающей функцией времени. При низкой интенсивности проходов (проездов) вероятность ложного срабатывания РПМ, работающего в режиме автоматического контроля по датчику присутствия, значительно меньше вероятности ложного срабатывания РПМ, работающего в режиме непрерывного контроля. При этом резкое увеличение интенсивности проходов (проездов) приводит к заметному возрастанию функции вероятности ложного срабатывания.

Режим работы РПМ целесообразно определять в зависимости от конкретных условий эксплуатации (численности персонала ЯО, частоты проходов (проездов), особенностей пропускного режима, а также режима работы ЯО). В условиях низкой частоты проходов (проездов) через контрольно-пропускной пункт целесообразно применять системы, работающие в режиме автоматического контроля по датчику присутствия, что позволяет обеспечить значительно меньшую частоту ложных срабатываний.

Литература

1. ГОСТ Р 51635-2000 «Мониторы радиационные ядерных материалов. Общие технические условия».

2. Половко А. М., Гуров С. В. Основы теории надежности. Практикум. – СПб: БХВ-Петербург, 2006. 560 с.

3. Шкляр В. Н. Надежность систем управления: учебное пособие. – Томск.: Издательство ТПУ, 2009. 126 с.

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ АКТИВИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ХИМИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКА ТОКА

А. В. Глазкова, Н. П. Филимонова

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

Введение

Автоматизация производственных процессов, в том числе испытаний и измерений, необходима для повышения качества продукции. С каждым годом все активнее ведутся работы по автоматизации производственных технологических процессов, и созданию новых автоматизированных стендов контроля параметров изделий серийного производства, выпускаемых на заводе ВНИИЭФ.

Целью данной работы является разработка новой автоматизированной технологии, позволяющей проводить контроль электрических параметров химических источников тока (ХИТ) ампульного и теплового типов.

Основания для проведения работ

ХИТ, как и все изделия, перед установкой в обязательном порядке проходят предъявительские и приемо-сдаточные испытания. В целях оптимизации производственного процесса ХИТ, предъявительские и приемо-сдаточные испытания необходимо проводить в строго определенном месте.

Разработка комплекса контроля параметров активированного состояния XИТ

Для автоматизации контроля электрических параметров был разработан автоматизированный стенд контроля ХИТ. В рамках создания нового стенда были разработаны: структурная (рис. 1) и функциональная схемы, алгоритм программы задания режимов и контроля параметров.



Рис. 1. Структурная схема автоматизированного стенда

В соответствии с техническим заданием на разработку стенд должен обеспечивать:

1) подачу электрического импульса в цепь электровоспламенителя, по команде оператора;

 регистрацию времени активации ХИТ (время с момента подачи электрического импульса в цепь ЭВ до достижения номинального напряжения) при соответствующем токе нагрузки;

 регистрацию показаний ХИТ в течение общего времени нахождения ХИТ в активном состоянии;

 четыре включения на нагрузку 2,5; 2,6; 3,6;
 4,4 Ом, в зависимости от типа ХИТ, длительностью 30 мс каждая.

Разработка аппаратной части стенда

Блок управления и контроля включает в себя персональный компьютер со встроенным LANинтефейсом и производит управление работой стенда, обмен данными и необходимые расчеты.

Функциональный блок включает в себя калибраторы-измерители фирмы Keithley модели 2651А и 2602 и обеспечивает уровни напряжения и тока в соответствии с методикой контроля.

Измерительный блок представляет собой носитель мезонинов MezaBox со встроенным вольтметром MH4B и осуществляет непрерывную регистрацию уровня напряжения на испытуемом устройстве.

На основании структурной схемы была разработана функциональная схема стенда (рис. 2).



Физические линии связи



Обоснование выбора и краткое описание применяемых аппаратных и программных средств

Для создания функционального блока были выбраны программируемые калибраторы-измерители напряжения и силы тока фирмы Keithley модели 2651A и 2602.

Калибратор-измеритель напряжения и силы тока модели 2651А – высокомощный прибор, сочетающий в себе возможности источника и измерителя в одном корпусе. Подобное сочетание упрошает процедуру тестирования, поскольку отсутствует необходимость в синхронизации и дополнительных подключениях. Модель 2651А - экономически эффективное решение для выполнения высокоточного тестирования в режиме «воспроизведение - измерение» постоянного напряжения и силы тока. Калибраторизмеритель напряжения и силы тока модели 2651А обеспечивает нагрузку 10 Ом и четыре импульсных подключения нагрузки 2,5 Ом длительностью 30 мс через равные промежутки времени, одновременно он производит измерения напряжения на контактах ХИТ, необходимые для точного расчета.

Технические характеристики модели 2651А в импульсном режиме приведены в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики модели 2651A в импульсном режиме

Длительность импуль-	Напряжение	Ток	
сов/скважность импульсов	импульса	импульса	
300 мкс/1 %	40 B	50 A	

Калибратор-измеритель модели 2602 используется для подачи импульса в цепь электровоспламенителя (ЭВ) газогенератора (ГГ). Технические характеристики модели 2602 в импульсном режиме приведены в табл. 2.

Таблица 2

Технические характеристики модели 2602 в импульсном режиме

Длительность импуль- сов/скважность импульсов	Напряжение импульса	Ток импульса
100 мс/25 %	40 B	1,5 A
4 мс/4 %	35 B	5A
1,8 мс/1 %	20 B	10 A

Для формирования измерительного блока программируемый измерительный прибор MezaBox MH4B, обеспечивающий непрерывную регистрацию показаний XИТ в течение общего времени нахождения XИТ в активном состоянии.

Технические характеристики MezaBox:

 диапазоны измерений мгновенных значений напряжения:

- от минус 10 до 10 В,
- от минус 1 до 1 В,
- от минус 0,1 до 0,1 В;

 входное сопротивление измерительного канала не менее 1 МОм;

 пределы допускаемой основной относительной погрешности измерений мгновенных значений напряжения при минимальном периоде выборки (получения результатов измерений) и при температуре окружающей среды $+20 \pm 2^{0}$ С, %:

 ±(0,03 + 0,03 (Uм/Uх-1)) для диапазона измерений от минус 10 до 10В,

• <u>+</u>(0,04 + 0,04 (Uм/Uх-1)) для диапазона измерений от минус 1 до 1 В,

• <u>+</u>(0,2 + 0,2 (Uм/Uх-1)) для диапазона измерений от минус 0,1 до 0,1 В.

Основные требования при выборе приборов:

– наличие их в Госреестре средств измерений, разрешенных к использованию в РФ,

 технические характеристики, позволяющие обеспечить заданную точность измерений и быстродействие,

 наличие приборов в подразделении и опыт их применения (для экономии средств на приобретение и обучение персонала).

Разработка алгоритма и программы управления контрольными измерениями

Программная часть стенда обеспечивает контроль и регистрацию параметров, контроль времени и активацию, путем подачи электрического импульса в цепь

ЭВ ГГ, а также четыре включения на нагрузку 2,5 Ом в течение общего времени нахождения ХИТ в активном состоянии.

Для реализации алгоритма обмена информацией между измерительными приборами и ЭВМ по протоколу LXI специально разработаны драйверы.

При создании программы управления и контроля измерений учтены все требования ТУ по точности измерений.

Рассмотрим алгоритм программы на примере проверки ХИТ ампульного типа (АХИТ). В основе алгоритма работы программы контроля лежит методика проверки электрических параметров.

Алгоритм программы

1. Ввод начальных данных.

В окне программы выбирается тип ХИТ. После ввода типа ХИТ необходимо нажать кнопку «ПУСК», после чего программа переходит к следующему этапу.

2. Запуск и контроль.

После нажатия кнопки «Пуск» запускается отсчет времени и одновременно посылается команда для подачи импульса в цепь электровоспламенителя газогенератора для активации ХИТ.

Разряд проводят в соответствии с параметрами, представленными на рис. 3.

При разряде АХИТ фиксируется момент подачи электрического импульса на ЭВ, ток, и напряжение разряда. По полученным результатам определяют время активации, напряжение при постоянном токе разряда и при включении нагрузок 2,5 Ом. Разряд прекращают после снятия емкости 30 А · мин, при этом определяют конечное напряжение АХИТ, которое должно быть более 5,3 В.



Время активации АХИТ (с момента подачи электрического импульса в цепь электровоспламенителя газогенератора до достижения номинального напряжения 5,3 В) при токе нагрузки 0,5 А, фиксируется и отображается в соответствующем окне программы и должно быть не более 1 с (рис. 4). 2,5 Ом фиксируются и отображаются в соответствующих окнах лицевой панели программы (рис. 4).

В процессе выполнения программы для наглядности строится график отображающий уровень напряжения на контактах ХИТ в реальном масштабе времени. Программа имеет эргономичный пользовательский интерфейс. В процессе работы оператор имеет наглядное представление о ходе проверки и результатах.

Разряд автоматически прекращается после снятия емкости 30 А · мин, при этом определяется конечное напряжение АХИТ.

По результатам разряда создается протокол испытаний.

Выводы

Предлагаемый комплекс, построенный на высокоточных программируемых приборах, позволяет проводить контроль параметров активированного ХИТ. Использование платформы создания виртуальных приборов и систем управления, измерений и контроля позволило в короткие сроки создать программу управления, которая является неотъемлемой частью нового комплекса автоматизированного контроля электрических параметров активированного ХИТ.



Рис. 4. Лицевая панель программы «Автоматизированный стенд контроля ХИТ (АСК ХИТ)». (Все параметры, приведенные на рис. 4 считать условными, так как настройка и отладка программы проводилась при использовании пробника источника тока)

АХИТ должен обеспечивать в активном состоянии напряжение от 5,3 до 7,5 В. Значение напряжения на источнике тока под нагрузкой 10 Ом в процессе разряда визуализируется в соответствующем окне программы (рис. 4).

АХИТ через 3 с после подачи электрического импульса в цепь ЭВ ГГ должен допускать 4 включения на нагрузку 2,5 Ом длительностью 40 мс каждая, через равные промежутки времени, напряжение на АХИТ при этом должно быть не менее 5 В. Минимальные значения напряжения на источнике тока в момент каждого включения на нагрузку

Литература

1. Суранов А. Я. LabVIEW справочник по функциям. – М.: изд-во «ДМК Пресс», 2005. 512 с.

2. Джеффри Тревис LabVIEW для всех / пер. с англ. Клушин Н. А. – М.: «ДМК Пресс»; Прибор Комплект, 2004. 544 с.

ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КРЫШКИ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ РИТМ-200 ДЛЯ АТОМНОГО ЛЕДОКОЛА «АРКТИКА»

Д. А. Дубровский, А. В. Клячкин, А. А. Глыбченко

АО «ОКБМ Африкантов», г. Н. Новгород

АО «ОКБМ Африкантов» является проектировщиком и комплексным поставщиком новейшей реакторной установки для ледокольного флота РИТМ-200.

В течение 2014 г. в производственных подразделениях предприятия изготавливались изделия, входящие в состав парогенерирующего блока реакторной установки универсального атомного ледокола РИТМ-200. Для изготовления этих изделий были разработаны и изготовлены сложные технологические постаменты и грузоподъемные приспособления, а так же разработаны ряд новых технологий и инструментов.

Крышка реакторной установки – РИТМ-200 для атомного ледокола «Арктика» является одним из наиболее ответственных и сложных изделий с точки зрения изготовления, рис. 1.

Крышка предназначена для уплотнения центрального корпуса парогенерирующего блока, а также для размещения на ней комплекта приводов компенсирующих групп и аварийной защиты, комплекта датчиков средств измерений, а также выполняет функцию верхней биологической защиты.

Большая масса не только изделия в целом (≈ 28 тонн), но и его составных частей, внушительные габариты, а также необходимая высокая точность, делают технологию изготовления, испытаний уникальной.

Конструктивно крышка реактора состоит из силовой плиты, направляющих труб и полости биоло-

гической защиты, засыпаемой серпентинитовой галей, рис. 1,а.

Учитывая габаритные размеры и массу изделия, сборка, обработка и изготовление крышки диаметром 2,5 метра, высотой 2 метра и массой 28 тонн вызывает сложности для оборудования предприятия.

Основной подсборкой крышки реактора является силовая плита из специальной стали с антикоррозионной наплавкой с установленными направляющими трубами, рис. 1,б. Масса плиты составляет 20,5 тонн.

Для кантования плиты при ее обработке и дальнейшей сборке были разработаны уникальные схемы кантования и приспособление, позволяющее выполнить поворот на 90 градусов, необходимый для последующей механической обработки и сборки. Масса изделия совместно с приспособлением составила 30 тонн. В процессе эксплуатации приспособления для безопасности при повороте использовались домкраты.

При механической обработке плиты особую сложность вызывает выполнение глубоких отверстий под установку направляющих труб. С целью сокращения трудозатрат при обработке отверстий была отработана технология сверления глубоких отверстий эжекторными сверлами на горизонтальнорасточном станке с ЧПУ.

Эжекторные сверла предназначены для высокопроизводительного сверления отверстий, состоят из неперетачиваемой коронки с твердосплавными пластинами и двух трубок.



а



б

Рис. 1. Общий вид: а - крышки реактора, б - силовой плиты с трубами



Рис. 2. Общий вид установки эжекторных сверл



Рис. 3. Схема подачи СОЖ при эжекторном сверлении

Общий вид установки эжекторных сверл представлен на рис. 2, а схема подачи смазывающей охлаждающей жидкости (СОЖ) при эжекторном сверлении представлена на рис. 3.

СОЖ поступая под высоким давлением в пространство между стенками трубок, частично проходит сквозь отверстия в резьбовом хвостовике, охлаждает режущие кромки и направляющие планки, а затем вместе со стружкой устремляется через сопло в центральную полость внутренней трубки и далее в приемный бак. Другая часть СОЖ проникает в центральную полость через щели во внутренней трубке и создает разрежение, отсасывающее стружку.

При применении эжекторных сверл обеспечивается точность 7–9-го квалитета и требуемая конструкторской документацией шероховатость обработки, в результате отпадает необходимость многопереходной обработки.

Отработка операции выполнялась на заготовках из нержавеющей стали 12Х18Н10Т и теплоустойчивой стали 15Х2МФА сверлами фирм «Sandvic» и «Botek».

Машинное время обработки одного отверстия эжекторным сверлом составляет ≈ 15 мин. при сверлении на глубину 500 мм. Время обработки одного отверстия традиционным способом (сверление + 2-х кратное зенкерование + развертывание) составляет ≈ 180 мин. при сверлении на глубину 500 мм. При этом высокая точность полученных отверстий при

сверлении эжекторным сверлом позволила в дальнейшем отказаться от кондукторного приспособления при сборке плиты с трубами, что значительно сократило стоимость выполнения работ.

На данный момент осваивается использование лазерного трекера для сборки крышки реактора.

В процессе сборки плиты с трубами была выявлена утяжка сварных швов при сварке. При помощи технологической коррекции выставки труб перед сваркой с использованием лазерного трекера API Radian 50 (рис. 4) удалось добиться требуемых геометрических параметров сборки после окончания сварочных работ.



Рис. 4. Лазерный трекер API Radian 50

Лазерный трекер – высокотехнологичный измерительный прибор, основанный на принципе слежения за специальным уголковым отражателем с помощью лазерного луча. Точность прибора в условиях проведения замеров составила 0,07 мм.

После сварки, согласно требованиям конструкторской документации, силовая плита с вваренными трубами крышки подвергается гидравлическим испытаниям пробным давлением 270 кг/см². Проработка возможности изготовления специальной оснастки показало большую металлоемкость и стоимость ее изготовления, поэтому было предложено для испытаний использовать критический стенд, конструкция и технология уплотнения которого позволяет использовать для гидравлических испытаний плиту в качестве крышки. После проведения расчетов и экспериментальных проверок было выпущено техническое решение, разработана специальная оснастка и выполнена доработка стенда, позволившая использовать его для гидравлических испытаний. При этом проверка сварных соединений в процессе выдержки под давлением была дополнена контролем методом акустической эмиссии.

Каждое сварное соединение приварки труб к плите было дополнительно подвергнуто контролю

на герметичность методом обдува гелием. Контроль производился при горизонтальном расположении труб крышки. Для обеспечения возможности применения данного метода была разработана специальная крупногабаритная технологическая оснастка общей массой 2000 кг.

После окончательной сборки силовой плиты выполнялась засыпка полости биологической защиты серпентинитовой галей. Была отработана технология получения слоя гали с заданными свойствами и требуемой массы.

Применение целого комплекса нестандартных технологических решений: применение эжекторных сверл, использование лазерного трекера позволило обеспечить высокую экономическую эффективность выполненных работ по изготовлению крышки реактора.

На протяжении многих лет АО «ОКБМ Африкантов» ведет планомерные работы по разработке и изготовлению оборудования для АЭС. Введенное в строй новое высокопроизводительное оборудование и применение новых технологий позволяют качественно и в кратчайшие сроки выполнять большие объемы работ.

РАЗРАБОТКА ВОЛНОВОДНОЙ АНТЕННЫ

<u>И. В. Девина</u>, С. В. Вертей, М. И. Мигачев

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

Введение

В настоящее время антенны сантиметрового диапазона длин волн широко применяются в различных областях радиоэлектроники – связи, телевидении, радиолокации, телекоммуникации, радиоуправления, а также в системах радиоэлектронного подавления, радиотелеметрии. В сантиметровом диапазоне длин волн находят широкое применение апертурные антенны, как в качестве элементов фазированных антенных решеток, облучателей зеркальных антенн, а также как самостоятельные слабонаправленные излучатели. Одним из наиболее часто применяемых апертурных антенн является открытый конец волновода.

В данной работе описан опыт разработки и экспериментального исследования волноводной антенны, выполненной на основе открытого конца круглого волновода с поляризатором в виде диэлектрической пластины [1], который обеспечивает эллиптическую поляризацию излучения. Экспериментально установлено, что для стандартного круглого волновода ширина ДН по уровню половинной мощности составляет не более 75° [2]. Но в ряде случаев возникает необходимость использовать антенну сэллиптической поляризацией поля и при этом имеющую более широкую ДН.

Целью работы является разработка волноводной антенны эллиптической поляризации с более широкой ДН по уровню половинной мощности по сравнению с ДН открытого конца круглого волновода, не изменяя при этом поляризационных характеристик излучения.

Результаты моделирования

Антенна представляет собой круглый волновод, в полости которого установлен поляризатор, выполненный в виде диэлектрической пластины. В плоскости раскрыва волновода установлен круглый металлический экран, а кромка волновода продолжена за плоскость раскрыва в виде четырех пилообразных выступов (рис. 1) [3].

При возбуждении электромагнитной волны типа H_{11} в круглом волноводе с поляризатором в виде диэлектрической пластины, установленной под углом 45° по отношению к вектору Е электромагнитной волны типа H_{11} , излучается поле с эллиптической поляризацией.

Металлический экран за счет кромочного эффекта увеличивает рассеяние излучаемого электромагнитного поля, тем самым, ширина диаграммы направленности в большей степени зависит от размеров металлического экрана. Заметное расширение диаграммы направленности проявляется при внешнем диаметре металлического экрана не более $2\cdot\lambda$,где λ – длина волны [1], но при этом поляризация излучения изменяется от эллиптической до практически линейной.



Рис. 1. Модель волноводной антенны

Продолжение кромки волновода за плоскость раскрыва в виде четырех пилообразных выступов, которые выступают в качестве рассеивателя излучаемого электромагнитного поля, позволяет сохранить поляризационные характеристики излучения, то есть сохранить эллиптическую поляризацию поля при установке металлического экрана. Высота зуба h каждого пилообразного выступа равна: h = d/4, где d – диаметр волновода

Таким образом, установка в плоскости раскрыва волновода круглого металлического экрана и продолжение кромки волновода за плоскость раскрыва в виде четырех пилообразных выступов на собственное излучение раскрыва волновода накладывается добавочное излучение, появляющееся за счет возбуждения краев экрана и кромок пилообразных выступов, позволяет расширить ширину диаграммы направленности по уровню половинной мощности по сравнению с шириной диаграммы направленности антенны в виде открытого конца волновода, обеспечивая, при этом возможность формирования осевой диаграммы направленности с эллиптической поляризацией поля.

По результатам расчетов, волноводная антенна в диапазоне частот $F_3 \pm 1$ ГГц формирует однонаправленные ДН с шириной по уровню половинной мощности не менее 2 $\theta_{0,5} = 100^{\circ}$. В направлении максимума излучения поляризация эллиптическая (коэффициент эллиптичности (КЭ) не менее 0,8).

Экспериментальные исследования макета волноводной антенны и стандартного круглого волновода

На рис. 2 и рис. 3 представлены макеты разработанной волноводной антенны и стандартного круглого волновода.



Рис. 2. Макет волноводной антенны: 1 – круглый волновод; 2 – волноводно-коаксиальный переход; 3 – переход с круглого волновода на прямоугольный волновод; 4 – поляризатор; 5 – пилообразные выступы; 6 – экран



Рис. 3. Макет стандартного круглого волновода

Экспериментальные ДН разработанной волноводной антенны и ДН стандартного круглого волновода на частотах F_3-1 ГГц, F_3 и F_3+1 ГГц приведены на рис. 4.

Значения ширины ДН по уровню половинной мощности для волноводной антенны и стандартного круглого волновода, а также их значения КЭ[4] в главном направлении на частотах F_3-1 ГГц, F_3 и $F_3 + 1$ ГГц представлены в таблице.



Рис. 4. Экспериментальные ДН: 1 — разработанная волноводная антенна, 2 — стандартный круглый волновод: а — на частоте F_3 , – 1 ГГц, б — на частоте F_3 , в — на частоте F3+1 ГГц

Частота	Ширина ДН, град		КЭ		
МГц	волноводная антенна	стандартный круглый волновод	волноводная антенна	стандартный круглый волновод	
$F_{3} - 1$	130	75	0,78	0,78	
F_3	119	73	0,79	0,79	
$F_{3} + 1$	115	70	0,79	0,79	

На рис. 5 представлен график измеренного значения коэффициента стоячей волны (КСВ) разработанной волноводной антенны в рабочем диапазоне частот $\Delta F = F_3 \pm 1 \Gamma \Gamma \mu$.



Рис. 5. КСВ волноводной антенны в рабочем диапазоне частот

Заключение

Таким образом, результаты измерения показывают, что использование разработанной волноводной антенны позволяет расширить диаграмму направленности по уровню половинной мощности примерно на 40° по сравнению с диаграммой направленности стандартного круглого волновода, не изменяя поляризационных характеристик излучения. Полученные результаты численного моделирования хорошо согласуются с результатами экспериментального исследования макета разработанной антенны.

Литература

1. Драбкин А. Л., Зузенко В. Л., Кислов А. Г. Антенно-фидерные устройства. – М. Советское радио, 1974. С. 331, Рис. XV.27.

2. Фельда Я. Н. Антенны сантиметровых волн / Под ред. – М.: Советское радио, 1950. С. 9, рис. Х.3.

3. Патент на изобретение № 2565352 «Волноводная антенна» от 22.07.2014.

4. Патент на изобретение № 2509316 «Метод разложения волны на ортогонально-поляризованные компоненты».

ВЛИЯНИЕ АНИЗОТРОПИИ КРИСТАЛЛА LINbO₃ НА РАСХОДИМОСТЬ ПАВ, ОБУСЛОВЛЕННУЮ ДОПУСКАМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ

<u>С. П. Дорохов</u>, А. С. Салов

ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова», г. Н. Новгород

Введение

Проектирование устройств, работа которых основывается на использовании поверхностных акустических волн (ПАВ), является перспективным направлением научных исследований, имеющим широкое практическое применение в энергонезависимых транспондерах, устанавливаемых на контролируемых объектах. Транспондером формируется уникальный информационный сигнал, состоящий из паспортных импульсов (идентифицируют порядковый номер объекта) и датчиковых импульсов физических величин (позволяют проконтролировать состояние объекта).

Основным элементом в транспондере, отвечающим за преобразование сигналов с датчиков физических параметров и формирование информационного сигнала является многоканальная отражательная линия задержки (ОЛЗ) на поверхностных акустических волнах (ПАВ). Работа ОЛЗ основывается на возбуждении ПАВ встречно-штыревыми преобразователями (ВШП) при подаче на него активирующего радиоимпульса, прохождении ПАВ по акустическому каналу и обратно и последующим преобразованием энергии отраженной ПАВ в информационный сигнал [1].

Жесткие требования к характеристикам, предъявляемые к ОЛЗ на ПАВ, а также сложность процесса изготовления и его высокая стоимость приводят к необходимости проводить расчет и оптимизацию конструкции на стадии проектирования данных устройств.

На характеристики информационного сигнала, сформированного ОЛЗ (величина амплитуды импульсов, их равномерность) оказывают значительное влияние паразитные переотражения сигналов в акустических каналах, дифракция, приводящая к рассеиванию акустической волны, отклонение акустической волны от кристаллографической оси вследствие отклонения при установке технологической оснастки, используемой в фотолитографическом процессе при изготовлении ОЛЗ.

Целью настоящей работы является разработка и оптимизация конструкции многоканальной ОЛЗ на ПАВ, в которой снижено влияние переотражений, улучшен параметр «сигнал – шум» и учтено влияние анизотропии пьезоэлектрической подложки из LiNbO₃ срез (0,38,0) на дифракцию ПАВ, вследствие ее отклонения от кристаллографической оси, обусловленного допусками технологической оснастки.

Влияние анизотропии кристалла на конструктивные особенности многоканальной ОЛЗ на ПАВ

Известно, что направление минимального затухания ПАВ совпадает с направлением главной оптической оси кристалла, поэтому чаще всего на практике в устройствах на ПАВ используются направления распространения, совпадающие с осями чистых мод, чтобы излучаемый преобразователем пучок был перпендикулярен апертуре преобразователя. Однако, вследствие конечной точности ориентации кристалла и используемых для изготовлений устройств на ПАВ приспособлений, необходимо учитывать эффекты, возникающие вследствие нелинейности пьезоэлектрических кристаллов.

Несмотря на то, что влияние анизотропии пьезоэлектрических кристаллов на дифракцию ПАВ изучено достаточно хорошо, ни в одном издании не сказано, как данное явление отражается на топологии разрабатываемых устройств. Данный эффект при конструировании не может быть устранен полностью, поэтому влияние дифракции может быть учтено расчетным путем и скомпенсировано изменением (оптимизацией) топологии электродной структуры.

Поле ПАВ, генерируемой однородным преобразователем, имеет ближнюю зону излучения или зона дифракции Френеля – область, в которой при распространении волны вдоль оси чистой моды ширина пучка примерно равна апертуре преобразователя. В дальней зоне, или в зоне дифракции Фраунгофера, пучок расходится под углом, зависящим от апертуры преобразователя. Очевидно, что для получения оптимального результата, приемник должен находиться в ближней зоне [2]. Расстояние от входного преобразователя выражается через безразмерный параметр

$$X = \frac{\lambda (1 - 2\beta)}{w^2} x,\tag{1}$$

где λ – длина ПАВ, W – апертура ВШП, $\beta = -\gamma/2$ – мера локальной анизотропии. Значение X < 1 соответствует зоне Френеля, X > 1 соответствует зоне Фраунгофера. Исходя из выражения (1), апертура входного преобразователя должна удовлетворять условию:

$$W > \sqrt{\lambda x \left| 1 + \gamma \right|},\tag{2}$$

В связи с тем, что в процессе изготовления ОЛЗ присутствует технологическая погрешность при установке фотошаблона, то на распространение ПАВ будет оказывать влияние дифракция, которая приволит к расхождению пучка ПАВ и потере части энергии акустических волн. Следствием дифракционных эффектов является рост вносимых потерь в ОЛЗ. Поскольку ниобат лития LiNbO3 анизотропный, характеристика акустической волны зависит от выбранного направления распространения. При распространении волны в зоне Френеля вдоль оси чистой моды влиянием дифракции можно пренебречь, однако при отклонении от кристаллографической оси при установке фотошаблона, влиянием дифракции пренебрегать нельзя [3, 4]. При отклонении волны от направления кристаллографической оси, дифракционное расширение акустических пучков оценивается параметром анизотропии у (рис. 1). Величина и знак у определяют степень дифракции ПАВ. Из [2] известно, что при отклонении от кристаллографической оси в пределах $\pm 5^{\circ}$ параметр анизотропии не изменяется.

Входной ВШП



Рис. 1. Дифракция пучка ПАВ, излученной ВШП

Чтобы исключить попадание акустической энергии из одного акустического канала в другой необходимо рассчитать угол отклонения ПАВ от оси чистой моды при изменении угла ориентации пьезоэлектрической подложки. Так как отражательные элементы расположены на разном расстоянии от входного ВШП, для корректной оценки отклонения ПАВ достаточно провести вычисления для самого дальнего отражательного элемента с максимальным временем задержки отраженного сигнала. Данный расчет был проведен из условия, что, зная скорость распространения ПАВ и максимальное отклонение от оси чистой моды (задается допусками технологической оснастки), можно определить максимальное отклонение ПАВ.

$$\frac{d\mathbf{j}}{d\theta} = \frac{1}{V} \cdot \frac{d^2 V}{d\theta^2}.$$
(3)

Определив максимальный угол отклонения, рассчитывается минимально допустимое расстояние между акустическими каналами для исключения попадания энергии ПАВ из одного канала в другой.

Изменение направления распространения ПАВ вследствие дифракции приведет к изменению скорости ПАВ, что в свою очередь приведет к изменению времени задержки информационного пакета. Для расчета изменения скорости с учетом дифракции вблизи оси чистой моды можно воспользоваться параболической теорией [5]:

$$V(\theta) = V_0 \left[1 + \frac{\gamma}{2} (\theta - \theta_0)^2 \right], \tag{4}$$

где θ_0 – угол ориентации оси чистой моды (рис. 2).



Рис. 2. Изменение фазовой скорости ПАВ при отклонении распространения ПАВ от кристаллографической оси (ось «Х» – отклонение от кристаллографической оси θ (град), «Y» – изменение скорости)

Из приведенной выше зависимости видно, что при отклонении от оси чистой моды скорость ПАВ значительно изменяется, и, как следствие, изменяется время задержки информационного сигнала. Полученный результат необходимо учитывать при построении блока обработки информационного сигнала.

Практическая реализация

Для уменьшения влияния переотражений в акустическом канале должно находиться минимальное количество рефлекторов, таким образом, оптимального результата можно добиться, расположив в каждом из акустических каналов по 3 элемента: 2 из которых являются отражательными элементами, формирующими отраженный сигнал, и 1 вх/вых элемент, преобразующий электромагнитный сигнал в акустическую волну и обратно.

Входные преобразователи в ОЛЗ соединены между собой и выполнены в виде ВШП. Все отражательные элементы ОЛЗ также выполнены в виде встречно-штыревых преобразователей в связи с необходимостью внешней регулировки амплитуд импульсов информационного сигнала. Регулировка амплитуд отраженных импульсов необходима для уменьшения неравномерности импульсов информационного сигнала, что упрощает его обработку.

Топология ОЛЗ выполняется на материале подложки LiNbO₃ (0,38,0), т. к. данный материал широко распространен, наиболее отработан технологически, обладает высоким коэффициентом электоромеханической связи, низким коэффициентом затухания и отвечает всем необходимым требованиям [6]. Структурная схема восьмиканальной отражательной линии задержки представлена на рис. 3.



Рис. 3. Структурная схема 8-канальной ОЛЗ

В ходе разработки многоканальной ОЛЗ на ПАВ было проведено моделирование информационного сигнала, в ходе которого были определены оптимальные параметры ВШП, влияющие на формирование импульсов информационного сигнала (рис. 4).



Рис. 4. Расчетные характеристики информационного сигнала многоканальной ОЛЗ

В связи с тем, что отражательные элементы, формирующие первую половину информационного сигнала формируют ложные сигналы (импульсы двойного прохождения), и их временная задержка совпадает с временем задержки информационных импульсов с 10 по 16, был рассчитан максимальный уровень ложных сигналов, сформированных 1–9 отражателями. Отражатели с 10 по 16 формируют ложные сигналы с временем задержки, превышающим длительность информационного сигнала. При реализации многоканальной ОЛЗ на ПАВ удалось улучшить отношение «сигнал-шум» по амплитуде по сравнению с предшествующими аналогами. В представленном информационном сигнале (рис. 5) исключены основные импульсы, образованные с 10 по 16 ВШП.

На основании проведенного моделирования и расчетов, была разработана многоканальная ОЛЗ на ПАВ (рис. 6), у которой затухание информационного сигнала составило ~35 дБ, а неравномерность импульсов не превысила 5 дБ [7–9]. На рис. 7 представлена осциллограмма информационного сигнала многоканальной ОЛЗ, изображенной на рис. 6.



Рис. 5. Расчетные характеристики ложных импульсов, образованных 1–9 ВШП



Рис. 6. Многоканальная ОЛЗ на ПАВ



Рис. 7. Осциллограмма информационного сигнала многоканальной ОЛЗ на ПАВ

Выводы

Для оптимизации конструкции многоканальной ОЛЗ на ПАВ были рассчитаны:

 угол отклонения ПАВ от кристаллографической оси в зависимости от ориентации пьезоэлектрической подложки;

 минимальное расстояние, на которое необходимо разносить акустические каналы для исключения попадания энергии ПАВ из одного канала в другой;

 проведены расчеты изменения скорости ПАВ и изменения времени задержки информационного сигнала при максимальном отклонении от кристаллографической оси.

Проведенные расчеты позволили максимально уменьшить габариты разработанной многоканальной ОЛЗ на ПАВ.

В реализованной конструкции многоканальной ОЛЗ на ПАВ значительно улучшен параметр «сигнал – шум», что упрощает возможность кодирования информационного сигнала и его дальнейшую обработку.

Литература

1. Электронная идентификация / В. Л. Дшхунян, В. Ф. Шаньгин. – М.: НТ Пресс, 2004. 695 с.

2. Поверхностные акустические волны / Под ред. А. Олинера. – М.: Мир, 1981. 390 с.

3. Устройства обработки сигналов на поверхностных акустических волнах / Д. Морган. – М: Радио и связь, 1990. 416 с.

4. Материалы для акустоэлектронных устройств / О. Л. Балышева. – СПб: ГУАП, 2005. 50 с.

5. Gloersen P., J. Vac. Sci. Techn., 12, 28 (1975).

6. Результаты экспериментального исследования влияния ионизирующего излучения на отражательные линии задержки на поверхностных акустических волнах / С. П. Дорохов, А. С. Салов – Х Межотраслевая конференция по радиационной стойкости: Сборник докладов (г. Саров, 16–19 октября 2012 г.) – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2014. 445 с.

7. Многоканальная отражательная линия задержки на поверхностных акустических волнах: RU 2522886 C2 / C. П. Дорохов, И. А. Князев, А. С. Салов. – №2012145915/08; Заявл. 26.10.2012. Опубл. 20.07.2014 Бюл. № 20.

8. Отражательная линия задержки: RU 2567186 C1 / С.П. Дорохов, И.А. Князев, А.С. Салов – № 2014136510/28; Заявл. 08.09.2014. Опубл. 10.11.2015 Бюл. № 31.

9. Многоканальная отражательная линия задержки на ПАВ и способ кодирования RU 2576504 C1 / С.П. Дорохов, И.А. Князев, А.С. Салов – № 2014135065/08; Заявл. 26.08.2014. Опубл. 10.03.2016 Бюл. №7.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ ПРИ ГИДРИРОВАНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ТИТАНА, МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

А. А. Кузнецов, П. Г. Бережко, С. М. Кунавин, <u>Е. В. Жилкин</u>, М. В. Царев, В. В. Ярошенко, В. В. Мокрушин, О. Ю. Юнчина, С. А. Митяшин

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

В работе исследованы изменения, происходящие с образцами металлического титана при гидрировании, которые сопровождаются возникновением сигналов акустической эмиссии высокой амплитуды. Установлено, что наиболее вероятной причиной возникновения этих сигналов является образование трещин в гидрируемых образцах вследствие нарастания внутренних напряжений, вызванных структурными изменениями в материале. Характерные размеры образующихся трещин сопоставимы с размером частиц гидрируемых образцов, при этом атомное отношение [H]/[Ti] в твердой фазе, при котором образование трещин происходит наиболее интенсивно, для титановой губки, как правило, меньше, чем для изготовленного из нее порошка.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, гидрирование, титановая губка, мелкодисперсный порошок, растрескивание

Введение

Согласно стандартному определению [1], явление акустической эмиссии обусловлено кратковременным распространением упругих волн, которые генерируются вследствие быстрого высвобождения энергии из локализованных источников внутри какого-либо материала. В частном случае, явление акустической эмиссии заключается в генерации акустических волн, обусловленной перестройкой внутренней структуры веществ [2, 3]. Данный эффект наблюдается при различных физико-химических превращениях [2-8], в частности, сопровождающих процессы гидрирования металлов или интерметаллических соединений [6-8], что позволяет изучать эти превращения путем регистрации и обработки акустических сигналов. Данная работа посвящена изучению изменений, происходящих в образцах металлического титана при их взаимодействии с водородом, которые являются источниками возникновения акустических сигналов высокой амплитуды.

Материалы и методы

В данной работе объектами исследования являлись образцы металлического титана, находящегося в различном исходном состоянии: в виде титановой губки с характерным размером кусков ~10 мм, и в виде мелкодисперсного порошка, изготовленного из этой губки, размер частиц которого составлял менее ~40 мкм. В работе исследовалась кинетика взаимодействия указанных материалов с водородом, а также регистрировались сигналы акустической эмиссии, сопровождающие процесс гидрирования. Принципиальная схема экспериментальной установки для проведения гидрирования представлена на рис. 1.



Рис. 1. Принципиальная схема установки для изучения процесса гидрирования титана: Д1, Д2 – датчики давления, B1–B3 – вентили, 1 – источник газа, 2 – емкость, 3 – реакционная камера, 4 – мобильная установка для записи сигналов акустической эмиссии, 5 – система контроля и регистрации температуры, 6 – система вакуумирования

В процессе эксперимента исследуемый образец помещался в реакционную камеру 3 (рис. 1), где подвергался предварительному вакуумному отжигу, необходимому для перевода титана в активное состояние по отношению к водороду. Масса образца во всех опытах составляла ~14 грамм. Режимы вакуумного отжига титана выбирались с учетом рекомендаций, приведенных в работе [9]. После остывания образца в камеру 3 из емкости 2 подавался водород при давлении ~20 МПа. Количество водорода, поглощенное титаном в процессе опыта, определялось по значениям давления газа в системе, с последующим пересчетом этих значений в количество газа с использованием вириальных коэффициентов из работы [10]. Контроль температуры в процессе опыта осуществлялся с помощью термопары, припаянной к корпусу реакционной камеры 3.

Запись сигналов акустической эмиссии, сопровождающих гидрирование титана, проводилась с использованием мобильной установки, изготовленной на базе стандартного оборудования, производимого компанией ООО «Глобал Тест» (Россия). Поскольку амплитуда акустического сигнала пропорциональна интенсивности физико-химических процессов, сопровождающих гидрирование, а для вещественных функций средняя мощность сигнала P на промежутке времени T подсчитывается по формуле:

$$P(t_0,T) \Box \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \left[x(t) \right]^2 dt , \qquad (1)$$

где t_0 – начальное время; x(t) – сигнал [11], то для оценки степени интенсивности процессов, произошедших в образце за определенный отрезок времени, в данной работе использовалась величина, равная сумме квадратов амплитуды сигнала акустической эмиссии, зарегистрированного на данном временном отрезке.

Результаты

На рис. 2 представлены характерные зависимости величины атомного отношения [H]/[Ti] в твердой фазе от времени на начальных стадиях гидрирования титановой губки и изготовленного из нее порошка титана.



Рис. 2. Характерные зависимости атомного отношения [H]/[Ti] в твердой фазе от времени проведения эксперимента при гидрировании титановой губки и полученного из нее порошка

Из рис. 2 следует, что реакция гидрирования в обоих случаях интенсивно протекает уже на первых секундах после подачи водорода в реакционную камеру. Как и следовало ожидать, скорость поглощения водорода порошком титана, определяемая по начальным участкам кривых, приведенных на рис. 2, существенно выше, что объясняется большей удельной поверхностью порошка по сравнению с удельной поверхностью губки.

В то же время, зависимости квадрата амплитуды сигнала акустической эмиссии от величины атомного отношения [H]/[Ti] в твердой фазе, приведенные на рис. 3, свидетельствуют, что наибольшую акустическую активность исследуемые образцы проявляли только при достижении некоторой степени насыщения металла водородом. При этом во всех опытах, проведенных в рамках данной работы, максимальное значение квадрата амплитуды сигнала акустической эмиссии для титановой губки достигалось, как правило, при меньшем атомном отношении [H]/[Ti] по сравнению с титановым порошком. В частности, в экспериментах, представленных на рис. 3, для титановой губки этот максимум был достигнут при атомном отношении [H]/[Ti] ~1,29, тогда как для порошка титана – при ~1,71.



Рис. 3. Характерные зависимости квадрата амплитуды сигнала акустической эмиссии от величины атомного отношения [H]/[Ti] в твердой фазе при гидрировании титановой губки и полученного из нее порошка

Обсуждение результатов

Хорошо известно, что взаимодействие металлов с водородом сопровождается изменением кристаллической структуры исходного материала вследствие образования твердых растворов и гидридных фаз различного состава, что может сопровождаться появлением акустической активности. Вследствие этого, для объяснения причин возникновения акустических сигналов высокой амплитуды нами были проанализированы диаграммы состояния титан-водород, полученные разными авторами [12–18], а также литературные данные о свойствах гидридов титана, и особенностях их получения по прямой реакции титана с водородом.

Согласно литературным данным, а-фаза титана обладает гексагональной плотноупакованной кристаллической решеткой, и при эвтектоидной температуре (~300°С) [18] предельная растворимость водорода в α-фазе составляет ~8 ат. %, что соответствует атомному отношению [H]/[Ti] ~0,09. Гидрид титана (б-фаза) обладает структурой флюорита с гранецентрированной кубической решеткой. При этом прямое превращение α-фазы металла в δ-фазу гидрида, заключающееся в перестроении гексагональной кристаллической решетки металла в гранецентрированную кубическую решетку, имеет место при температурах ниже эвтектоидной, и полностью заканчивается при концентрации водорода в твердой фазе ~(40-60) ат. %, что соответствует отношению [H]/[Ti] ~(0,7-1,5) [16]. Аналогичное превращение, проходящее при температурах выше эвтектоидной, сопровождается промежуточным образованием β-фазы титана, которая имеет кубическую объемно-центрированную решетку, и в достаточно широких диапазонах атомного отношения [H]/[Ti] может сосуществовать как с а-фазой металла, так и с б-фазой гидрида.

Учитывая, что в условиях проведенных нами экспериментов разогрев корпуса реакционной камеры
достигал ~170 °C, а порошок титана после опытов частично спекался. с высокой долей уверенности можно предположить, что температура образца в процессе гидрирования с какого-то момента времени превышала эвтектоидную, и наиболее вероятный путь превращения металла в гидрид заключался в промежуточном образовании β-фазы титана. Следствием же происходящих структурных изменений в образце являлось закономерное увеличение объема твердой фазы за счет уменьшения ее плотности с ~4,505 г/см³ (α-фаза титана) до ~3,76 г/см³ (б-фаза гидрида) [17]. Это, в свою очередь, приводило к нарастанию внутренних напряжений в материале, которые, при достижении некоторой степени насыщения, могли являться причиной растрескивания образца на макроуровне, которое сопровождалось генерированием акустических сигналов с явно выраженным максимумом амплитуды. При этом в случае титановой губки значительно меньшая величина удельной поверхности образца, с одной стороны, способствовала снижению скорости гидрирования за счет меньшей поверхности межфазного контакта, а, с другой стороны, обуславливала появление больших внутренних напряжений в образце при его насыщении водородом по сравнению с порошком. Вероятно, по этой причине при гидрировании губки максимум амплитуды сигнала акустической эмиссии наблюдался при меньшем значении атомного отношения [H]/[Ti] по сравнению с аналогичным значением для титанового порошка (см. рис. 3).





С целью проверки сделанных предположений структура образцов титана до и после гидрирования была исследована с помощью электронного микроскопа. Характерные изображения титановой губки и титанового порошка до и после гидрирования приведены на рис. 4.

Как видно из рис. 4, образцы титана после гидрирования отличаются от исходных образцов наличием хорошо различимых трещин на их поверхности, характерные размеры которых сопоставимы с размером частиц исследуемых материалов. Для крупных индивидуальных частиц титанового порошка размеры этих трещин составляют несколько микрон, тогда как для титановой губки они достигают нескольких сотен микрон. Эти результаты хорошо согласуются с данными работы [19], и наглядно подтверждают сделанное предположение о растрескивании титана при гидрировании, которое приводит к возникновению акустических сигналов высокой амплитуды. При этом следует отметить, что увеличение периода кристаллической решетки α-фазы титана, равно как и фазовые переходы, сопровождающие процесс гидрирования, также, вероятно, являются источниками акустической активности образца. В то же время, интенсивность этих сигналов, очевидно, чрезвычайно мала по сравнению с интенсивностью сигналов, сопровождающих растрескивание частиц на макроуровне, и в условиях проведенных нами экспериментов, амплитуда этих сигналов, вероятно, сопоставима с уровнем фоновых значений.





Рис. 4. Характерные электронно-микроскопические изображения: а – титановой губки до гидрирования; б – титановой губки после гидрирования; г – порошка, полученного из титановой губки до гидрирования; г – порошка, полученного из титановой губки после гидрирования

Заключение

Взаимодействие металлического титана с водородом сопровождается генерированием сигналов акустической эмиссии высокой амплитуды, возникающих при достижении некоторого значения атомного отношения [H]/[Ti] в твердой фазе из-за растрескивания металла на макроуровне. Причиной растрескивания являются внутренние напряжения, возникающие в образце из-за роста объема твердой фазы вследствие изменения кристаллической структуры материала при гидрировании. При этом в случае использования титанового порошка, атомное отношение [H]/[Ti] в твердой фазе, соответствующее максимуму амплитуды сигнала акустической эмиссии, при прочих равных условиях, как правило, выше, чем при использовании титановой губки.

Благодарности

Авторы выражают благодарность М. В. Волонину и И. А. Царевой за помощь в проведении экспериментов, Ю. С. Иванушкину за помощь в обработке экспериментальных данных, а также В. В. Попову и В. В. Тихонову за ценные замечания, сделанные при обсуждении полученных результатов.

Литература

1. International Standard ISO 12716: 2001E. Nondestructive testing – acoustic emission inspection – Vocabulary, 2001.

2. Boyd J. W. R., Varley J. Chemical Engineering Science, 56 (2001) 1749–1767.

3. Кирдяшкин А. И., Габбасов Р. М., Максимов Ю. М., Саламатов В. Г. Физика горения и взрыва. Т. 49, № 6 (2013), С. 62–67.

4. Klimchuk E. G. Proc. 12-th Inter. Symp. on SHS, 2013, Texas, USA, 37–38.

5. Merson E., Vinogradov A., Merson D. L. Journal of Alloys and Compounds, 645 (2015), S. 460–463. 6. Northrup C. J. M., Jr., Kass W. J., Beattie A. G. Sandia Laboratories Report SAND-77-0418C, 1977.

7. Wemple R. P., Kass W. J. Sandia Laboratories Report SAND78-1803, July 1979.

8. Cannelli G., Cantelli R. Journal of Applied Physics, 50 (9), 1979, P. 5666–5675.

9. Мокрушин В. В. Труды Всероссийской конференции «Процессы горения и взрыва в физикохимии и технологии неорганических материалов». – Черноголовка: РИО ИСМАН, 2002. С. 268–274.

10. Теплофизические свойства технически важных газов при высоких температурах и давлениях / Справочник под ред. В. Н. Зубарева и др. – М.: Энергоатомиздат, 1989.

11. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. Т. 1. Основные принципы и классические методы. // Пер. с франц. – М.: Мир, 1983.

12. Kirschfeld L., Sieverts A. Titan und Wasserstoff. Zeitschrift fur Physikalische Chemie A, Band 145 (1929), 2891.

13. Bevington C. F. P., Martin S. L., Mathews D. H. Proceedings of International Congress on Pure and Applied Chemistry (London), Vol. 11 (1947), 3–16.

14. Gibb T. R. P. Jr., Kruschwitz H. W. Jr. Journal of American Chemical Society, Vol. 72 (1950) 5365.

15. Mc-Quillan A. D. Proceeding of Royal Society (London), Series A, Vol. 204 (1950), 309.

16. Якимова А. М. Взаимодействие титана с водородом. Академия наук СССР. Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского. Труды комиссии по аналитической химии. Т. Х. Анализ газов в металлах. – М.: Изд-во АН СССР, 1960, 142–149.

17. Гидриды металлов / Под. ред. В. Мюллера, Д. Блэкледжа и Дж. Либовица Пер. с англ. – М.: Атомиздат, 1973.

18. San-Martin A. and Manchester F. D. Bulletin of Alloy Phase Diagrams, Vol. 8, No. 1 (1987), 30–42.

19. Prokudina V. K., Kovalev D. Yu., Ratnikov V. I. et. al. Int. Journal of SHS, Vol. 22, No. 2 (2013), 114–118.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ И РАЗМЕРОВ БЛОКА СВЕРХПРОНИЦАЕМЫХ МЕМБРАН НА ОСНОВЕ ВАНАДИЯ С ПЛАЗМЕННОЙ ДИССОЦИАЦИЕЙ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В УСТАНОВКАХ ТИПА ДЕМО-ТИН И ITER

А. В. Жмуровский

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

Работа посвящена оценке возможностей использования сверхпроницаемых мембран на основе ванадия в качестве диффузионных насосов с плазменной диссоциацией изотопов водорода в установках типа ДЕМО-ТИН и ITER. Произведены оценочные расчеты энергоэффективности работы мембранных модулей с плазменной диссоциацией изотопов водорода, а так же их габаритные характеристики. Для сравнительного анализа были проведены расчеты энергоэффективности и габаритных размеров модулей сверхпроницаемых мембран с термической атомизацией. Предложена схема реорганизации топливного цикла в соответствии с включением в нее модулей сверхпроницаемых мембран.

Введение

Осуществление термоядерного синтеза наиболее перспективно в замкнутых магнитных ловушках для удержания плазмы типа токамак. Полная локализация плазменного шнура в токамаке невозможна, поэтому имеет место распыление стенок камеры «холодной» (пристеночной) плазмой, что приводит к смещению топливного баланса и ухудшению параметров плазмы. Увеличение концентрации гелия в плазме, вследствие реакции синтеза, также влияет на скорость термоядерного синтеза. Поэтому, для поддержания стабильности реакции, необходимо осуществлять непрерывный отвод продуктов реакции из активной зоны. Для этого используется особая конфигурация магнитного поля, отклоняющая низкоэнергетичную плазму в дивертор - устройство служащее для приема потоков частиц и излучений с периферии плазменного шнура. Откачиваемая из дивертора смесь газов содержит порядка 90 % дейтерий-тритиевого топлива, которое необходимо отделить от продуктов реакции и распыленных плазмой материалов камеры, для повторного использования в реакторе.

В работе [1] для этих целей используются установки низкотемпературной дистилляции, ресиверы, геттеры, насосы, палладиевые фильтры, системы детиритизации воды и системы дополнительной очистки и др.

В совокупности это ведет к нежелательному накоплению трития в коммуникациях и функциональных узлах термоядерного реактора, снижению ресурса работы оборудования вследствие водородного и гелиевого охрупчивания, увеличение вовлекаемого в топливный цикл трития.

В связи с этим, авторами [2] было предложено использовать явление Переходные металлы V группы – ванадий, ниобий и тантал, обладают наиболее выгодными свойствами в отношении возможности осуществления сверхпроницаемости для над тепловых водородных частиц при высокой плотности потока (до 10^{19} см⁻²с⁻¹) в широком диапазоне температур (300–1000 °C) и при толщине мембраны вплоть до нескольких мм [2–7].Однако наиболее перспективным материалом для термоядерных реакторов следует отметить ванадий вследствие уникально низкого накопления трития, а так же другим свойствам.

Топливный цикл ТИН

Ранее упоминалось, что внедрение блоков сверхпроницаемых мембран в топливный цикл установок ТИН (термоядерный источник нейтронов) может существенно сократить цикл переработки топлива и удешевить конструкцию.

ТИН – стационарная установка. Следовательно, все системы топливного цикла должны работать в непрерывном режиме и иметь соответствующую производительность, обеспечивать хранение топлива, ввод топлива в термоядерную плазму, откачку продуктов, сепарацию и очистку откачиваемого топлива, дообогащение топливной смеси до заданной концентрации и его хранение.

Данные задачи, с учетом установки в схему топливного цикла блока сверхпроницаемых мембран, реализуются как показано на рис. 1. Для поддержания термоядерного горения в плазму ТИН инжектируется топливо системами инжекции, а именно, в порядке приоритета, системами пеллет-инжекции, газовыми клапанами и системой инжекции нейтральных атомов. Продукты горения откачиваются из диверторов вакуумной камеры и системы нейтральной инжекции крионасосами, перед которыми ставится мембранный блок, осуществляющий отделение ИВ от гелия в размере 90 % от потока газа. Далее смесь газов с изотопами водорода направляется в систему очистки, представленную криогенной отчисткой, системой каталитического разложения, системой разделения тяжеловодных отходов и геттерным накопителем. Топливная смесь изотопов водорода должна проходить разделение и дообогащение и помещаться в геттерный накопитель, откуда будет подаваться в систему инжекции.



Рис. 1. Модернизированная схема функциональных элементов топливного цикла [1]. Толщина линий указывает на величину проходящего потока газов

Из рис. 1 видно, что большая часть D/T смеси проходит по короткому циклу, а вследствие модульности конструкции ТИН, остальные элементы конструкции очистки и переработки могут быть масштабированы в соответствии с проходящими через них потоками.

ВЧ-разряд

Известны два основных способа возбуждения высокочастотного разряда низкого давления - емкостной и индукционный. Соответственно два вида ВЧ-разряда: Е-разряд и Н-разряд. На рис. 2 изображены типичные способы осуществления индукционного и емкостного ВЧ-разрядов. Н-разряд зажигают при помощи спиралевидного индуктора, внутри которого располагается, как правило, цилиндрическая кварцевая камера, соединенная с вакуумной системой, поддерживающей необходимое давление плазмообразующего газа. Ток высокой частоты пропускается через индуктор. В этом случае силовые лини электрического поля замкнуты внутри газоразрядной плазмы, возбуждающее поле является вихревым. На сегодняшний день существует большое количество различных конструкций ВЧИ- и ВЧЕ-плазмотронов разной мощности, разные способы поджига разряда, различные способы охлаждения разрядных камер ВЧ-плазмотронов, которые позволяют активно использовать ВЧ-плазмотроны в различных технологических процессах [8].

При индукционном разряде пробой осуществляется вихревым электрическим полем, напряженность которого, согласно закону электромагнитной индукции, прямо пропорциональна скорости изменения магнитного потока. Отсюда с ростом частоты ВЧ поля растет и напряженность вихревого электрического поля возбуждающего разряд, увеличивается энергия, передаваемая в плазму. При низких частотах индукционный разряд малоэффективен в сравнении с емкостным. С увеличением частоты до десятков и сотен МГц вкладываемая в H-разряд мощность растет и он становится более эффективным, чем Е-разряд. При аналогичных условиях (одинаковой мощности ВЧ генератора, давлении в разрядной камере) плотность плазмы индукционного разряда, в случае высоких частот, становится более высокой, чем емкостного. Для Е-разряда, вкладываемая мощность с ростом частоты поля уменьшается [9].



Рис. 2. Способы осуществления ВЧ-разряда низкого давления: а – индукционный разряд: 1 – индуктор, 2 – разрядная камера; б – емкостной разряд: 1 – электроды, 2 – разрядная камера, 3 – диэлектрические пластины, 4 – цилиндрическая кварцевая разрядная камера

Оценочный расчет эффективности СПМ модуля с ВЧ-атомизатором

Использование разряда как генератора надтеплового D/T газа вместо атомизатора в предлагаемой схеме (рис. 1) могло бы дать значительную выгоду по затратам энергии. Основным препятствием для использования плазменного разряда в диверторе ITER было большое количество углеводородов, ожидаемых в выхлопе.

Явное преимущество ВЧ-разряда заключается в отсутствии горячих катодов. Экспериментальная величина затрат энергии диссоциации водородной молекулы в ВЧ-разряде доходила до значения ~15 eV [10].

Ожидаемый поток газа на выходе дивертора ДЕМО – ТИН примерно такой же как и в ITER и Q = 200 м³Па/с. Таким образом, принимая величину нормального давления $P_{aтм} = 101325$ Па, объем, занимаемый одним молем любого газа при н. у. за v = 22,4 л/моль, количество частиц в 1 моль любого вещества $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ частиц/моль рассчитаем количество частиц, проходящих через сечение трубопровода в единицу времени:

$$n = \frac{Q\left[\frac{\pi \cdot \Pi a}{c}\right] \cdot N_A \left[\frac{\text{частиц}}{\text{моль}}\right]}{\nu [\pi/\text{моль}] \cdot P_{\text{атм}}} = (1)$$
$$= \frac{200 \cdot 1000 \cdot 6,02 \cdot 10^{23}}{22,4 \cdot 101325} = 5,305 \cdot 10^{22} \frac{\text{частиц}}{c}$$

В формуле (1) рассчитано общее количество частиц, включая 5 % содержание гелия в откачиваемой смеси, на самом деле, количество газов в смеси несколько больше и зависит от технологических решений, которые будут реализованы в проекте DEMO-TИH.

$$n_{D-T} = n \cdot 0.95 = 0.95 \cdot 5.305 \cdot 10^{22} =$$

= 5.04 \cdot 10^{22} \frac{\frac{4actum}{c}}{c}, (2)

где n_{D-T} – количество молекул изотопов водорода.

Тогда энергия диссоциации потока водорода будет равной:

$$E = n_{D-T} \cdot e \cdot E_d = 5,04 \cdot 10^{22} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 15 = 120 \,\mathrm{kBt},$$

где E_d – энергия диссоциации водорода в ВЧразряде. эВ.

Таким образом необходимо порядка 120 кВт энергии для диссоциации максимума потока D_2/T_2 , который планировался в ITER: 200 Па · м³/с. Если предположить эффективность передачи мощности на разряд как ~50 %, то максимальная мощность затрат окажется на уровне ~240 кВт.

Возможность взаимосвязи СПМ с емкостным асимметричным разрядом в ITER была рассчитана А. С. Смирновым [11]. Была предложена геометрия цилиндра с коаксиальными электродами, где СПМ использует внешний заземленный электрод, установленный вдоль стены тракта. Важной особенностью емкостного RF-разряда является высокий отрицательный потенциал электродов относительно плазмы (особенно внутреннего электрода, на который приложена мощность RF. Потенциал электрода тем выше, чем выше плотность RF-мощности.

Это приводит к ограничению плотности RFмощности и к увеличению размера мембранной системы, если мы хотим ограничивать потенциал электрода приемлемой величиной.

В случае индукционного RF-разряда нет проблемы с потенциалом электрода. Например, плазменный генератор, который используется для производства Н⁻ в NBI ASDEX-U (рис.3) может быть использован как прототип. RF катушка с 6-витками отделена от плазмы кварцевой камерой, которая имеет площадь 32×61 cm². Вплоть до 160 kW RFмощности при 0,92 МГЦ тратится на разряд [12]. Экран Фарадея, сделанный из 3 мм толстой меди с вертикальными щелями 3 мм шириной примыкает к боковым стенкам. Таким образом, этот плазменный источник действует при очень высоких плотностях RF- мощности, приложенной к довольно большому объему плазмы и авторы верят, что их плазменный источник может быть масштабирован до любого размера. Присутствие металлического экрана является другой важной особенностью этого плазменного источника, так как мембрана может быть установлена вместо экрана.



Рис. 3. Эскиз генератора RF плазмы, используемого для получения H в NBI ASDEX-U [13]

Оценочный расчет габаритов СПМ модуля с термической атомизацией

Минимальная площадь мембраны для откачки 90 % D-T смеси:

$$S_{\min} = \frac{0.9 \cdot (Q - Q_{He})}{V_{cp}} =$$

$$= \frac{0.9(200 - 10) \left[M^{3}\Pi a/c \right]}{1.4 \left[M\Pi a/c \right]} = 122 M^{2},$$
(3)

где Q – общий поток газа, Q_{He} – поток гелия, V_{cp} – средняя скорость откачки мембраной при усредненном давлении $\frac{M\Pi A}{c}$, рис. 4.



Рис. 4. Зависимость удельной скорости откачки трития ванадиевой мембраной площадью 1 м² от давления, при температуре атомизатора 2100 К и площади атомизатора 0,2 м [14]

Таким образом, на каждый из четырех откачных трактов придется по $30,5 \text{ м}^2$, что соответствует следующим габаритным размерам одного блока сверх-проницаемых мембран: диаметр 1-1,2 м, длина 4-4,9 м в длину.

Оценочный расчет габаритов СПМ модуля с ВЧ-атомизатором

При использовании в качестве атомизатора ВЧразряд можно добиться практически полной атомизации всего падающего потока водорода. В этих условиях скорость мембранной откачки будет определяться уже не скоростью атомизации, а проводимостью самой мембраны, порядка 10^{18} – 10^{19} частиц на см² в секунду.

Количество частиц, проходящих через сечение трубопровода в единицу времени составляет, как было подсчитано $5,04\cdot10^{22}\frac{\text{частиц}}{\text{с}}$, учитывая, что каждая молекула диссоциирует на два атома, найдем минимальную площадь мембраны для откачки 90 % смеси из общего потока:

$$S = 10^{23}/10^{18} = 10^5 cm^2 = 10m^2$$
.

Данное значение рассчитано для всех четырех откачных трактов, поэтому площадь мембраны в одном откачном тракте составит около 2,5 м². При диаметре 1–1,2 м длина мембранного модуля составит порядка 40–50 см.

Таким образом, данная конфигурация СПМ наиболее выгодна как в энергетическом плане, так и в плане компактности.

Оценка энергопотребления и КПД термического атомизатора

В качестве атомизатора рассматривалась танталовая проволока. Оценим ее энергетические потери на излучение при температуре 2100 °С, при которой достигается наибольший коэффициент атомизации.

$$F = \sigma \cdot T^4$$

где: F – энергетическая светимость абсолютно черного тела, T – абсолютная температура абсолютно черного тела, К, σ – постоянная Стефана – Больцмана.

$$\begin{split} \sigma &= \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} = \left(5,6698 \pm 0,0011\right) \times \\ &\times 10^{-5} \operatorname{spr} \cdot \operatorname{cm}^{-2} \cdot \operatorname{c}^{-1} \cdot \operatorname{rpag}^{-1}, \\ \mathrm{T}_{\mathrm{pag}} &= T \sqrt[4]{\varepsilon_{\mathrm{T}}} = 2100 \cdot \sqrt[4]{0,25} = 1484,9K, \end{split}$$

где Т_{рад} – радиационная температура тела, $\varepsilon_{\rm T}$ – интегральная степень черноты материала,

$$F = \sigma \cdot T^{4} = 5,6698 \cdot 10^{-5}1484,9^{4} =$$

= 2,75 \cdot 10^{8} \text{ pr \cdot cm}^{-2} \cdot c^{-1} = 27,5 \frac{\text{BT}}{\text{cm}^{2}},
$$P = S \cdot F = 3,4 \text{ MBT},$$

где S – площадь атомизатора, принятая равной 20 % от площади мембраны, м².

Минимальная энергия диссоциации дейтерийтритиевой смеси определяется как:

$$P_{\text{at}} = E_{\text{at}} \cdot n_{\text{at}} = 4,54 \cdot 10^{22} \cdot 4,57 =$$
$$= 20,73 \cdot 10^{22} \frac{\text{3B}}{\text{c}} = 33,2 \text{ kBt},$$

где T₂ – 4,59 эВ, D₂ – 4,55 эВ, HD – 4,51 эВ, HT – 4,52 эВ,

$$n_{\rm at} = n_{D-T} \cdot 0.9 = 0.9 \cdot 5.04 \cdot 10^{22} = 4.54 \cdot 10^{22} \frac{\text{частиц}}{\text{c}}$$

количество молекул изотопов водорода принимающих участие в атомизации, n_{D-T} – согласно (1) и (2).

Энергопотребление складывается из энергии диссоциации и тепловых потерь. Как видно, энергия, затрачиваемая на диссоциацию, во много раз меньше потерь энергии на излучение термического атомизатора, поэтому грубо оценивая энергопотребление, можно сказать что оно будет на уровне 3,4 МВт, а КПД составит:

$$\mu = \frac{P_{\text{aT}}}{P} = \frac{33,2}{3400} \cdot 100\% = 0,97\%.$$

Таким образом, крайне низкий КПД не позволяет использовать термическую атомизацию для диссоциации больших потоков водорода.

Выводы

Произведенные расчеты габаритных размеров мембран в сверхпроницаемых мембрананых блоках показывают, что при использовании плазменной диссоцииации потока водорода на выходе из дивертора установок термоядерного синтеза типа ДЕМО-ТИН и ITER возможно снизить площадь мембраны более чем в 10 раз в сравнении с термической атомизацией.

Расчеты энергопотребления и эффективности термического атомизатора так же показывают его не эффективность: при потребляемой мощности 3,4 МВт, КПД не превышает 1 %. В этом плане, 240 кВт для плазменной диссоциации выглядит более перспективно.

Предложена схема реорганизации топливного цикла в соответствии с включением в нее модулей сверхпроницаемых мембран.

Литература

1. Ананьев С. С. Топливный цикл стационарного термоядерного реактора // НИЦ «Курчатовский институт» / Программа совещания по проекту ОПГР и ДЕМО-ТИН, 17–18 февраля 2014 г., Москва.

2. Livshits A. I., Notkin M. E., Samartsev A. A., J. Nucl. Mater., 170 (1990) 74.

3. Livshits A. I. // Sov. Tech. Phys. Lett. 1977. Vol. 3. P. 236.

4. Livshits A. I. // Vacuum. 1979. Vol. 29. P. 103.

5. Livshits A. I., Notkin M. E., Samartsev A. A., Busnyuk A. O., Doroshin A. Yu., Pistunovich V. I. // Ibid. 1992. Vol. 196–198. P. 159.

6. Livshits A. I., Ohyaby N., Bacal M. et al. // Ibid. 1999. Vol. 266–269. P. 1267.

7. Livshits A. I., Ohyaby N. et al. // Ibid. 1997. Vol. 241–243. P. 1203.

8. Peters 2002 Internal Versus External RF Coupling into a Volume Source, Paris, 2002.

9. Чернетский А. В. Введение в физику плазмы. – М.: Атомиздат, 1969. 303 с.

10. Peters 2002 Internal Versus External RF Coupling into a Volume Source, Paris, 2002.

11. Smirnov A. S. Discharge Atomizer for ITER exhaust, Technical Proposals, St. Petersburg, 1994.

12. Kraus W., Mc Neely P., Speth E., Heinemann B., Vollmer O., Wilhelm R. Rev. Sci. Instr. 73 (2002) 1096.

13. Kraus W., Feist J.-H., Speth E. Paper presented on the 19th International Symposium on Fusion Technology (SOFT-19), Lisbon, 1998.

14. Писарев А. А., Цветков И. В., Маренков Е. Д., Ярко С. С. // Проницаемость водорода через металлы, Московский инженерно-физический институт. – Москва 2008.

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ШИБЕРА НА ПЕРЕПАД ДАВЛЕНИЯ НА ЗАТВОРЕ ТРУБОПРОВОДА

И. В. Лопа, <u>А. И. Жукаев</u>

Тульский государственный университет, г. Тула

Рассматриваются основы гидравлического расчета шиберного затвора трубопроводной арматуры. Получены формулы для определения перепада давления на арматуре. Показано, что перепад давления связан с законом изменения площади поперечного сечения затвора во времени. Полученные соотношения позволяют контролировать перепад давлений при закрытии затвора в заданных пределах.

Шиберный затвор – это тип параллельной задвижки. Его запирающий элемент имеет форму острого плоского диска, способного резать твердые включения в рабочую среду. Данный элемент двигается линейно - вниз и вверх в одной плоскости, перпендикулярно к потоку рабочей среды. Шиберный затвор нашел широкое применение в металлургической, бумажно-целлюлозной, химической, энергетической, пищевой и прочих видах промышленности. В основном он используется как запорная арматура, значительно реже как регулирующая для трубопроводов, которые транспортируют абразивные, гранулированные, порошкообразные и жидкие среды с твердыми частицами,

Шиберный затвор [1] (рис. 1) представляет собой корпус, с расположенными внутри двумя седлами – неподвижными элементами с отверстиями, которые предназначаются для прохода в них среды. Внутри корпуса между седлами располагается затвор, который выполнен в форме диска. Шпиндель, приводясь в движении приводом или же маховиком, двигается вверх при открывании проход для рабочей среды, или вниз, для перекрытия прохода.

Запирающий элемент, заточенный по кромке, называется шиберным ножевым затвором, что дает возможность использовать устройство с целью перекрытия потока абразивных и сыпучих сред. Ножевой затвор производят из стали высокой прочности. При эксплуатации его отполировывают для того, чтобы предотвращать заклинивание.

Скорость движения запирающего элемента имеет большое значение. В работе [2] показано, что перепад давления ΔP , связан с законом изменения площади поперечного сечения затвора во времени

$$\Delta P = \delta \psi \xi Q^2 \int_0^T \frac{1}{S(t)^3} \frac{\partial S(t)}{\partial t} dt , \qquad (1)$$

где δ – коэффициент, учитывающий сжимаемость среды; ψ – коэффициент, учитывающий влияние вязкости среды; ξ_a – коэффициент местного сопротивления затвора; S(t) – функция изменения площади поперечного сечения во времени; $V(t) - \phi$ ункция изменения скорости частиц во времени; Q – поток среды (объем среды, проходящий через поперечное сечение за единицу времени).



Рис. 1. Шиберный затвор: 1 – корпус, 2 – нож, 3 – селедка, 4 – уплотнительная резинка, 5 – крышка, 6 – шток, 7 – гайка, 8 – бугель, 9 – втулка, 10 – кольцо-фиксатор, 11 – штурвал, 12 – колпак, 13 – защита, 14 – прокладка

На рис. 2 приведены формы шибера затвора. Для ножа с плоским торцем, рис. 2,а выражение для изменения площади поперечного сечения во времени при закрытии затвора имеет вид:



Рис. 2. Форма шибера затвора: а – нож с плоским торцем, б – нож с закругленным торцем

$$S(t) = \pi r^{2} - r^{2} a \cos\left[\frac{(r-vt)}{r}\right] - (r-vt)r\sqrt{1-\left(\frac{r-vt}{r}\right)^{2}},$$
(2)

где r – радиус отверстия, м; v – скорость движения затвора, м/с; t – время движения затвора, с.

Подставляя (2) в (1), получаем перепад давлений (3).

Для затвора, представленного на рис. 2,6 функция, описывающая изменение площади поперечного сечения во времени имеет вид (4).

Подставляя (4) в (1), получаем соответствующий перепад давлений (5).

На рис. 3 представлено изменение площади поперечного сечения при закрытии заслонки, а на рис. 4 зависимости перепада давления во времени при разных скоростях движения ножа при следующих исходных данных: $\delta \psi \xi Q^2 = const = 1$; $v_1 = 0,001$ м/с; $v_2 = 0,002$ м/с; t = 0-1000 с.

Из рис. 4, что при увеличении скорости движения заслонки в 2 раза время до полного закрытия сокращается вдвое, а перепад давления существенно возрастает.

На рис. 5 изображены зависимости перепада давления от изменения площади поперечного сечения отверстия во времени для затворов, представленных на рис. 2,а и 2,б при следующих исходных данных: $\delta \psi \xi Q^2 = \text{const} = 1$; $v_1 = v_2 = 0,001 \text{ м/c}$; t = 0,-1000 c.

$$\Delta P = \delta \psi \xi Q^{2} \begin{pmatrix} rv \sqrt{1 - \frac{(r - vt)^{2}}{r^{2}}} & -\frac{rv}{\sqrt{1 - \frac{(r - vt)^{2}}{r^{2}}}} & \frac{v(r - vt)^{2}}{r\sqrt{1 - \frac{(r - vt)^{2}}{r^{2}}}} \\ T \int \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(r - vt)^{2}}{r^{2}}}} & \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(r - vt)^{2}}{r^{2}}}} \\ 0 \int \pi r^{2} - r^{2} a \cos \left[\frac{(r - vt)}{r}\right] - (r - vt)r\sqrt{1 - \left(\frac{r - vt}{r}\right)^{2}} \end{pmatrix}^{3} dt \end{pmatrix}.$$
(3)

$$S(t) = \pi r^2 - 2 \left(r^2 a \cos\left[\frac{\left(r - \frac{vt}{2}\right)}{r}\right] - \left(r - \frac{vt}{2}\right) r \sqrt{1 - \left(\frac{r - \frac{vt}{2}}{r}\right)^2} \right)$$
(4)

$$\Delta P = \delta \psi \xi Q^{2} \left\{ \begin{array}{l} \frac{v \left(r - \frac{vt}{2}\right)^{2}}{r \sqrt{1 - \frac{\left(r - \frac{vt}{2}\right)^{2}}{r^{2}}} - rv \sqrt{1 - \frac{\left(r - \frac{vt}{2}\right)^{2}}{r^{2}}} - \frac{rv}{\sqrt{1 - \frac{\left(r - \frac{vt}{2}\right)^{2}}{r^{2}}}}{\sqrt{1 - \frac{\left(r - \frac{vt}{2}\right)^{2}}{r^{2}}} \\ 0 \left(\frac{r^{2} - 2\left(r^{2}a\cos\left[\frac{\left(r - \frac{vt}{2}\right)}{r}\right] - \left(r - \frac{vt}{2}\right)r \sqrt{1 - \left(\frac{r - \frac{vt}{2}}{r}\right)^{2}}\right) \right)^{3}} dt \right\}.$$
(5)



Рис. 3. Зависимость изменения площади поперечного сечения отверстия во времени: 1 – при $v_1 = 0,001$ м/с; 2 - при $v_2 = 0,002$ м/с



Рис. 4. Зависимость перепада давления от изменения площади поперечного сечения отверстия во времени: 1 – при $v_1 = 0,001 \text{ м/c}$; 2 – при $v_2 = 0,002 \text{ м/c}$

Таким образом, можно сделать вывод, что на перепад давления влияет не только изменение скорости движения затвора, но и его форма.



Рис. 5. Зависимость перепада давления от изменения площади поперечного сечения отверстия во времени: 1 – для затвора на рис. 2a; 2 – для затвора на рис. 26

Литература

1. Патент РФ на полезную модель 144208 МПК F16K 3/02 Шиберная задвижка / А.И. Ефимова, И.В. Лопа, Е.В. Панченко, К.А. Туркин. Опубл. 10.08.2014. Бюл. № 22.

2. Лопа И. В., Ефимова А. И., Жукаев А. И. Гидравлический расчет трубопроводной арматуры // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 11: в 2-х ч. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. Ч. 2. С. 3–8.

ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ШИБЕРНОЙ ЗАДВИЖКИ

И. В. Лопа, <u>А. И. Жукаев</u>

Тульский государственный университет, г. Тула

Рассматриваются основы гидравлического расчета трубопроводной арматуры. Получены формулы для определения необходимого для заданного расхода давления в трубопроводе и перепада давления на арматуре. Показано, что перепад давления связан с законом изменения площади поперечного сечения затвора во времени. Полученные соотношения позволяют контролировать перепад давлений при закрытии затвора в заданных пределах.

Гидравлический расчет служит для определения параметров, связанных с гидравлической характеристикой изделия: гидравлического сопротивления (потери напора), пропускной способности (производительности), необходимой площади поперечного сечения, скорости изменения последней при закрывании затвора и т. д.

Арматура, установленная в трубопроводе, создает для движущейся в ней среды дополнительное сопротивление - так называемое местное сопротивление, на преодоление которого тратится энергия. Затрата энергии выражается потерей скоростного напора, в результате чего давление перед затвором будет больше, чем за ним. В простейшем случае при горизонтальном трубопроводе общий напор расходуется на приведение жидкости в движение (создание скоростного напора) и преодоление гидравлических сопротивлений

$$H = \Delta H_{\rm v} + \Delta H_m + \Sigma \Delta H_a \,, \tag{1}$$

где H – полный напор; ΔH_v – часть напора, затрачиваемая на образование скоростного напора; ΔH_m – потеря напора на преодоление трения; $\Delta H_a = AV + BV^2$ – потери напора на преодоление сопротивления арматуры (затвора и т. д.); A и B – физические константы, определяемые из эксперимента.

Как известно, в трубопроводах возможны два режима движения среды: ламинарный и турбулентный. В первом случае потеря напора пропорциональна средней скорости потока в трубе, во втором – квадрату скорости, в зависимости от числа Рейнольдса Re, выражающего отношение сил инерции к силам трения в потоке. В подавляющем большинстве случаев движение среды в трубопроводе имеет турбулентный характер и первой составляющей можно пренебречь [1].

Напор *H* и давление *P* связаны между собой зависимостью

$$P = H\rho g , \qquad (2)$$

где р – плотность среды; *g* – ускорение свободного падения.

Тогда формулу (1) можно записать

$$P = \Delta P_{v} + \Delta P_{m} + \Sigma \Delta P_{a}, \qquad (3)$$

где P – давление, создаваемое напором; ΔP_{v} – часть давления, затрачиваемая на образование скоростного напора; ΔP_{m} – потеря давления, вызванная преодолением трения; ΔP_{a} – потеря давления в арматуре (на затворе и т. д.).

Приняв, что вся потенциальная энергия жидкости превращается в кинетическую, получим скорость движения идеальной жидкости под действием гидростатического напора, равную скорости тела, падающего с той же высоты: $V = \sqrt{2gH}$.

Эта формула называется формулой Торричелли. Ее удобно записывать в виде

$$H = \frac{V^2}{2g}.$$
 (4)

С учетом (4) и (2) составляющие (3) можно записать так:

$$\Delta P_{\rm V} = \frac{V^2 \gamma}{2g} = \frac{V^2 \rho}{2};$$

$$\Delta P_m = \lambda \frac{L}{D} \frac{V^2 \gamma}{2g} = \lambda \frac{L}{D} \frac{V^2 \rho}{2};$$

$$\Delta P_a = \xi_a \frac{V^2 \gamma}{2g} = \xi_a \frac{V^2 \rho}{2},$$

где λ – коэффициент трения; L – длина трубопровода; D – условный диаметр трубопровода; ξ_a – коэффициент местного сопротивления затвора.

Окончательно для давления получим

$$P = \left(1 + \lambda \frac{L}{D} + \Sigma \xi_a\right) \frac{V^2 \rho}{2}.$$
 (5)

При помощи формулы (5) можно определить необходимое для заданного расхода давление в трубопроводе. При проектировании арматуры, в том числе и запорной, важное значение имеет перепад давления на арматуре. Например, при закрытии заслонки этот перепад давлений дополнительно нагружает трубопровод. Выражение для перепада давления на арматуре

$$\Delta P = \delta \psi \xi \frac{V^2 \rho}{2}, \qquad (6)$$

где δ – коэффициент, учитывающий сжимаемость среды; ψ – коэффициент, учитывающий влияние вязкости среды.

Проанализируем уравнение (6) с точки зрения гидродинамики. Для несжимаемой жидкости произведение SV в любом сечении одной и той же трубки тока должно быть одинаково. Этот закон носит название теоремы о неразрывности струи и для трубы переменного сечения записывается в следующем виде

$$S(t)V(t) = Q = \text{const},\tag{7}$$

где S(t) – функция изменения площади поперечного сечения во времени; V(t) – функция изменения скорости частиц во времени; Q – поток жидкости (объем жидкости, проходящий через поперечное сечение за единицу времени).

Из (7) следует, что при переменном сечении трубки тока частицы несжимаемой жидкости движутся с ускорением. В горизонтальной трубке тока это ускорение может быть обусловлено только непостоянством давления вдоль оси трубки – в местах, где скорость меньше, давление должно быть больше, и наоборот.

Для горизонтальной линии тока справедливо уравнение Бернулли

$$\frac{V(t)^2 \rho}{2} + P(t) = \text{const}, \qquad (8)$$

т. е. давление оказывается меньшим в тех точках, где скорость больше.

При закрытии заслонки площадь поперечного сечения трубопровода уменьшается, скорость течения жидкости за заслонкой возрастает и, согласно (8), давление уменьшается. Причем сужение сечения, ускорение жидкости и уменьшение давления происходят в сечении с фиксированной координатой, следовательно, целесообразно говорить о разности давлений до и после затвора, т. е. $P(t) \cong \Delta P(t)$. Следовательно, уравнения (6) и (8) отличаются только на величины постоянных множителей, учитывающих сжимаемость, вязкость среды и местное сопротивление, зависящее от конкретной конструкции запора.

Введем в уравнение (8) соответствующие константы и продифференцируем его во времени

$$\frac{\partial \left(\Delta P(t)\right)}{\partial t} = -\delta \psi \xi \rho V(t) \frac{\partial V(t)}{\partial t} . \tag{9}$$

Производная $\frac{\partial V(t)}{\partial t}$ из уравнения (7) определит-

ся так

$$\frac{\partial V(t)}{\partial t} = -\frac{V(t)}{S(t)} \cdot \frac{\partial S(t)}{\partial t}.$$
 (10)

Так как V(t) = Q/S(t), то решая совместно (9) и (10), получим

$$\frac{\partial(\Delta P(t))}{\partial t} = \delta \psi \xi \rho \frac{Q^2}{S(t)^3} \frac{\partial S(t)}{\partial t} \,. \tag{11}$$

Теперь, интегрируя (11) на протяжении времени закрытия затвора T, находим перепад давления ΔP , связанный с законом изменения площади поперечно-го сечения затвора во времени

$$\Delta P = \delta \psi \xi Q^2 \int_0^T \frac{1}{S(t)^3} \frac{\partial S(t)}{\partial t} dt . \qquad (12)$$

Правая часть (12) имеет вид функционала, и, следовательно, в зависимости от времени закрытия затвора, закона изменения площади поперечного сечения затвора во времени будет получаться разный перепад давления до и после затвора ΔP .

Выявлено, что изменение площади поперечного сечения трубопровода во времени при разных скоростях движения затвора происходит по линейному закону (рис. 1).



Рис. 1. Изменение площади поперечного сечения трубопровода во времени при разных скоростях движения затвора

Из рис. 1 видно, что на прямой 2 скорость закрытия в два раза больше, чем для прямой 1.

Показано, что при линейном изменении площади поперечного сечения при большей в два раза скорости перекрытия потока перепад давления также в два раза больше (рис. 2, кривая 2).



Рис. 2. Перепады давлений в трубопроводе при разных скоростях уменьшения площади поперечного сечения

Таким образом, при выборе привода арматуры полезно воспользоваться соотношением (12), позволяющим контролировать перепад давлений при закрытии заслонки в заданных пределах.

Литература

1. Лопа И. В., Патрикова Т. С., Ефимова А. И. Учет поддерживающего влияния резьбы при определении прогибов винтов роторно-вращательных насосов // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 4: в 2-х ч. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. Ч. 2. С. 3

ЛАБОРАТОРНЫЙ МЕТОД ИЗУЧЕНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОДВОДНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ НА ПОДВОДНЫЙ АППАРАТ

Зеленкина Н. В.

ФГУП «ВНИИА им. Н. Л. Духова», Москва

В работе предложен лабораторный метод генерации подводной ударной волны (ПУВ) посредством падения воздушной ударной волны (ВУВ) на свободную поверхность воды. Построена аналитическая модель оценки избыточного давления во фронте ПУВ и показана ее прогностическая состоятельность.

Практическое значение заключается в том, что рассматриваемый метод позволяет проводить оценку реакции элементов конструкций разрабатываемых изделий на воздействие ПУВ независимо от погодных условий с существенной экономией ресурсов по сравнению с полигонными испытаниями.

Введение

Известно, что часто проводятся испытания с целью изучения реакции подводного аппарата (ПА), представляющего собой оболочечную конструкцию с внутренним насыщением, во время и после воздействия на него ПУВ. По стандартной схеме (рис. 1) ударная волна (УВ) в условиях испытаний задается взрывом в воде заглубленного заряда взрывчатого вещества (ВВ). Эта волна действует на заглубленный на некотором расстоянии от заряда ПА.

Подобные испытания являются весьма затратными. Поэтому целесообразно полномасштабные испытания ПА и его узлов предварить экспериментальными исследованиями, которые можно было бы проводить в более простой и менее затратной постановке. Ниже рассматривается способ генерации ПУВ, с использованием которого возможно создание лабораторных устройств, позволяющих проводить как экспресс-оценки реакции ПА на воздействие ПУВ, так и получать информацию в целях совершенствования и калибровки расчетных моделей.

В естественных условиях свободная поверхность воды граничит с воздухом. Известно [1, 2], что в соответствии с законами отражения и преломления волн (акустических или ударных) на границе раздела двух сред происходит усиление или ослабление давления на фронте УВ в зависимости от соотношения акустических сопротивлений этих сред и направления движения волны. В работе [3] экспериментально показано, что при падении ВУВ на поверхность воды в ней генерируется ПУВ с давлением в приповерхностном слое в 4 раза больше, чем в ВУВ, падающей на границу «воздух–вода».

Применительно к условиям нашей задачи, наиболее простой и доступный способ генерации ПУВ в наземных условиях – падение на свободную поверхность воды ВУВ, сформированной взрывом сферического заряда ВВ на некотором расстоянии от воды.



Рис. 1. Схема испытания подводного аппарата

Расчет давления во фронте ВУВ

1. Первым этапом разработки математического аппарата, позволяющего рассчитывать

зависимость давления в ПУВ, сгенерированной ВВ при взрыве в воздухе, является построение формулы для расчета давления на фронте ВУВ в зависимости от расстояния до заряда ВВ. Это позволит нам оценить силу ударной волны в воздухе, в области у поверхности воды.

Для удобства последующего изложения, введем следующие обозначения:

Δ*p* – максимальное давление на фронте ударной волны;

R – расстояние от точки наблюдения до заряда ВВ;

 $- p_0$ – атмосферное давление при нормальных условиях, $p_0 = 1$ атм.

Для построения зависимости $\Delta p = f(R)$ из работы [4] были заимствованы экспериментальные данные по измерению основных параметров ударной волны в воздухе. Измерения проводились при взрывах литых зарядов тротил – гексоген 50/50 (ТГ 50/50) сферической формы весом 0,135 кг, плотностью 1,67 г/см³ и, соответственно, радиусом $r_0 = 27$ мм. Полученные средние величины давлений Δp на фронте ВУВ и времени фазы сжатия τ_+ приведены в табл. 1.

На рис. 2 точками показаны результаты проведенных измерений максимальных давлений для различных обезразмеренных расстояний от центра взрыва. Кривая представляет приближенную зависимость этих величин.



По форме кривой видно, что ее уравнение представляет собой степенную функцию с отрицательным показателем. Будем искать эту функцию в виде:

$$\frac{\Delta p}{p_0} = f\left(\frac{R}{r_0}\right) = \frac{A}{\left(\frac{R}{r_0}\right)^n},$$

где *А* и *n* – неизвестные константы.

Используя логарифмический метод, преобразуем соотношение следующим образом:

$$\ln \frac{\Delta p}{p_0} = \ln A - n \ln \frac{R}{r_0}$$

которое представляет собой уравнение прямой в координатах $\ln \frac{\Delta p}{p_0}, \ln \frac{R}{r_0}$, представленное на рис. 3.

Таблица 1

Резу	льтаты по измерению основных параметров ударной волны в воздухе для 135 г ГГ 50/50				Расчет по (1)
R , мм	R/r0	τ ₊ , мсек	Др, кг/см²	∆р, Па	Δр, кг/см²
130	4,8		105	10297350	104,7
150	5,6		77	7551390	82,8
200	7,4	0,08	53	5197710	54,2
250	9,3	0,05	43	4217010	38,3
300	11,1	0,09	33	3236310	29,3
350	13	0,32	24,5	2402715	23,0
400	14,8	0,39	21	2059470	18,9
450	16,7	0,41	16,5	1618155	15,7
500	18,5	0,44	12,5	1225875	13,5
550	20,4	0,47	10,5	1029735	11,6

Экспериментальные и расчетные данные Δp и τ_+



Рис. 3. Логарифмическая зависимость $\Delta p(R)$

Используя метод наименьших квадратов [5], получим следующие значения для коэффициента n и свободного члена $\ln A$:

$$n = 1,5205;$$

ln $A = 7,035.$

Искомое соотношение для расчета $\Delta p = f\left(\frac{R}{r_0}\right)$

при взрыве в воздухе заряда ВВ ТГ 50/50 представимо в безразмерном виде как:

$$\Delta p = p_0 \frac{1136}{\left(\frac{R}{r_0}\right)^{1,52}} [\text{атм.}], \qquad (1)$$

где $4,8 \le \frac{R}{r_0} \le 20$, что обусловлено границами рас-

сматриваемых опытных данных.

Расчет давления по формуле (1) приведен в последнем столбце табл. 1. Из табл. 1 графика на рис. 2 видно соответствие экспериментальных и расчетных данных.

2. В качестве второго этапа построения математического описания процесса, будет иметь место построение формулы, описывающей давление на фронте ударной волны в воде в зависимости от расстояния до границы раздела сред (воздух-вода).

В результате большого числа опытов установлено [2, 8], что при взрыве в воде компактного ВВ давление Δp_B на фронте ПУВ определяется соотношением:

$$\Delta p_B = p_0 \frac{A_i}{\left(\frac{R_B}{r_0}\right)^{1,13}} [\text{atm.}]$$
(2)

где A_i постоянный коэффициент для данного BB, R_B – расстояние от заряда в воде.

Согласно принципу энергетического подобия [2] значение коэффициента, $A_i = \gamma_i A$, где A = 14700,

а
$$\gamma_i = \left(\frac{Q_i}{Q_m}\right)^{\frac{1,13}{3}} = \left(\frac{Q_i}{Q_m}\right)^{0,377}$$
, где Q_i – удельная

энергия данного ВВ, Q_T – удельная энергия тротила.

Используя справочные данные для значений удельных энергий для ТГ 50/50 [6] и тротила [7], запишем закон распространения ударной волны при взрыве заряда ТГ 50/50 в воде следующим образом:

$$\Delta p_B = p_0 \frac{16170}{\left(\frac{R_B}{r_0}\right)^{1,13}} [\text{atm.}]$$
(3)

Теперь рассмотрим переход ударной волны из воздуха в воду (рис. 4). ВВ находится в воздухе с атмосферным давлением p_0 на расстоянии H над поверхностью воды. Взрыв ВВ инициирует сферическую ударную волну, давление на фронте которой, у поверхности воды (на расстоянии H от места взрыва), обозначим Δp_{Γ} . При достижении раздела двух сред, волна частично отражается, а частично проходит через границу в воду, инициируя ПУВ, максимальное давление в которой у границы обозначим через $\Delta p_{B\Gamma}$. Наша задача состоит в том, чтобы определить давление на фронте подводной ударной волны на некоторой глубине, обозначенной h, от поверхности воды.

Как уже было отмечено выше, при переходе УВ из воздуха в воду имеет место четырехкратное усиление давления на ударном фронте[3].

$$\Delta p_{B\Gamma} = 4\Delta p_{\Gamma} \tag{4}$$

Подставляя (1) для Δp_{Γ} и (3) для $\Delta p_{B\Gamma}$ в (4), после преобразований получим следующее выражение для $R_{B\Gamma}$:

$$R_{B\Gamma}^{1,13} = 3,56r_0^{-0,39}H^{1,52}$$
(5)



Рис. 4. Переход ударной волны из воздуха в воду

Сделаем замену переменных, $R_B = R_{B\Gamma} + h$ где h – глубина от поверхности раздела (см. рис. 4). Подставляя выражение для R_B в (3), получаем для ТГ 50/50 итоговую формулу, описывающую зависимость давления на фронте ПУВ в зависимости от расстояния H от ВВ до поверхности воды и глубины h до точки наблюдения:



3. Прогностическую состоятельность предложенного алгоритма расчета давления во фронте ПУВ, генерируемой ВУВ, оценим сопоставлением расчетных и экспериментальных данных, используя для этого результаты ранее проведенных в наземных условиях специальных опытов. Опыты проводились по схеме, рис. 5. В емкость с водой, имевшую форму полуцилиндра диаметром 1880 мм и длиной 3900 мм, полностью погружался объект испытаний, составной частью которого был корпус ПА.

Подводная ударная волна в емкости с водой формировалась взрывом заряда ВВ в воздухе, т. е. вследствие взаимодействия воздушной ударной волны с водой. В качестве ВВ использовался пластит марки ПВВ-4 массой 100 г. В схеме опытов изменялось только расстояние от центра сферического заряда до свободной поверхности воды. Двумя нумерованными точками N1 и N2 на рис. 5 обозначены места размещения ударных датчиков на шпангоуте ПА, а крестиком – место размещения в воде в 20 мм от ПА датчика давления для измерения параметров падающей на ПА подводной ударной волны. Датчик N1 имел поперечную ориентацию относительно продольной оси ПА, а датчик N2 сонаправлен с осью.



Рис. 5. Схема опыта

Для наглядности на рис.6 приведена фотография емкости, в качестве которой в данном эксперименте использовалась крышка транспортного контейнера.



Рис. 6. Фотография емкости для эксперимента

Результаты экспериментов приведены в табл. 2

Таблица 2

N₂	TT	h	опыт Др _{ПУВ} ,	расчет Др _{ПУВ} ,	Время до срабатыван	ия ударных датчиков
опыта	п, мм	п, мм	атм	атм	продольной ориентации	поперечной ориентации
1	150	180	213	213	280 мкс	160 мкс
2	300	180	96	84	_	308 мкс
3	350	180	80	68	_	_

Экспериментальные и расчетные данные $\Delta p_{\Pi YB}$

Расчетные оценки $\Delta p_{\Pi YB}$ получены следующим образом. Поскольку энерговыделение используемого в эксперименте ПВВ-4 [7] отлично от энерговыделения ТГ 50/50 [6], рассчитаем, сколько ТГ 50/50 понадобится для имитации взрыва 100 г. ПВВ-4.

$$G_{TT 50/50} = \frac{Q_{\Pi BB-4}}{Q_{TT 50/50}} G_{\Pi BB-4} = \frac{920}{1140} 100 [\Gamma] \cong 81 \Gamma \text{pamm}$$

Данному количеству ТГ 50/50 соответствует шар радиуса $r_0 = 2,3$ см.

Используя построенную нами ранее формулу (6) было рассчитано максимальное давление в ПУВ, сформированной взрывом ВВ в воздухе для параметров, соответствующих эксперименту (H=0,15; 0,3 и 0,35 м., h = 0,18 м).

Сопоставление экспериментальных и расчетных данных показывает, что предложенный нами метод прогнозирования значений давления на фронте ударной волны является приемлемым для практического применения (см. табл. 2).

Реакция ударных датчиков (срабатывание/несрабатывание) при ударно-волновом воздействии на ПА в опытах по схеме рис. 5 является логичной и ее можно рассматривать как демонстрацию состоятельности предложенного способа генерации ПУВ с помощью ВУВ, образующейся при взрыве над свободной поверхностью воды заряда ВВ.

4. До этого мы рассчитывали давление во фронте падающей ударной волны, не учитывая ее взаимодействия с ПА, что, однако, является далеко немаловажным. Поскольку УВ имеет сферическую форму, а ПА некоторые линейные размеры, давление, вызванное УВ и приходящее на разные части ПА будет иметь различные значения. Несмотря на это, варьируя высоту взрыва и массу заряда, мы можем зафиксировать некоторое требуемое давление, охватывающее весь ПА или интересующую нас часть.

Известно [2], что высота взрыва двояким образом влияет на величину давления у поверхности, на которую падает волна. Для заданной интенсивности волны Δp_{2} можно указать такое значение высоты *H*, при котором расстояние от эпицентра до точки с давлением Δp_{2} оказывается наибольшим. Эта высота называется оптимальной.

Если заряд располагать выше или ниже оптимальной высоты L_{pr} , размеры радиусов зон заданного действия L_{pr} (размеры области на поверхности воды, в каждой точке которой давление не меньше Δp_r) уменьшаются. Эмпирическая формула, связывающая оптимальную высоту с весом заряда и заданной величиной давления на фронте волны (для тротила) имеет вид [2]:

$$H_{\rm OHT} \cong 3,23 \sqrt{\frac{G}{\Delta p_{\rm r}}}$$
 (7)

где G – вес заряда, кг, Δp_2 – заданная величина давления на фронте, кг/см, H_{onm} – оптимальная высота, м.

Расстояния по горизонтали L_{pr} , на которых наблюдается заданная величина давления Δp_r при взрыве на оптимальной высоте, выражаются приближенной зависимостью [2]:

$$L_{p_2} \cong 1.3 \frac{H_{onm}}{\Delta p_2^{0.4}} \tag{8}$$

В соответствии с принципом энергетического подобия для приближенной оценки H_{onm} при взрыве заряда другого ВВ (например, ТГ 50/50) вместо величины *G* в (7) нужно подставить $\frac{Q_{T\Gamma 50/50}}{Q_T}G = 1,14G$, где $Q_{T\Gamma 50/50}$ – удельная энергия ТГ 50/50; Q_T – удельная энергия тротила.

Примем характерный размер ПА равным 1,5 м, а значение заданного давления ограничим порядком 10^1 атмосфер. В табл. 3 представлены расчетные значения (на основании формул (7) и (8)) оптимальной высоты H_{onm} и минимальной массы заряда *G*TГ 50/50, способной обеспечить каждое из заданных давлений Δp_2 для $L_{p2} = 0,75$ м.

Таблица 3

Расчетные данные оптимальной высоты *H*_{onm}

0	<u> </u>	
	1 -	
и минимальной массы заряла	• •	
in minimum biron mucobi suprigu	~	

Оценка необходимой массы заряда для обеспечения заданного давления в области ПА длиной 1,5 м			
Δp_2 , K Γ /cm ²	$\Delta p_{\scriptscriptstyle 62},$ кг/см 2	<i>H_{onm}</i> , м	<i>G</i> , кг
10	40	1,45	0,8
20	80	1,91	3,2
30	120	2,25	7,9

Таким образом, для ПА длиной 1,5 м необходимая масса BB, способная обеспечить давление в ПУВ в области ПА не менее 40 кг/см² не превышает 1 кг ТГ 50/50, что подтверждает возможность проводить эксперименты такого рода в условиях бронекамеры. Для больших давлений, когда потребная масса BB будет превышать допустимое для взрывостойкости бронекамеры значение, при положительной температуре воздуха опыты можно проводить на открытой площадке.

Заключение

В работе рассмотрен экспериментально подтвержденный способ генерации ПУВ посредством падающей на свободную поверхность воды ВУВ, формируемой взрывом в воздухе заряда ВВ. Применительно к этому случаю разработан алгоритм, позволяющий рассчитывать давление во фронте ПУВ на произвольной глубине от границы вода-воздух. Представленные результаты легли в основу заявки на изобретение № 2016131490 от 01.08.2016 «Способ исследованияв лабораторных условиях сотрясений элементов подводного аппарата при воздействии на него подводной ударной волны», автор Зеленкина Н. В.

Автор благодарит Г.И.Саламаткина (ФГУП ВНИИА) за предложенную тему и совместное обсуждение результатов работы.

Литература

1. Исакович М. А. Общая акустика. – М.: Наука, 1973. 496 с.

2. Яковлев Ю. С. Гидродинамика взрыва. – Л.: Судпромгиз, 1961. 314 с.

3. Грибин С. В. и др. Оптические исследования параметров ударной волны при переходе из воздуха в воду // Журнал технической физики, 1998, Т. 68, № 8.

4. Адушкин В. В., Коротков А. И. Параметры ударной волны вблизи от заряда ВВ при взрыве в воздухе // Журнал прикладной механики и технической физики, 1961, № 5.

5. Косарев Е. Л. Методы обработки экспериментальных данных. – М.: Физматлит, 2008. 208 с.

6. Селиванов В. В., Кобылкин И. Ф., Новиков С. А. Взрывные технологии. – М.:МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. 578 с.

7. Взрывчатые материалы. Их свойства и применение / Справочник. Вып. 1. – Сергиев Посад: ЦФТИ МО РФ, 2002. 26 стр.

8. Коул Роберт, Подводные взрывы. – М.: издво иностран. лит-ры, 1950. 494 с.

ВНЕДРЕНИЕ И РАСШИРЕНИЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА СЕРВЕРНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ИНСТРУМЕНТОВ NAGIOS И GANGLIA

<u>М. А. Карпов</u>, Л. А. Копылов

АО «ОКБМ Африкантов», г. Н. Новгород

Введение

Одной из важнейших задач, стоящих перед ИТподразделениями, является обеспечение работы вычислительной инфраструктуры предприятия с минимальным временем простоя оборудования. Причинами отказов в работе вычислительной техники могут служить как выход из строя компонентов аппаратного обеспечения, так и ошибки в работе программ. В условиях применения серверов в круглосуточном режиме, например для задач высокопроизводительных вычислений, необходимо сокращать время на ремонт и устранение ошибок для использования оборудования с максимальной эффективностью. Важнейшим инструментом для обеспечения решения вышеупомянутой задачи является автоматизированная система мониторинга.

Предпосылки

Основные предпосылки для внедрения системы мониторинга:

 рост вычислительной инфраструктуры. Когда число узлов для отслеживания состояния уже составляет не единицы, а десятки и сотни серверов с множеством работающих сервисов;

 необходимость своевременной реакции на возникающие проблемы. В ручном режиме невозможно отследить состояние всех систем. Администратор узнает о проблемах от пользователей с большим опозданием и проблема решается спустя несколько дней после возникновения;

• требуется сбор статистики состояния, рис. 1, всей инфраструктуры для последующего анализа. Благодаря статистике состояния систем можно:

- оценить отказоустойчивость,

– спрогнозировать возможные проблемы,

 принять решение о проведении модернизации аппаратных и программных ресурсов.

Выбор инструментов

На сегодняшний день существует множество различных средств для организации мониторинга. В качестве основных инструментов были выбраны системы Nagios [1] и Ganglia [2]. Обе эти системы обладают следующими особенностями:

1) открытый исходный код, бесплатность.

2) системы давно эксплуатируются множеством пользователей, имеют положительную репутацию.

 расширяемость. Системы легко расширить под свои нужды.

В качестве основы системы комплексного мониторинга инфраструктуры была выбрана система Nagios.

Система Nagios обладает следующими возможностями:

 обеспечивает мониторинг состояния систем, с помощью механизма проверок через определенные интервалы времени;

 предоставляет возможность обзора состояния всей инфраструктуры с разными способами визуализации.

• дает возможность индивидуального и группового оповещения ИТ-специалистов различными способами (система легко расширяется под любой способ оповещения: электронная почта, мгновенные сообщения, sms-сообщения и др.)



Рис. 1. Пример графика статистики состояния системы

000		Nagios	9
	://yarg/nagios/		- Q- Google
Current Status © Tactical Overview © Map © Hosts © Hosts © Services © Host Groups • Summary • Grid	Current Network Status Last Upsamb Web Des 30 311:38 EST 2009 Upsated every 90 seconds Nagadat Card 32.0 - www.hajdas.org Loggen am Inear Web Status Basta Deal For Al Hot Concets Web Status Basta Deal For Al Hot Concets Web Status Concets Deal For Al Hot Concets Web Status Concets Deal For Al Hot Concets Web Status Concets Deal For Al Hot Concets	Host Status Totals Up Down Urreachable Pending 16 2 0 10 All Problems All Types 2 28	Service Status Totals OK Warning Unknown - Critical Pending All Problems All Types 109
Service Groups Summary Grid		Service Overview For All Host Grou	ps
Office Problems Services (Unhandled) Hosts (Unhandled) Network Outages Quick Search:	Backup Servers (backup-servers) Host Status Services Actions backup & UP 120K Q B A backup & DOWN 100K Q B A	DNS Servers (dns-servers) Host Status Services Actions re0 A UP 20K A SA re1 A DOWN 20K A SA	File Servers (file-servers) Host Status Services Actions asta00 Q UP 170K Q S 2
Reports	LDAP Servers (Idap-servers) Host Status Services Actions	Mail Servers (mail-servers) Host Status Services Actions	NRPE Hosts (nrpe-hosts) Host Status Services Actions
Availability O Availability O Trends O Atoria History Summary Histogram O Notifications O Event Log	inu-1 ∰ UP BOK Q ≦ inu-2 ∰ UP BOK Q ≦ BOC Q ≦ BOK Q ≦ BOK Q § BOK	matto 🛕 up 150K 🔍 🗟 🖧	Leasuppi Δ μP 120K ⊂ 5 Å Sacupi Δ μP 120K ⊂ 5 Å Sacupi Δ μP 120K ⊂ 5 Å Sacupi Δ μP 170K ⊂ 5 Å Sacupi Δ μP 170K ⊂ 5 Å Sacupi Δ μP 120K ⊂ 5 Å Sacupi Δ μP 120K ⊂ 5 Å Sacupi Δ μP 120K ⊂ 5 Å
System © Comments © Downtime © Process info © Performance Info © Scheduling Queue © Configuration	Offsite Servers (offsite) Host Status Services Actions	Time Servers (time-servers) Host Status Services Actions	reation A UP 15.0K A S A projects A UP TOOM A S A UPS Hosts (ups-hosts) Host Status Services Actions between A up
General O Home O Documentation			backup1 A DOWN 100K Q B A data00 A UP 170K Q B A

Рис. 2. Интерфейс обзора системы Nagios

К преимуществам системы относятся:

• установка на современные Unix-подобные операционные системы без сложных зависимостей;

• гибкая конфигурация через текстовые файлы с поддержкой группировки и наследования;

 расширяемость. Можно расширить модулями для проверок, оповещения, визуализации, сбора статистики. Множество модулей уже разработано сообществом пользователей системы и доступно для использования;

• простая организация распределенного и иерархического мониторинга (когда один сервер Nagios пересылает данные на другой, а он в свою очередь уже оповещает пользователей).

Недостатки системы:

• в бесплатном варианте системы конфигурация в обход текстовых файлов (например, через вебинтерфейс) затруднительна.

• программы-агенты для удаленных проверок, доступны только как модули расширения, а не в комплекте с системой.

Для решения проблемы удаленного агента проверок систем и сбора статистики была выбрана программа Ganglia, рис. 3. Система состоит из трех основных частей: агент gmond, устанавливаемый на отслеживаемый сервер, программа gmetad, которая собирает данные с агентов и сохраняет их в базу данных, веб-интерфейс для визуализации данных.



Рис. 3. Архитектура системы Ganglia

Система Ganglia обеспечивает отображение графиков метрик состояния отслеживаемых серверов за требуемый исторический период времени, рис. 4.



Рис. 4. Графики метрик в системе Ganglia

Система Ganglia обладает следующими преимуществами:

• быстро развертывается на большую инфраструктуру

• в базовом варианте работы может собирать множество метрик

• легко расширить дополнительными модулями (на языках программирования C, Python) для сбора нужных метрик

• имеет простой web-арі для опроса метрик сторонними системами (Nagios)

Недостатки системы:

• отсутствие агента под операционные системы семейства MS Windows

• собираемые по-умолчанию метрики могут быть избыточны (потребуется конфигурировать для уменьшения числа собираемых метрик)

• отсутствие способа конфигурирования системы через веб-интерфейс

Схема мониторинга

При совместном использовании систем Nagios и Ganglia предлагается следующая принципиальная схема мониторинга, рис. 5.

При такой схеме мониторинга агенты системы Ganglia устанавливаются на отслеживаемые серверы, и собирают большую часть необходимых метрик. Контроль над значениями этих метрик производится системой Nagios с помощью проверок посредством обращения к web-api системы Ganglia. Те параметры работы серверов и приложений, которые сложно собирать с помощью ganglia, отслеживаются с помощью модулей расширений проверок Nagios. Система Nagios может, как выполнять проверки удаленно на серверах, так и работать на прием результатов проверок, выполненных на серверах по расписанию.

Распределение задач между системами в данной схеме мониторинга представлено в таблице.

Разделение задач между систем	лами мониторинга
-------------------------------	------------------

Ganglia	Nagios	
Функция агента для сбора параметров, в том числе для системы Nagios	Мониторинг в реальном времени	
Архивирование статистики	Оповещение о возникших неисправностях	
Отображение графиков	Мониторинг параметров, не отслеживаемых системой Ganglia	



Рис. 5. Общая схема мониторинга

Выводы

Сочетание систем Nagios и Ganglia позволяет компенсировать ряд их недостатков по отдельности:

• агент Ganglia дает Nagios средство для удаленного сбора метрик;

• Nagios легко расширяется для проверок, дополняя количественные метрики Ganglia;

• Ganglia используется для хранения исторических данных, обеспечивая оценку тенденций в работе систем.

Система Nagios предоставляет механизм оповещений для оперативной реакции на возникающие внештатные ситуации и обеспечивает полный обзор состояния инфраструктуры для поиска источников проблем.

Обе системы предоставляют для работы администратора независимый от платформы веб-интерфейс. Однако для инфраструктур насыщенных операционными системами семейства MS Windows стоит обратить внимание на другие инструменты, например систему с открытым исходным кодом Zabbix [3].

Литература

1. Nagios [Электронный ресурс] [https://www. nagios.org/]. Проверено 11.07.2016.

2. Ganglia [Электронный ресурс] [http://ganglia. info/]. Проверено 11.07.2016.

3. Zabbix [Электронный ресурс] [http://www.zabbix.com]. Проверено 11.07.2016.

4. Matt Massie, Bernard Li, Brad Nicholes, and Vladimir Vuksan. Monitoring with Ganglia. O'Reilly Media, 2012.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ СТЕПЕНИ ИНТЕГРАЦИИ И СНИЖЕНИЯ МАССОГАБАРИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СПП ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ МНОГОУРОВНЕВЫХ СБОРОК

Е. А. Козлов

ФГУП «ВНИИА им. Н. Л. Духова», Москва

Современный рынок интегральных микросхем предъявляет к конструкции интегральных схем (ИС) все более жесткие условия. Теперь ИС должны быть не только высокопроизводительными и иметь минимальные габаритные размеры, но и обеспечивать при этом максимально возможную функциональность. Повсеместная миниатюризация электронных приборов не оставляет выбора разработчикам современных технологий производства ИС. На сегодняшний день для обеспечения более высокого уровня функциональности при минимальных размерах и максимальном быстродействии остается единственный путь развития конструкции ИС – 3D-интеграция.

Широкий спектр современных изделий, использующих технологии 3D микрокорпусирования и микросборки, или, иными словами, «системы в корпусе» можно упрощенно классифицировать по трем основным группам (см. рис. 1):

 многокристальные модули с кристаллами, расположенными один на другом («stacked dies») и организацией межсоединений проволочными выводами;

 многоэтажные корпуса (SoP – «system on package») с организацией межсоединений с помощью шариковых выводов или так называемых «бампов»;

 многокристальные модули, использующие технологии создания для организации межсоединений переходных отверстий в материале самих полупроводниковых кристаллов (TSV – «through silicon vias»).

В работе были поставлены следующие задачи:

 исследование способов формирования электрического соединения между уровнями микросхемы, созданными структурированными керамическими подложками для многоуровневого 3D-соединения;

 создание многоуровневого аналога существующей микросхемы БМС1-1 (большая микросхема одноуровневая) – ММС3-1 (малая микросхема трехуровневая), удовлетворяющего всем рабочим характеристикам;

3) разработка многоуровневой микросхемы MMC2-1 (малая микросхема двухуровневая).

Для формирования электрического соединения между уровнями микросхемы исследованы два способа соединения в многоуровневой микросхеме, рис. 1.

Пунктиром указан инструмент ультразвуковой сварки, его размеры, и соответствующие размеры окон, рис. 1,а.

Также представлен предварительный размер металлизированного отверстия в керамике, осуществляющего соединение уровней, рис. 1,б.



Рис. 1. Способы соединения в многоуровневой микросхеме: а – соединение проволокой, б – соединение металлизированными отверстиями

Проведен сравнительный анализ этих способов соединения:

• соединение проволокой (СП):

 способ формирования содержит элементы отработанной технологии;

 малое время создания соединения уровней разваркой проволокой;

 – большая занимаемая площадь подложки для формирования перехода;

 проволочное соединение подвержено внешнему воздействию.

 соединение металлизированными отверстиями (СМО):

> сложная технология формирования (в процессе металлизации);

> одновременное создание электрического и физического контакта уровней;

> малая занимаемая площадь для создания соединения на обоих уровнях;

> соединение не подвержено внешнему воздействию.

На основании проведенного сравнительного анализа принято решение разработать многоуровневую микросхему, соединение в которой происходит с помощью СП, так как данный способ является более доступным и выполнимым в настоящее время на базе института.

Для усовершенствования выбрана микросхема БМС1-1, обладающая следующими недостатками:

большая площадь подложки микросхемы;

проблема посадки разных кристаллов на одной подложке;

 проблема проверки отдельных узлов микросхемы на работоспособность до герметизации.

Микросхема была разбита на 3 части по функциональным характеристикам кристаллов (рис. 2), продуманы металлизация и переходные отверстия, все выводы были перенесены на один (нижний) уровень. Размер каждой подложки составил 12×14 мм, который является «стандартным» размером серии М, но это не говорит о стремлении к унификации. Скорее наоборот: мы можем сделать размеры подложек иными, даже не одинаковыми между собой при необходимости. Аналогично можно поступить и с выводами – оставить их на одном уровне или вынести на несколько уровней.

Создание микросборки: керамическая пластина из нитрида алюминия предварительно проходит обработку на лазерной установке. В пластине толщиной с помощью лазерной обработки создаются углубления, а также сквозные отверстия прямоугольной формы. Углубления созданы для помещения в пространство их объёма полупроводниковых элементов предыдущего уровня. Отверстия созданы для осуществления электрического соединения уровней. Далее пластины химическим способом отмывают от продуктов обработки лазером. После операции отмывки следуют стандартные операции: металлизация с помощью фотолитографии, резка на установке резки и отмывка в органических и неорганических растворах. На каждой отдельной подложке осуществляют монтаж кристаллов и выводов, после происходит поэтапное клеевое соединение уровней микросхемы с сопутствующим созданием электрической связи СП и защитой всех элементов компаундом. После сборки происходит герметизация микросхемы через боковые щели каждого уровня.



Рис. 2. Разбивка микросхемы на три части по функциональным характеристикам кристаллов

В результате моделирования, отработки технологии, создания опытных образцов и рабочих образцов микросхем, была получена трехуровневая микросхема MMC3-1, представленная вместе с микросхемой БМС1-1 на рис. 3.



Рис. 3. Микросхемы БСМ-1(слева) и ММСЗ-1

Массогабаритные характеристики двух микросхем приведены в таблице.

Тип микросхемы	БМС1-1	MMC3-1
Площадь подложки, мм ²	400	168
Объем микросхемы, мм ³	1920	810
Вес микросхемы, г	4,35	1,95

Массогабаритные характеристики микросхем

Электрические характеристики микросхемы ММСЗ-1 полностью удовлетворяют ТУ.

На рис. 4 представлен рентгеновская томограмма трехуровневой микросхемы ММСЗ-1. На рис.4 хорошо видны соединения уровней проволоками и достаточное пространство для размещения кристаллов и их разварки.



Проволочная связь уровней

Рис. 4. Рентгеновская томограмма ММСЗ-1

Был проведен термический анализ модели микросхемы MMC3-1 в программе COVENTOR, показавший, что тепловыделение в микросхеме MMC3-1 более равномерно, чем в БМС1-1.

Используя положительный опыт создания микросхемы ММСЗ-1 с использованием

способа соединения уровней в микросхеме СП, была смоделирована и разработана серийная микросхема MMC2-1, которая является аналогом микросхемы БМС1-2, но обладает меньшими объемом и площадью подложки. Хороший результат проектирования микросхемы MMC3-1 и разработки микросхемы MMC2-1 указывает на то, что мы можем подвергнуть подобному разнесению по уровням большинство крупногабаритных микросхем.

В работе также проведены исследования по соединению уровней металлизированными отверстиями в керамике. Преимущества и недостатки данного способа описываются выше. Главное преимущество – малая занимаемая площадь для создания соединения.

Для создания макета была разработана определенная технология, исключающая применение гальваники и каких-либо металлов, кроме алюминия. Основные этапы создания металлизированных отверстий приведены на рис. 5. Изготовленный вариант макета показан на рис. 6. После изготовления макета было подтверждено наличие омического контакта между лицевой и обратной стороной керамической пластины.



Рис. 5. Этапы создания металлизированных отверстий



Рис. 6. Изготовленный вариант макета

Выводы

1) исследованы два способа соединения уровней в многоуровневых микросхемах;

 разработан многоуровневый аналог существующей микросхемы БМС1-1 – ММС3-1 с использованием способа СП и его изготовлению. Показано, что для создания данной конструкции может быть использована существующая технологическая база. Количество уровней ограничено размерами оборудования (5-6 уровней);

3) разработана серийная микросхема ММС2-1;

 разработана технология изготовления металлизированных отверстий в керамике и изготовлен макет. Показано, что для создания данной конструкции может быть использована существующая технологическая база.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ДЕТАЛИ «КРОНШТЕЙН» С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СКВОЗНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ЗД-ПРОЕКТИРОВАНИЯ, РАСЧЕТОВ, ИСПЫТАНИЙ, ПРОИЗВОДСТВА

<u>М. Н. Копченов</u>, В. А. Кручинин, И. А. Одзерихо

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

Введение

В конструкторско-технологической подготовке производства выделяется несколько направлений: проектирование и конструирование, управление и изменение, управление электронным архивом, управление процессами. Эти задачи успешно решаются с помощью комплекса решений для автоматизации конструкторско-технологической подготовки производства в машиностроении – Комплекса решений АСКОН.

В данной работе представлен процесс внедрения «сквозного проектирования» на примере изготовления детали Кронштейн, начиная с этапа проектирования и завершая сдачей готовой продукции.

1. Сквозная технология 3D-проектирования, расчетов, испытаний и производства

Сквозная технология 3D-проектирования, расчетов, испытаний и производства, реализуемая в настоящее время в РФЯЦ-ВНИИЭФ, включает в себя объединение модулей конструкторских и технологических разработок в единое пространство, позволяющее повысить эффективность системы управления предприятием и сократить сроки проектирования и производства изделий.

Сквозная технология используется для:

1) управления структурой изделия;

2) согласования КД и проверки электронных моделей деталей или сборочных единиц;

3) передачи КД и электронных моделей деталей или сборочных единиц на завод ВНИИЭФ;

4) проведения технологической подготовки производства, включая разработку управляющих программ для станков с ЧПУ;

5) отработки конструкции и технологии изготовления деталей или сборочных единиц;

 изготовления, контроля качества и сдачи готовой продукции.

2. Конструкторская часть

Процесс «сквозной» технологии 3D-проектирования, расчетов, испытаний и производства мы рассмотрим на примере изготовления детали Кронштейн.

На этапе конструкторской подготовки производства в «ЛОЦМАН:PLM» определяется состав разрабатываемого изделия в виде перечня основных узлов. При использовании «ЛОЦМАН WorkFlow» автоматизируются ключевые процессы и этапы выполнения подготовки производства.

В САD-системе создаются 3D-модели деталей, сборочных единиц и комплекты конструкторской документации. В итоге в «ЛОЦМАН:PLM» формируется окончательный состав изделия, включающий чертежи и спецификации.

2.1. Этап проектирования

Проектирование Кронштейна начинается с выдачи технического задания руководителем. В свойствах задания прописываются исходные данные для разработки, сроки выполнения и исполнители.

В базе данных «ЛОЦМАН:PLM» создается дерево проекта. Оно включает в себя 3D модель детали, чертеж, а так же название и характеристики материала (рис. 1).

i I Ipoe	кты 🗾 В работе - Папка Крон
Дерево	Карточка
	🔁 - Корпус,
. E	🛅 - Корпус, версия 1
- C	🛅 🍼 - Кронштейн - Кронштейн, версия 1
	🎯 🖉 -Кронштейн - Кронштейн, версия 1
	🛛 🍑 🚅 Сталь 30ХГСА ГОСТ 4543-71
	— 🏹 🔊 🔗 -Кронштейн - Кронштейн, версия 1
	🛛 🥑 🖹 🎤 -Кронштейн - Кронштейн, версия 1
	🌑 😳 🚤 Штифт Зи8х14 ОСТ 95 1480-73, версия 1
· · · ·	🅑 🛅 🏈 - Кронштейн - Кронштейн, версия 1
	🕑 🏥 🏈 - Кронштейн - Кронштейн, версия 1

Рис. 1. Представление Кронштейна в дереве проекта

Далее, с помощью программы «ЛОЦМАН WorkFlow Дизайнер бизнес-процессов» создается бизнес-процесс. Схема бизнес-процесса формируется из компонентов. Компонентами являются:

- участники процесса;

 операции, предусматривающие выполнение ряда действий без участия пользователей;

 условия перехода, определяющие пути прохождения потока заданий в зависимости от обстоятельств;

 связи, которые определяют порядок выполнения работ по бизнес-процессу.

После запуска бизнес-процесса деталь автоматически отправляется на согласование участникам бизнес-процесса.

2.2. Конструкция детали Кронштейн

Для размещения составных частей систем автоматики в ограниченном пространстве был разработан кронштейн. В процессе проектирования было проработано несколько вариантов конструкции, учитывающие возникающие нагрузки при полете, технологичность изготовления, возможности производства, а так же выполнение условий размещения составных частей.

Конструкция детали имеет специальную форму. Такая форма обеспечивает оптимальное размещение составных частей систем автоматики в условиях плотной компоновки изделия.

Кронштейн имеет сквозные пазы, часть из которых служит для оптимизации массово-габаритных характеристики оптимизации монтажа составных частей систем автоматики, а часть служит для вывода элементов системы жгутов.

В связи с плотной компоновкой систем автоматики в изделии, а так же для оптимизации центр массы изделия встал вопрос повышения жесткости конструкции.

Для повышения жесткости в конструкцию детали введены боковые ребра жесткости и ребра жесткости в основании.

Материалом была выбрана сталь 30ХГСАГОСТ 4543-71, параметры закалки НВ 282...354.

Для проведения проверки на прочность модель была передана в отдел прочности, стойкости, программно-методического обеспечения механических испытаний в соответствии со «Схемой» бизнеспроцесса.

3. Расчетная часть

Конструкторская модель кронштейна переходит на этап «Согласование» инженеру-исследователю, который выполняет необходимые расчеты.

Нагрузками для кронштейна являются линейные траекторные перегрузки и перегрузки от воздействия воздушной ударной волны (ВУВ). Расчетным случаем является воздействие максимальных перегрузок от ВУВ.

Основными критериями при расчете на прочность кронштейна являются запас прочности по временному сопротивлению материала кронштейна ($\eta \ge 1, 2$) и не превышение максимальной расчетной пластической деформации допустимых значений ($\epsilon \le 2$ %).

Расчет исходного варианта кронштейна выявил его недостаточную прочность, поэтому конструкция кронштейна подверглась конструктивным доработкам, таким образом, было рассчитано несколько вариантов конструкции. На рис. 2 представлены первоначальная и итоговая конфигурации кронштейна.



Рис. 2. Кронштейн: а – первоначальная конфигурация, б – итоговая конфигурация

После итерационной серии расчетов был определен оптимальный с точки зрения прочности вариант кронштейна, выбран соответствующий материал и проведен окончательный расчет.

На рис. 3 представлена расчетная конечноэлементная модель Кронштейна. Размерность модели не превышает 250 тыс. элементов.



Рис. 3. Расчетная конечно-элементная модель Кронштейна

На рис. 4 представлен Кронштейн с наложенными граничными условиями и направлением нагружения. Граничные условия соответствуют расположению и закреплению Кронштейна в изделии.

Действующая нагрузка задается инерционным полем сил.



Рис. 4. Схема нагружения и закрепления Кронштейна

На рис. 5 представлено расчетное распределение внутренних напряжений от нагрузки в окончательном варианте Кронштейна. На рис. 6 показано поле расчетных пластических деформаций в окончательном варианте Кронштейна.



Рис. 5. Расчетное распределение внутренних напряжений от нагрузки



Рис. 6. Расчетные пластические деформации от нагрузки

Анализ результатов расчетов показал, что максимальные эквивалентные напряжения не превышают величины 675 МПа, коэффициент безопасности составляет $\eta = 1,3$, а максимальные расчетные пластические деформации реализуются в локальных зонах Кронштейна и не превышают величины 1 %.

Таким образом, прочность оптимальной конструкции Кронштейна в худшем расчетном случае по принятым критериям обеспечена.

Когда модель согласована с инженеромисследователем на соответствие всем параметрам, электронная модель (3D, 2D) поступает на «Согласование» с инженерами-технологами завода ВНИИЭФ.

4. Технологическая подготовка производства

Технологическая подготовка производства (ТПП) состоит из следующих этапов:

 передача и согласование конструктивных моделей;

разработка технологического процесса (ТП);

 обработка и создание управляющей программы (УП) в системе «ГеММа-3D;

согласование и утверждение;

изготовление детали на станке с ЧПУ;

 обмер полученной детали и сравнение ее с конструктивной моделью;

- сдача детали на сборку.

Передача и согласование конструктивных моделей

Конструктивная модель передается с использованием системы «ЛОЦМАН:PLM» (рис. 7). Перестроение модели в середину полей допусков проводится в САПР«Компас-3DV15». Если в результате перестроения в конструктивной модели выявляются недочеты по геометрии, происходит нарушение размерных цепочек, то они фиксируются технологом – программистом. Для их устранения конструктивная модель по системе «ЛОЦМАН:PLM» передается обратно конструктору на доработку.

Данный процесс повторяется до тех пор, пока все недочеты и ошибки не будут устранены.Таким образом, использование системы «ЛОЦМАН:PLM» позволяет быстро осуществлять обмен данными и внесение изменений, согласование между подразделениями. Тем самым, ускоряется окончательный выпуск качественного КД.

Разработка технологического процесса

Инженер-технолог завода ВНИИЭФ получает задание на проведение ТПП от начальника технологического бюро. На вкладке приложения прикреплены файлы ДСЕ, на которые требуется провести ТТП. Принимает задание в работу. По связи переходит в дерево проектов.

Технолог запускает модуль «ЛОЦМАН:PLM» и создает ТП на детали сборочной единицы (ДСЕ), после чего автоматически создается файл (.vtp) в который передается информация из КД (чертеж, модель, основной материал). Далее технолог разрабатывает ТП детально (рис. 8), производит расчет заготовки. ТП создается с помощью универсальнотехнологического справочника, содержащего всю номенклатуру технологических данных (цеха, участки, оборудование, оснастка, режущий и мерительный инструмент, вспомогательные материалы и т.д.), который в процессе работы постоянно наполняется, тем самым аккумулируя в себе базу знаний.



Рис. 8. Создание ТП

Обработка и создание управляющей программы в системе «ГеММа-3D

При механической обработке изделий широко используются станки и комплексы с ЧПУ. Объем работ на станках с ЧПУ на заводе ВНИИЭФ постоянно возрастает. Это связано как с повышением эффективности производства, так и с тем, что иными способами изготовить современное металлоемкое изделие не представляется возможным.

Основополагающим понятием в технологии обработки деталей на станках с ЧПУ является следующее: геометрическая схема расчета управляющей программы должна строго соответствовать среднему значению полей допусков всех размеров деталей, поскольку в УП все координаты, определяющие геометрию изготавливаемой детали, задаются от одной точки (ноля программы). Используя это правило, все конструкторские базы приводятся к единой технологической базе (нолю программы).

Для работы технологам – программистам завода ВНИИЭФ необходимы модели, у которых имеется возможность работы с допусками в 3D-модели и возможен пересчет размеров модели в середину полей допусков. Неоднократное обращение к разработчику программного обеспечения ЗАО «АСКОН» о необходимости проведения изменений дали положительный результат и в новой версии САПР «Компас-3DV14»были выполнены эти требования.

В процессе тестирования данного продукта на полигоне РФЯЦ-ВНИИЭФ были выявлены новые замечания. Основное замечание заключалось в том, что в формате IGES «Компас -3DV14»сохранял и переносил в систему «ГеММа-3D» только 3D-поверхности модели. Для полноценной работы технологупрограммисту необходима также 2D-геометрия модели (точки, прямые, дуги, 2D-кривые), которая наиболее востребована (~85–90 %) и является основой для создания управляющей программы. Данное замечание, выдвинутое заводом ВНИИЭФ в процессе тестирования, было устранено в «Компас-3DV15», где появилась возможность сохранять и передавать в формате IGES не только 3D-поверхности, но и 2D-геометрию модели.

Таким образом, конструктивная модель обрела необходимые свойства для полноценного использования ее при создании программ для станков ЧПУ.

После получения задания на разработку УП технолог-программист приступает к разработке и отработке УП.

Выбор последовательности и стратегии обработки конструктивной модели происходит после ее анализа и изучения технологом-программистом в системе «ГеММа-3D».

Поверхности и геометрия модели являются основой для создания обрабатываемых контуров в системе «ГеММа-3D».На их основе создаются необходимые ограничения в обработке, строятся подходы и отходы инструмента и задаются необходимые технологические параметры обработки (рис. 9), после чего происходит формирование прохода инструмента по обрабатываемому контуру.



Рис. 9. Задание параметров для прохода

В дальнейшем проходы формируют УП на обработку детали, которая выдается в инвариантном коде понятная станку с ЧПУ.

Разработанные УП прикрепляются к заданию и появляются в системе «ЛОЦМАН:PLM», откуда файлы УП выгружаются в информационную систему ИСУП-1.

Согласование и утверждение

После разработки ТП технолог завода ВНИИЭФ создает задание для отдела нормирования.

Инженер по нормированию труда, открывает ТП в инструменте «Вертикаль» и выполняет нормирование операций, после чего операция пронормирована.

Далее ТП уходит на согласование и утверждение, после чего принимает состояние «Утвержден» (рис. 10).



Рис. 10. ТП в состоянии «Утвержден»

Как только ТП переведен в состояние «Утвержден», то в системе нажимаем кнопку завершен и тем самым сообщаем непосредственному начальнику о выполнении задания. Технолог адресует задание архивариусу. ТП отправляется в электронный архив.

В САПР ТП «Вертикаль» технолог формирует комплект технологической документации и выводит на печать.

Изготовление детали на станке с ЧПУ

Оператор станка ЧПУ получает от мастера участка задание на изготовление Кронштейна вместе с комплектом технологической документации. По системе ИСУП-2 в систему станка ЧПУ оператор закачивает необходимые для изготовления Кронштейна УП.

Так как Кронштейн имеет сложную геометрическую форму и технологию изготовления, то его обработку произведем на пяти осевом обрабатывающем центре, который позволяет произвести полное изготовление всего за два установа.

Обмер полученной детали и сравнение ее с конструктивной моделью

Операции контроля с использованием координатно-измерительных машин (КИМ) при написании ТП назначаются технологами все чаще. В основном, КИМ-1000 применяется для контроля деталей сложной пространственной конфигурации, размеры и параметры которой долго, затруднительно или просто невозможно контролировать с использованием стандартного мерительного инструмента.

Шесть степеней свободы рабочего органа позволяют вести высокопроизводительное и точное измерение сложных поверхностей с минимальным количеством изменений положения детали, применяя минимальное количество оснастки.

После изготовления Кронштейна проводится аттестация УП. Конструктивная модель является исходными данными для всего измерительного процесса. С помощью данной модели в системе «ГеММа-3D» инженером-программистом КИМ проводит анализ конструктивных особенностей детали. Он определяет количество установов детали для обмера в рабочем пространстве КИМ. После анализа и подготовке детали к измерению инженер КИМ приступает к разработке УП для обмера Кронштейна с помощью макропрограмм в системе «ГеММа-3D» (рис. 11).



Рис. 11. Разработка УП для обмера в системе «ГеММа-3D»

Непосредственно сам процесс измерения выполняется в рабочей зоне КИМ измерительным щупом. Для этого, согласно намеченной стратегии обмера, инженер-программист КИМ крепит деталь на столе КИМ, выполняет настройку системы координат детали ручным способом согласно конструкторским базам и выполняет обмер по заранее подготовленной программе (рис. 12).



Рис. 12. Обмер Кронштейна по программе

По УП происходит касание всех измеряемых поверхностей поверяемой детали для получения массивов точек обмера, которые с помощью специальных программ (макропрограмм) обрабатываются, осуществляется процесс анализа и сравнения изготовленной детали с конструктивной моделью в системе «ГеММа-3D».

Если в результате сравнения деталь не имеет отклонений от конструктивной модели, то она является годной, программы считаются аттестованными и в дальнейшем возможно изготовление Кронштейна без отклонений. Если имеются отклонения, то они анализируются, выявляется причина и УП корректируются технологом, а затем проходят отработку и аттестацию вновь.

Конечным этапом обмера детали является формирование отчета об измерении с выводом всех геометрических параметров детали и передачи его контролеру ОТК, на основании которого он принимаем решение о годности. Данный метод контроля позволяет быстро и эффективно анализировать геометрию и размеры изготовленного Кронштейна и при выявлении недочетов указать на них и принять меры по их устранению на разных этапах изготовления.

Сдача детали на сборку

После проверки и получения результата контролер ОТК ставит печать в сопроводительном документе о годности детали. Кронштейн упаковывается и отправляется на дальнейшую сборку в сборочный цех.

Данные о жизненном цикле изделий остаются в системе «ЛОЦМАН:PLM».

Заключение

На примере «сквозного» изготовления Кронштейна мы рассмотрели возможность использования современных информационных систем, как еще одного нужного инструмента, позволяющего облегчить труд специалистов. Однако, принятие сложного творческого решения о методах проектирования и изготовления лежит на специалистах.

В результате использования современных информационных систем сократилось время проектирования и согласования детали, в среднем, на 2 недели за счет:

 исключения распечатки, согласования и рассылки КД на бумажном носителе;

 исключения проведения извещений об изменениях КД на бумажном носителе;

 уменьшения времени, затраченного на подготовку производства.

Необходимо отметить, что внедрение программного обеспечения комплекса решений, может проходить в более короткие сроки и большим эффектом, если:

актуализировать версии САПР «КОМПАС» одновременно во всех подразделениях. Это приведет к единообразию подходов в создании информации

в процессе проектирования, в методах обработки, хранения и представления информации;

 – сотрудники компании АСКОН будут работать с сотрудниками РФЯЦ-ВНИИЭФ в тесном контакте непосредственно на рабочих местах.

Литература

1. Технологичность конструкций / Под ред. С. А. Ананьева и В. И. Купровича. – М.: Машиностроение, 1969. 424 с.

2. Косилова А. Г. Справочник технологамашиностроителя. В 2-х т. Т. 1. 5 изд. – М.: Машиностроение-1, 2003. 912 с.

3. Балабанов А. Н. Краткий справочник технолога машиностроителя. – М.: Издательство стандартов, 1992. 464 с.

4. Координатные измерительные машины и их применение. / Под ред. А. А. Гапшиса и др. – М.: Машиностроение, 1988. 328 с.

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ВИБРАЦИЙ КОНСТРУКЦИИ, ВЫЗВАННЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИМИ ИСТОЧНИКАМИ

<u>Д. А. Куликов</u>, А. И. Патрушева, М. Ю. Гантман, Е. И. Шмелев

АО «ОКБМ Африкантов», г. Н. Новгород

Введение

Гидродинамические силы, возникающие при обтекании потоком жидкости поверхностей конструкций реакторных установок, приводят к вибрации конструкций. В ряде случаев, например, для пучка труб теплообменного оборудования, топливных сборок, подобные силы могут неблагоприятно сказываться на прочности и усталостной долговечности конструкций. Как следствие, на этапе проектирования данных конструкций целесообразно проводить численные расчеты гидродинамики и вибрации.

В последнее время, с развитием CFD расчетов появились возможности детального изучения процессов обтекания с численными оценками гидродинамических сил, действующих на конструкцию. Решение связанной задачи гидродинамики потока и колебаний конструкции позволит выполнять оптимизацию конструкции, направленной на снижение виброактивности оборудования.

В настоящем докладе приведены результаты расчетно-экспериментальных исследований вибрации на простой геометрической модели плохообтекаемого тела, позволяющей максимально использовать возможности перспективных систем измерений и визуализации потока.

1. Конструкция плохообтекаемого тела. Принципиальная схема испытательного стенда

Для верификации связанных расчетов гидродинамики и вибрации предлагается следующая конструкция плохообтекаемого тела (рис. 1). Конструкция тела представляет собой полый металлический цилиндр диаметром 7,1 мм с толщиной стенки 0,3 мм. Длина цилиндра – 190 мм. Внутренняя полость цилиндра используется для уменьшения собственной частоты тела, а так же для расположения миниатюрных акселерометров, применяемых для измерения вибрации тела. Внутреннее расположение акселерометров является необходимым условием для того, чтобы не изменялась гидродинамика течения в окрестности тела.

Тело размещалось в прямоугольном канале циркуляционной трассы стенда, через которую был организован поток рабочей среды. В канале испытываемое тело имело одну точку закрепления снизу. Закрепление было жестким.



Рис. 1. Конструкция плохообтекаемого тела. Схема расположения точек измерений вибрации

Принципиальная схема стенда приводится на рис. 2.

Стенд состоит из циркуляционной петли с насосом, систем измерения статического давления, пульсаций давления и виброускорений. Изменение расхода обеспечивалось за счет изменения частоты вращения насоса с помощью преобразователя частоты. В качестве рабочей среды стенда использовалась вода. Расход рабочей среды варьировался от 1 до 20 м³/ч.





В процессе испытаний регистрировались зависимости виброускорений и пульсаций давления от времени. При измерениях был использован следующий комплект аппаратуры:

акселерометры (вибропреобразователи) АР19 фирмы «ГлобалТест»;

- гидрофоны типа 8103 фирмы «В&К»;

– многоканальный программно-аппаратный комплекс LMS SCADAS Mobile SCM;

 портативный компьютер со специализированным программным обеспечением.

Вибропреобразователи располагались в точках *1* и 2 во внутренней полости тела в направлениях перпендикулярных оси тела (в направлениях *X* и *Y*).

Для проведения исследований гидродинамики потока с использованием бесконтактных оптических методов прямоугольный канал, в котором был установлен цилиндр, изготавливался из оргстекла.

Исследования гидродинамики течения осуществлялось с помощью метода измерения полей скоростей, основанного на технологии лазерной подсветки и видеосъемки перемещений специальных частицтрассеров, находящихся в исследуемом потоке (метод PIV измерений). В качестве лазерной системы применялась система DTL-413, с высокоскоростной камерой Fastec HiSpec 5. Подсветка трассеров в требуемом сечении осуществлялась с помощью лазерного «ножа».

2. Результаты исследований гидродинамики потока в окрестности тела

Для численного определения вибрации тела с консольным закреплением на первом этапе проводился CFD расчет обтекания тела. Геометрия канала с цилиндром, представлена на рис. 3.

Рис. 3. Геометрическая модель канала

СFD расчет выполнялся в предположении отсутствия влияния колебаний тела на гидродинамику потока. В качестве модели для описания турбулентности рассматривалась LES модель. Время расчета составило порядка 2 с, временной шаг – 0,0001 с. Сетка содержала порядка 7 млн. элементов.

В результате расчета были вычислены поле скорости в непосредственной близости от исследуемого цилиндра, а также поле давления на поверхности цилиндра и канала. На рис. 4 и рис. 5 представлены профили скорости за цилиндром, полученные расчетным и экспериментальным (с помощью метода PIV) путями при расходе 8 м /ч. Из рис. 4 и рис. 5 видно, что область с максимальной скоростью потока находится в зазоре между цилиндром и стенкой канала. За испытываемым телом прослеживается структура вихревого потока. Поле скорости, полученное двумя способами, имеет удовлетворительную сходимость.



Рис. 4. Мгновенное поле скорости жидкости, полученное методом PIV измерений



Рис. 5. Мгновенное поле скорости жидкости, полученное с помощью CFD расчета

Также были построены спектры пульсаций абсолютной скорости в точке за цилиндром (см. рис. 6, 7). На спектрах можно выделить частоту срыва вихрей, возникающую при обтекании цилиндра. В расчете при расходе 8 м³/ч данная частота равна 15 Гц, в эксперименте – 13,3 Гц. Разница между экспериментальным и численным значениями может быть объяснена достаточно большим шагом по частоте. Амплитуды пульсаций скорости на данных частотах имеют близкое значение.









Рис. 7. Спектр пульсаций скорости в точке за цилиндром, полученный при помощи CFD расчета

3. Результаты численного расчета вибрации от гидродинамического воздействия

Конечно-элементная модель для расчета вибрации состояла из тетраэдров. Общее количество структурных элементов – порядка 100 тыс. элементов.

Численный расчет показал, что собственная частота (СЧ) цилиндра в канале с учетом воды составила 69 Гц. Закрепление цилиндра в канале моделировалось как абсолютно жесткое. Результат экспериментального определения собственных частот, полученных при искусственном возбуждении тела на стенде, приводится на рис. 8. Значение первой собственной частоты цилиндра составило 71 Гц, что на 2 Гц выше расчетного значения.

Необходимо отметить, что под действием потока воды колебания конструкции преимущественно происходят на СЧ (рис. 8). На частоте 71 Гц форма колебаний имеет преимущественно изгибный характер с максимальными уровнями вибрации в точке 1. Динамика изменений уровней виброускорений при увеличении расхода с 2 до 10 м³/ч приводиться на рис. 9. Как следует из рисунка, увеличение расхода сопровождается ростом уровней вибрации на собственной частоте. Зависимость среднеквадратических значений амплитуды виброускорений в полосе частот от 60 до 80 Гц в точке *1Y* от расхода рабочей среды приведена на рис. 10. Необходимо отметить, что для данной конструкции плохообтекаемого тела на расходе 10 м³/ч имеет место резкое увеличение амплитуды вибрации, что, по-видимому, связано с режимом синхронизации гармоники частоты срыва вихрей с собственной частотой цилиндра. Начиная с расхода 10 м³/ч, в спектре пульсаций давления (рис. 11) присутствует частота, значение которой совпадает с собственной частотой испытываемого тела. Следствием синхронизации является существенное увеличение составляющей нестационарной гидродинамической силы на собственной частоте тела и увеличение виброускорений и виброперемещений тела.



Рис. 8. Спектр уровней в иброускорений в точке 1Y при расходе 9 м³/ч и спектр собственных частот



Рис. 9. Спектры уровней виброускорений в точке 1Y при расходах 2, 4, 6, 8, 10 м³/ч



Рис. 10. Зависимость среднеквадратических значений амплитуды виброускорений в полосе частот от 60 до 80 Гц в точке 1У



Рис. 11. Спектр среднеквадратических пульсаций давления в точке за телом

Полученные в результате CFD расчетов пульсации давления на поверхности цилиндра и корпуса канала использовались в качестве нагрузки для численного расчета вибрации. В качестве примера на рис. 12 приводится поле давления. Спектр пульсаций давления, полученный расчетным путем при 8 м³/ч, в точке на цилиндре представлен на рис. 13. Расчет вибрации проводился в физических координатах в частотной области. Преобразование Фурье выполнялось на этапе передачи данных с CFD сетки на структурную сетку. Данные из узла гидродинамической сетки передавались в ближайший узел, либо несколько узлов структурной сетки. Применяемый в работе метод реализован в специализированном программном обеспечении.



Рис. 12. Распределение давления при обтекании модели тела с консольным закреплением, полученное путем CFD расчетов при расходе 8 м³/ч



Рис. 13. Спектр среднеквадратических пульсаций давления в точке на поверхности тела

Спектры виброускорений, полученные экспериментальным и расчетным путями для расхода рабочей среды 8 м³/ч изображены на рис. 14.



Рис. 14. Спектр уровней виброускорений в точке 1У при расходе 8 м³/ч, полученный расчетным и экспериментальным путями

При низких расходах рабочей среды при условии отсутствия синхронизации частоты срыва вихрей с собственной частотой тела результаты сравнения численных расчетов с экспериментальными данными свидетельствуют об удовлетворительной сходимости. Дополнительная верификация структурной модели, учитывающей реальные условия закрепления цилиндра в канале, позволит улучшить сходимость в низкочастотной области.

Необходимо отметить, что рассматриваемый в работе способ проведения численного расчета вибрации не позволяет выполнить оценки колебаний цилиндра в режиме синхронизации, сопровождающейся взаимным влияниям потока рабочее среды на динамику конструкции.

Выводы

В настоящей работе приведены результаты расчетно-экспериментальных исследований вибрации на простой геометрической модели плохообтекаемого тела. Рассматриваемая конструкция тела обеспечила эффективное возбуждение колебаний поперечным потоком и позволила максимально использовать возможности перспективных систем измерений.

Первые результаты численных расчетов колебаний модели, вызванных потоком, показывают удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными при относительно низких расходах рабочей среды. Дополнительная верификация структурной модели, учитывающей реальные условия закрепления цилиндра в канале, позволит улучшить сходимость в низкочастотной области.

Необходимо отметить, что применяемый в работе метод численного расчета вибрации под действием потока справедлив для режимов с отсутствием синхронизации.

Полученные данные могут быть использованы для дальнейшей верификации связанных расчетов при описании вибрации пучка трубок, обусловленной обтеканием потока в теплообменном оборудовании, топливных сборках.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПТРОНОВ В РАДИАЦИОННО-СТОЙКОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ

<u>В. А. Левцова</u>, В. В. Кошкин, А. В. Овсов, М. К. Смирнов

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

Развитие атомной промышленности и все большее распространение различных техногенных источников ионизирующих излучений (ИИ) требует особого внимания к проблемам влияния ИИ на компоненты и узлы радиоэлектронной аппаратуры (РЭА).

Одной из основных задач, возникающих при конструировании РЭА, является необходимость прогнозировать уровень радиационной стойкости (РС) на ранних этапах разработки для обеспечения ее надежного функционирования в сложных условиях. Зачастую можно получить только некоторую граничную оценку, которая, как правило, не является полностью достоверной. Для достоверного прогнозирования уровня РС РЭА обычно требуется проведение дополнительных исследований влияния ИИ на параметры и характеристики содержащихся в ней схемотехнических узлов и ЭРИ.

Доклад посвящен исследованию влияния ИИ на различные типы оптронов и использованию их в радиационно-стойкой РЭА. Актуальность данной работы обусловлена тем, что современные оптроны широко используются в РЭА особого назначения и являются сложными устройствами, которые изготавливаются по гибридным технологиям. Они содержат различного рода полупроводниковые материалы, диэлектрические материалы, а из металлов выполняются корпусные конструкции и контакты. Поэтому реакция оптронов на воздействие ИИ носит более сложный характер, чем реакция отдельных, содержащихся в них материалов и конструктивных элементов.

Решению этих вопросов были посвящены исследования электронных узлов, содержащих оптроны, на стойкость к воздействию гамма-нейтронного излучения. Поскольку основным назначением оптронов является передача сигналов между гальванически развязанными узлами РЭА, в качестве основного объекта исследований были выбраны импульсные источники вторичного электропитания (ИВЭП), в типовых схемах которых оптроны используются в цепях обратной связи. Структурная схема такого ИВЭП приведена на рис. 1.

Рассмотрим основные физические эффекты, возникающие при взаимодействии ионизирующего излучения с веществом, которые требуется учитывать в процессе разработки радиационно-стойкой РЭА. К ним относятся смещение атомов из узлов кристаллической решетки (дефекты смещения) и генерация электронно-дырочных пар (ионизация). В общем случае частицы, проходя через вещество, отдают свою энергию на ионизацию и на смещение атомов. Если частица передала веществу довольно значительную энергию, то возможно образование целой области разупорядочения, или кластера дефектов. Этот процесс наиболее вероятен при воздействии тяжелых частиц (протонов, нейтронов) с достаточно высокой энергией (согласно стандарту, например, количество дефектов, возникающих от частиц с энергией менее 100 кэВ, считается незначительным). В процессе накопления подобных дефектов сначала происходит деградация параметров и характеристик как отдельных ЭРИ, так и РЭА в целом. Потом возникают катастрофические отказы отдельных, наиболее чувствительных ЭРИ. На этих этапах еше возможно обшее сохранение работоспособности РЭА, если вышеперечисленные моменты были учтены при ее конструировании, что будет рассмотрено ниже. Дальнейшее облучение приводит к лавинному нарастанию количества отказов ЭРИ, полной потери функционирования РЭА, а, начиная с некоторых уровней, и к разрушению конструкционных материалов.



Рис. 1. Структурная схема ИВЭП

При взаимодействии легких частиц (электронов и квантов электромагнитного излучения) с веществом обычно происходит процесс ионизации. Особенность данного процесса заключается в том, что в полупроводниках, например, ионизация возможна уже при энергиях порядка 0,1 эВ, что соответствует ближнему ИК-диапазону, который используется в оптронах для передачи сигналов. А основное отличие высокоэнергетических частиц заключается в их повышенной проникающей способности.
Процесс ионизации приводит к накоплению объемного заряда, что, при незначительных уровнях облученности, может вызвать временную потерю работоспособности (ВПР) включенной РЭА. При этом через некоторое время после воздействия работоспособность РЭА восстанавливается. Необходимо учитывать, что ВПР РЭА, как правило, существенно превышает ВПР отдельных ЭРИ.

При значительных уровнях облученности деградация параметров и характеристик, приводящая к катастрофическим отказам, объясняется в основном нарушением изолирующих свойств материалов. В частности, одной из основных причин чувствительности МДП-структур к воздействию гамма-излучения является пробой подзатворного диэлектрика избыточным зарядом, накопленным в смежных областях.

Испытания ИВЭП на стойкость к воздействию гамма-нейтронного излучения проводились на моделирующей установке (МУ) при двух различных уровнях. Первый уровень воздействия соответствовал 1,3*1Ус по характеристике 7.И₁ и 1Ус по характеристике 7.И₂, а второй - 2*1Ус по характеристике 7.И₁ и 2,5*1Ус по характеристике 7.И₂. Графики выходных напряжений ИВЭП для соответствующих уровней воздействия приведены на рисунках 2-5. Проведем анализ полученных результатов.

После однократного воздействия на модуль очень короткого (порядка единиц мс) гамма-нейтронного импульса с первым уровнем воздействия, формируемого на МУ (рис. 2, 3), работоспособность ИВЭП сохраняется. Однако, в зависимости от типа примененного оптрона в цепи обратной связи ИВЭП, вид диаграммы выходного напряжения несколько отличается.

На рис. 2 приведена диаграмма выходного напряжения ИВЭП с оптроном 249КП8У. На ней можно выделить три характерных участка. На первом участке наблюдается потеря работоспособности ИВЭП. На втором участке схема начинает восстанавливаться. Происходит запуск импульсного генератора, однако выходное напряжение возрастает до уровня, превышающего номинальное значение. Это связано с тем, что ВПР оптрона, находящегося в цепи следящей обратной связи, выше, чем ВПР микросхемы импульсного генератора. На третьем участке происходит восстановление работоспособности оптрона, цепь обратной связи замыкается, выходное напряжение восстанавливается до номинального значения.

Следует отметить, что если величина выходного напряжения превышает номинальное значение более чем на 10%, то появляется риск выхода из строя микросхем в подключенных устройствах.

Аналогичная диаграмма для ИВЭП с оптроном 249КП1 приведена на рис. 3. Ее характерным отличием является отсутствие «броска» выходного напряжения, что говорит о существенно меньшем ВПР для данного оптрона.

Следует обратить внимание на то, что оптрон 249КП8У хоть и имеет более высокий уровень стойкости по характеристикам $7.И_1$, $7.И_6$, $7.И_7$, но уровень бессбойной работы (УБР) у него в два раза меньше, чем у 249КП1. Таким образом, если требуется обеспечить именно стойкость (а не прочность) РЭА, то применение оптрона 249КП8У может не дать ожидаемого результата. Как правило, обеспечить УБР и ВПР РЭА лучше, чем у используемых в ней ЭРИ возможно только в случае применения специальных мер защиты, а непосредственно корпуса ЭРИ такую защиту не обеспечивают.

Отказ ИВЭП наблюдается после второго уровня воздействия. Характер отказов для ИВЭП с оптронами 249КП8У и 249КП1 приведен на рис. 4 и рис. 5, соответственно.



Рис. 2. Диаграмма выходного напряжения ИВЭП с оптроном 249КП8У



Рис. 3. Диаграмма выходного напряжения ИВЭП с оптроном 249КП1



Рис. 5. Диаграмма отказа ИВЭП с оптроном 249КП1

Отказ, представленный на рис. 5, когда выходное напряжение возрастает до уровня, существенно превышающего номинальный, говорит о том, что произошел разрыв в цепи обратной связи ИВЭП. Основной причиной такого отказа является выход из строя оптрона.

Разберем подробнее отдельные рекомендации, на которые следовало бы обратить внимание при разработке радиационно-стойких узлов РЭА, содержащих оптроны:

 выбор ЭРИ по стойкости к воздействию ионизирующего излучения;

использование ЭРИ в облегченных электрических режимах;

введение в схему дополнительных защитных компонентов.

Рассмотрим подробнее предложенные рекомендации. По вопросу выбора ЭРИ, прежде всего, необходимо отметить, что согласно рекомендациям стандарта, допускается не проводить радиационные испытания, если уровень стойкости используемых ЭРИ более чем на порядок превышает требования по РС к соответствующему прибору. Особенно необходимость применения ЭРИ, обладающих значительными запасами РС, относится к радиационно-чувствительным узлам и к РЭА, которая должна функционировать во время воздействия ионизирующего излучения. Если во время воздействия излучения РЭА находится в обесточенном состоянии, то вполне достаточно, чтобы уровень стойкости ЭРИ соответствовал требованиям по РС прибора. Подробнее оценка соответствия выбранной номенклатуры ЭРИ требованиям РС РЭА приведена в руководстве.

Вторая рекомендация говорит о том, что при использовании ЭРИ в облегченных электрических режимах можно обеспечить некоторое повышение уровня радиационной стойкости, однако, точно установить, на сколько он повысится, можно только после проведения соответствующих испытаний. Это связано с тем, что ЭРИ испытываются на стойкость к воздействию ионизирующего излучения только при номинальном электрическом режиме, и данная информация приводится в технических условиях (ТУ) на ЭРИ. Связь же между уровнем РС и соответствующими электрическими параметрами ЭРИ, как правило, является существенно нелинейной, что затрудняет определение уровня РС теоретическими методами, путем проведения математических расчетов.

Вообще говоря, приемлемую оценку РС с помощью теоретических методов можно получить только, когда прогнозируемый результат находится внутри исследуемой области, по которой строится соответствующая математическая модель. Если в процессе построения математической модели какие-либо из параметров не были учтены, то они и не могут быть достоверно спрогнозированы с использованием данной модели. В этом случае можно получить только некоторую граничную оценку, которая, как правило, является существенно завышенной. Однако подобный подход в большинстве случаев является приемлемым, поскольку полное исследование влияния на уровень стойкости ЭРИ всех параметров и характеристик значительно увеличивает стоимость радиационных испытаний.

Обычно вопрос о правильности применения ЭРИ в каждой конкретной схеме рассматривается в процессе проведения комплексной оценки эффективности технических решений по обеспечению стойкости РЭА к воздействию ИИ.

Согласно третьей рекомендации в схему необходимо вводить дополнительные защитные компоненты, которые обеспечивают шунтирование основных цепей прохождения сигнала и защищают их от радиационных токов критического уровня, приводящих к катастрофическим отказам различных ЭРИ. Основным требованием к таким защитным компонентам является минимизация их влияния на функционирование схемы в нормальных условиях. В качестве простейших вариантов подобной защиты следует упомянуть использование диода в обратном включении для шунтирования чувствительных входных цепей и токоограничивающего резистора в цепях питания КМОП микросхем. В цифровых и микропроцессорных схемах к защитным компонентам могут быть так же отнесены устройства перезапуска, которые обеспечивают восстановление нормального функционирования прибора после сбоя в момент воздействия ионизирующего излучения.

Особенно следует отметить важность схемотехнического конструирования РЭА с учетом поведения ЭРИ под воздействием излучения, а также с учетом взаимовлияния ЭРИ друг на друга. Пренебрежение данной рекомендацией может привести к снижению уровня PC РЭА ниже стойкости отдельных компонентов.

В результате проведенных испытаний были получены данные по поведению электронных узлов с оптронами под действием ионизирующего излучения. Эти данные позволяют более точно оценивать и прогнозировать стойкость электронных схем с использованием оптронов, а также расширить область их применения в радиационно-стойкой аппаратуре.

ПРОГРАММНО-АППАРАТНОЕ РЕШЕНИЕ ПРОГРАММАТОРА МИКРОКОНТРОЛЛЕРА СЕРИИ 1986ВЕ9х КОМПАНИИ «МИЛАНДР»

<u>Г. А. Лехнер</u>, Г. М. Кузякин, Ю. Н. Викулов

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

Введение

В настоящее время при разработке и отладки электронных изделий все большее применение находят программируемые интегральные микросхемы – микроконтроллеры (МК), программируемые матрицы (ПЛМ). Данные типы микросхем поддерживают инструмент внутрисхемного программирования, что позволяет загружать или изменять содержимое программного кода после их монтажа на поверхности печатной платы. Существует два способа программирования интегральных микросхем, при помощи системы внутрисхемного программирования от производителя интегральных схем (Altera, Xilinx и др.) и любым JTAG¹-тестером. Систему программирования упрощенно можно представить из следующих компонентов:

целевой объект программирования МК или ПЛМ;

программная среда;

 адаптер связи ПЭВМ пользователя с целевым объектом программирования.

Схематично система представлено на рис. 1



Рис. 1. Схема программирования целевого устройства

При необходимости программирования нескольких типов интегральных микросхем или микросхем от разных производителей, необходимо несколько программных сред, и возможно, несколько адаптеров. Решения от производителя, однозначно, являются коммерческими и как следствие требуют приобретения лицензий. Производственная необходимость выделения функционала процедур загрузки программного кода целевого устройства программирования (функции программатора) в свою программную среду, при наличии открытого (free hardware) адаптера, побудило нас к поиску собственного программноаппаратного решения.

В общем виде поставленную задачу можно сформулировать следующим образом: необходимо найти универсальное программно-аппаратное решение с возможностью программирования отечественных микросхем:

1) микроконтроллеров фирмы «Миландр» серии 1986ВЕх по интерфейсу JTAG;

2) микроконтроллера 1882ВЕ53У по интерфейсу SPI;

 загрузочного ПЗУ 5576РС1 для конфигурирования ПЛИС 5576ХС1Т по интерфейсу JTAG.

В докладе рассматривается решение поставленной задачи в части программирования микроконтроллеров фирмы «Миландр» (г. Зеленоград).

В настоящее время российский рынок элементной базы предлагает отечественные аналоги иностранных микроконтроллеров, которые по техническим характеристикам весьма привлекательны для использования в разработках ВПК. В частности, российская компания ЗАО «ПКК Миландр» выпускает микросхемы серии 1986ВЕ9хдля применения в электронной аппаратуре. Микроконтроллеры серии 1986ВЕ9х на ядре Cortex-M3 имеют 32-битную микропроцессорную архитектуру с сокращенным набором команд (RISC) фирмы ARM Limited, а также обладают расширенными диапазонами температур и напряжений питания, повышенной устойчивостью к механическим воздействиям – ударам, вибрации, значительным ускорением. Микроконтроллеры работают на тактовой частоте до 80 МГц и содержат 128 кбайт встроенной энергонезависимой памяти программ флеш типа и 4 кбайт ОЗУ. Микроконтроллеры серии 1986ВЕ9химеют широкий набор периферийных интерфейсных блоков, таких как USB, CAN, UART, SPI и I2C и последовательный отладочный интерфейс JTAG/SW [1].

При выборе адаптера, наиболее подходящим для программирования МК является переходник USB-JTAG, поскольку современные ПЭВМ оснащены портами USB 2.0. Согласно поставленной задаче адаптер USB-JTAG рекомендован для отладки и прошивки ПЗУ микроконтроллера фирмы «Миландр» серии 1986ВЕх. При подключении к микроконтроллеру JTAG адаптера внешняя программная среда может переключать микроконтроллер в отладочный режим. В данном режиме можно записывать, считывать и стирать внутреннюю флеш память программ.

¹ Когда речь идет о JTAG, прежде всего, подразумевается стандарт: IEEE 1149.1-2001 Test Access Port and Boundary-Scan Architecture (Стандарт IEEE 1149.1-2001 Порт тестового доступа и Архитектура Граничного сканирования).

В качестве USB-JTAG адаптера решено использовать недорогой FTDI программатор «Марсоход» (технический проект Open Source) (рис. 2). Производителем программатора является ООО «Инпро Плюс» (г. Таганрог).



Рис. 2. FTDI программатор «Марсоход»

Программатор построен на микросхеме FT2232H компании FTDI. Применение микросхемы FT2232H дает разработчику простой способ реализации высокоскоростного моста между USB и доступными типами управляющих интерфейсов вводавывода. Микросхема FT2232H позволяет реализовать следующие возможности:

преобразование одного подключения USB
в два последовательных или параллельных порта
в различных комбинациях;

– две системы Multi-Protocol Synchronous Serial Engine (MPSSE), упрощающие разработку с поддержкой синхронных последовательных протоколов JTAG, I2C, SPI [2];

Для работы синхронных последовательных протоколов шин типа JTAG, SPI режим MPSSE выбран в качестве рабочего режима микросхемыFT2232H при решении поставленной задачи. Немаловажным фактором является и наличие в свободном доступе драйверов от FTDI Virtual Com Port (VCP) для формирования виртуального COM-порта и Direct (D2XX)драйвер прямого доступа к микросхеме FT2232H через библиотеку DLL [3]. В большинстве случаев это устраняют необходимость разработки собственного драйвера USB для операционной системы.

Целевые устройства программирования определены условиями поставленной задачи, адаптер связи ПЭВМ пользователя с устройством программирования так же определен. Для реализации собственной системы программирования необходима программная среда.

Программная среда

Наличие в свободном доступе драйвера прямого доступа D2XX, а также исходного кода API пользовательских библиотек синхронного последовательного протокола JTAG (ftcjtag.dll) и протокола SPI (ftcspi.dll) и подтолкнуло нас на разработку собственного программного обеспечения программатора. Так как это наше первое знакомство с областью аппаратного программирования и сделан упор на реализацию функционала разрабатываемой программы, тип программы намеренно был выбран, как консольное приложение Win32.



Рис. 3. Блочная структура программы

Также намеренно выбрана модульная конструкция построения программы. Разработанный программный код целевого объекта программирования сосредоточен в отдельных модулях – динамических библиотеках. Предполагаемый состав программы представлен на Рис. 3. Завершена разработка модуля JtagMK – программирование микроконтроллера серии 1986ВЕ9х по интерфейсу JTAG. Данный модуль совместно с программными модулями FT2232HPro, Marsohod Board, ftcjtag и драйвером ftd2xx являются компонентами программы программатора микроконтроллеров фирмы «Миландр», а в комплекте с USB-JTAG адаптером «Марсоход» – собственным аппаратно-программным решением.

Предназначение модуля JtagPL – программирование логической схемы 5576ХС1Т по интерфейсу JTAG. Разработка модуля находится в завершающей стадии разработки и тестирования.

Назначение модуля SpiMK – программирование микроконтроллера 1882BE53 по интерфейсу SPI (в стадии разработки).

Как видно из рис. 4 пользовательский интерфейс поддерживает минимальный, но достаточный набор команд программирования целевого устройства, а именно:

- запись данных из внешнего файла формата IntelHex (-w);

 верификация записанных данных с данными внешнего файла (-v);

 – чтение данных с записью их во внешнем файле в формате IntelHex (-r);

– стирание данных (-е).

Несколько слов об организации информационного обмена при обращении к встроенной памяти микроконтроллера серии 1986ВЕ9х. Информационный обмен проходит в два этапа, вначале передается код инструкции, затем данные. Порт JTAG микроконтроллеров Миландр оснащен блоком отладки, реализующим протокол ARM Debug Interface v5, где регистр IR (instruction register) блока TAP имеет 4битный размер и принимает следующие значения [4]:

d:\Tem	p\FT2232HPro>FT2	232HPro.exe
=⊤2232i	HPro – Программа	тор_МК 1986ВЕ2 (Миландр).
Версия	программы : 1.0	.0.0
Старт і	программы : 05.0	8.2016 08:01:33
	FT2232HPro	
- lash r	memory MK :	
	FT2232HPro -v:j	tag:mk [Path]file.hex
	FT2232HPro -e:j	tag:mk pagestart count
	FIZZJZHPPO -r:j	tag:mk address count [Path]Tile.nex
	11223211110 H .J	
Flash r	memory PL:	
	FT2232HPro -v:j	tag:p]:N [Path]file.hex
	FIZZ3ZHPro -e:j	tag:pl:N pagestart count
	FT2232HPro -w:i	tag:pl:N [Path]file.hex
		cagipini L'acil, incluer
Args:		
	file.hex	Code file in HEX format
	pagestart	Address of flash memory start
	count	Count of flash memory
	-v:itao:mk	Verify only for MK
	-v:jtag:pl:N	Verify only for PL device number N
	-e:jtag:mk	Erase count pages MK
	-e:jtag:pl:N	Erase count pages PL device number N
	-r:jtag:mk	Read data to file
	-r.jtag.pl.N	Write data from file
	-w:itao:pl:N	Write data from file to PL device number N
	-version	Print version info
	-h	Print this help message
2200000		
заверше	спис работы прогр	
d•\Tem	n\FT2232HPros	

Рис. 4. Аргументы команд программы

ABORT 0x8 – останов транзакции.

DPACC	0xA	-доступ к регистрам уровня DP		
		(debugport).		
APACC	0xB	-доступ к регистрам уровня		
		MEM-AP (memory access port).		
IDCODE	0xE	-чтение идентификатора микро-		
		схемы.		
BYPASS	0xF	–проброс данных с задержкой		

Регистр IDCODE для микроконтроллера фирмы Миландр 1986ВМ9х имеет следующее фиксированное значение:

на 1 такт.

3128	2712	110
Version = 0x4	Part number = 0xBA00	Manufacturer ID = 0x477

Доступ к встроенной памяти осуществляется через программное взаимодействие с регистрами уровня порта отладки (DP) и регистрами уровня порта доступа к памяти (MEM-AP).Среди регистров уровня MEM-AP есть регистр IDR (0xFC) – идентификатор блока MEM-AP (только чтение), который имеет следующее фиксированное значение:

24 77 00 11	
-------------	--

Данное значение является идентификационным кодом для микроконтроллера 1986ВМ91Т, микро-контроллер 1986ВЕ92У имеет тоже значение.

Только после программного подтверждения приведенных выше идентификационных кодов и переводом памяти в режим программирования (запись кода 0х8ААА5551 в регистр МК EERPOM_KEY) возможно обращение к ячейкам памяти микроконтроллера. Основная память программ в адресном пространстве микроконтроллера начинается с адреса 0x08000000 и имеет страничную организацию (рис. 5)



Рис. 5. Память программ в адресном пространстве микроконтроллера

В режиме программирования основной памяти возможны следующие операции:

- стирание всей памяти;
- стирание страницы памяти размером 4 Кбайт;
- запись 32-х битного слова в память;
- чтение 32-х битного слова из памяти.

Данные операции явились основой для программной реализации интерфейсных функций программатора для микроконтроллеров серии 1986ВЕ9х компании «МИЛАНДР».

Заключение

Задача программирования внутренней памяти микроконтроллера серии 1986ВЕ9х решена. Представленное в докладе программно-аппаратное решение вошло в состав ПО автоматизированного формирования и загрузки в память микроконтроллера исполнительного кода прибора БКА4.



Рис. 6. Схема объединения устройств в JTAG-цепочку

Программирование логической интегральной схемы (ПЛИС) 5576ХС1Т по интерфейсу JTAG находится на завершающей стадии разработки и тестирования. Под программированием ПЛИС понимается процесс конфигурирования, проходящий путем заполнения конфигурационной памяти данными. Одна из схем конфигурирования ПЛИС предполагает наличие загрузочного ПЗУ, в нашем случае это 5576РС1У. Схема объединения устройств, поддерживающих JTAG называется JTAG-цепочкой рис. 6. Загрузочное ПЗУ и микросхема ПЛИС имеют такое объединение.

Осмыслив принцип программирования устройств объединенных JTAG-цепочкой при программировании ПЛИС, этот принцип предполагается распространить и на программирование микроконтроллеров.

Предполагается расширить поддержку форматов файлов входных и выходных данных. Решив поставленную задачу в полном объеме мы получим собственный универсальный программатор с возможностью расширения его функциональных возможностей.

Литература

1. Спецификация микроконтроллеров серии 1986ВЕ9х, К1986ВЕ9х, К1986ВЕ92QС, К1986ВЕ92QI, К1986ВЕ91Н4 [Файл Spec_Seriya_ 1986ВЕ9х.pdf]: ЗАО «ПККМиландр» ТСКЯ.431296.001СП, 2013.

2. DS_FT2232H. – Glasgow G41 1HH United Kingdom: FTDI Chip, 2011.

3. FTDI Drivers Installation guide for Windows XP, Glasgow G5 8QB United Kingdom: FTDI, AN_104, 2008.

4. FTDI_Hi_Speed_USB_To_JTAG_Example, Glasgow: FTDI Chip, AN_129, 2011.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ УСТРОЙСТВА ВЫВОДА И СБОРА ИЗЛУЧЕНИЯ С БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА

Ю. В. Малых, В. В. Шубин

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

Введение

При проведении мониторинга оптических волокон (ОВ) магистральных волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) и разработке мультиплексоров ввода/вывода информации возникает необходимость отвода части мощности оптического сигнала через боковую поверхность одномодового волокна без разрыва передачи сигналов. При этом необходимо отвести достаточную для регистрации с коэффициентом ошибки (BER) не ниже 10⁻⁹ величину мощности сигнала (от минус 30дБм на скорости 40 Гбит/с до минус 55 дБм на скорости 622 Мбит/с) при минимально вносимых в линию дополнительных потерях (0.005-0.1 дБ). При скоростях передачи характерных для современных ВОСП для регистрации сигналов используется схема приемника с квантовым ограничением. Схема состоит из волоконно-оптического усилителя, узкополосного оптического фильтра и приемного устройства на основе pin-фотодиода [1]. Ввод излучения, выведенного через боковую поверхность ОВ, должен осуществляться на входной полюс оптического усилителя, который представляет собой стандартный оптический соединитель.

В научно-технической литературе описывается большое количество устройств вывода сигнала (УВС) с боковой поверхности ОВ на активные площадки фотодетекторов большого размера (миллиметр и более), которые ограничивают скорость передачи на уровне нескольких десятков Мбит/с. Известны также устройства типа «ответвитель - прищепка» [2], которые выводят излучение с изгиба волокна в одномодовое приемное волокно. Но эти устройства не имеют регулировки выводимой мощности и вносят в линию большие дополнительные потери (более 2 дБ). Подробных описаний устройств с малыми потерями и методик расчета их параметров в научно-технической литературе не найдено. Поэтому для решения поставленной задачи было разработано и исследовано собственное УВС. Для этого потребовалось:

выбрать и рассчитать оптическую схему устройства;

 – разработать методику расчета основных характеристик устройства: зависимостей дополнительных потерь и коэффициента передачи от коэффициента вывода излучения;

 по разработанной методике написать программу расчета характеристик устройства; с помощью программы провести расчетную оптимизацию параметров устройства;

 – разработать и изготовить макет устройства по предложенной схеме;

 провести на макете экспериментальные исследования;

- провести верификацию разработанных методик.

Оптическая схема вывода и сбора излучения с боковой поверхности OB

Предлагаемое устройство состоит из двух симметричных частей, которые смещаются относительно друг друга. Оптическая схема каждой из частей представлена на рис. 1 [3]. В схеме зафиксировано положение и радиус изгиба, арегулировка осуществляется за счет изменения длины или, что то же самое, угла изгиба.



Рис. 1. Оптическая схема одной из симметричных частей УВС: 1 – ОВ; 2 – градиентная линза; 3 – иммерсионная среда; 4 – область передаваемого излучения; 5 – изгибная оправа радиусом R_{onp} ; 6 – приемное ОВ; 7 – вектор Умова –Пойтинга, показывающий направление распространения вышедшего излучения; Φ – угол изгиба волокна; Φ_0 – начальный угол изгиба

Вывод излучения из OB осуществляется с помощью переходных потерь, которые формируются на изгибе по малому радиусу R_{onp} вокруг оправы 5. Изгиб осуществляется на начальный угол Φ_0 характерный тем, что вектор Умова – Пойтинга, выведенного из сердцевины OB излучения, достигает защитного покрытия. В этом случае излучение начинает интенсивно выходить за пределы оболочки OB. Φ_0 определяется по формуле, предложенной в патенте [4]:

$$\Phi_0 = \arccos\left[(R + r_c)/(R + r_{o\delta})\right],\tag{1}$$

где R – радиус изгиба волокна; r_c – радиус сердцевины волокна; r_{ob} – радиус отражающей оболочки волокна.

Увеличивая угол изгиба OB, рис. 1, от Φ_0 до Φ , можно регулировать мощность выводимого излучения. Для выхода излучения за пределы защитного покрытия OB, область между волокном *1* и приемным оптическим устройством *2* (ПОУ) заполняется средой *3* с показателем преломления, близким к показателю преломления защитного покрытия OB. В качестве ПОУ используется отрезок одномодового OB *6* с градиентной линзой на переднем торце *2* и стандартным коннектором на втором конце [5].

Так как распространение и выход излучения из OB осесимметричны, то достаточно рассматривать двумерную задачу в плоскости XZ. Для обеспечения максимальной эффективности сбора излучения на приемное оптическое устройство необходимо определить координаты точки его размещения $\Pi(X_{np}, Z_{np})$ относительно точки начала изгиба OB с координатами $H(X_n, Z_n)$, при этом, ось ПОУ должна совпадать с направлением вектора Умова – Пойтинга 7 излучения, выходящего на изгибе OB.

На рис. 2 представлена схема и основные параметры, необходимые для вывода формул расчета координат положения ПОУ. Масштаб на рис. 2 не соблюден, изображена только нижняя от оси часть ОВ. Расчеты будем проводить для наиболее распространенного одномодового ОВ типа SMF-28 фирмы «Corning» на длине волны $\lambda = 1,55$ мкм (см. таблицу).

При изменении угла изгиба от Φ_0 до Φ меняется направление вектора Умова – Пойтинга 2. Юстировку ПОУ целесообразно осуществлять на среднее положение угла $\beta_0 = (\Phi_0 - \Phi)/2$ или осуществлять юстировку ПОУ для нескольких положений. С помощью законов геометрической оптики рассчитывается положение приемного оптического устройства, при котором координаты точки его оптимального положения $\Pi(X_{np}, Z_{np})$ в точке 4 (X_4 , Z_4), а угол расположения ПОУ относительно горизонтальной оси Z: $\theta_{np} = \beta_4$. Методика и результаты расчета подробно описаны в статье [3].

Параметры	OBSMF-28 на	рабочей длине волны	λ = 1,55мкм
-----------	-------------	---------------------	-------------

Наименование структуры ОВ	Радиус, мкм		Показатель преломления, отн. ед.	
сердцевина	r _c	4,15	n _c	1,4504
оболочка	r _{oõ}	62,50	n _{oõ}	1,4447
первое защитное покрытие	<i>r</i> _{13n}	90,00	<i>n</i> _{13n}	1,4786
второе защитное покрытие	r_{23n}	125,00	n_{23n}	1,5300



Рис. 2. Схема вывода излучения через боковую поверхность OB: 1 – ось оптического волокна, 2 – вектор Умова – Пойтинга, показывающий направление распространения вышедшего излучения, 3 – оптическая деталь, *R* – радиус изгиба OB, ϕ_0 – начальный угол изгиба OB, ϕ – угол изгиба OB

Методика расчетадополнительных потерь и коэффициента передачи

Анализ формул и методик расчета дополнительных потерь на изгибе OB, известных из литературы [6–8], показал, что ни одна из них не подходит для описания потерь на начальном участке изгиба OB. Поэтому была разработана собственная методика расчета.

Выход излучения из сердцевины ОВ рассматривается с использованием известного метода конформного отображения (МКО) [9–12], в котором изогнутое ОВ преобразуется в прямое, но с перекошенным профилем показателем преломления. На рис. 3 представлены профили показателей преломления в прямом и преобразованном с помощью МКО ОВ.



Рис. 3. Профили показателей преломления в прямом и преобразованном OB

Расстояние x_0 , на котором эффективный показатель преломления OB $n_{3\phi}$ становится равным преобразованному показателю преломления оболочки n_0 определяет часть интенсивности излучения I_n , которая выходит из сердцевины OB. Далее излучение распространяется по оболочке и при достижении границы раздела отражающая оболочка – первое защитное покрытие покидает OB. Таким образом, полные потери на начальном участке изогнутого OB предлагается вычислять по формуле, имеющей две составляющие:

$$A_{\partial} = -101 \,\mathrm{g} \,(1 - [0, 5 - F(x_0/\omega_0)] \{1 - \exp[-K_{\lambda}R(\Phi - \Phi_0)^2]\}), \quad (2)$$

где $10lg(1-[0,5-F(x_0/\omega_0)])$ – величина потерь излучения в сердцевине OB; 1 – $exp[-K_{\lambda}R(\Phi-\Phi_0)^2]$ – часть излучения, которая выходит за пределы отражающей оболочки на всей длине изгиба $R(\Phi-\Phi_0)$; F(t) – интеграл Лапласа от аргумента $t = x_0/\omega_0$; ω_0 – радиус гауссова луча в сердцевине OB; K_{λ} – эмпирический коэффициент, зависящий от длины волны излучения (для $K_{\lambda = 1,55 \text{ мкм}} = 0,217 \text{ мкm}^{-1}\text{рад}^{-2}$).

Коэффициент передачи излучения с боковой поверхности изогнутого ОВ ПОУ предлагается рассчитывать по формуле:

$$k_n = \eta \gamma \tau,$$
 (3)

где η – эффективность ввода излучения в ПОУ; γ – коэффициент согласования по длине изгиба; τ – коэффициент пропускания оптических материалов и границ раздела сред. Эффективность ввода определяется с помощью известного метода наложения интегралов гауссовых лучей [13]. Эффективность ввода излучения из изогнутого ОВ в приемное ОВ может быть определена как произведения эффективностей согласования гауссовых лучей на каждом из трех этапов преобразования по формуле:

$$\eta = \eta_1 \eta_2 \eta_3, \tag{4}$$

где η_1 – эффективность выхода излучения за отражающую оболочку OB; η_2 – эффективность согласования модовых пятен до и после выхода излучения за отражающую оболочку OB; η_3 – эффективность ввода излучения в градиентную линзу.

В соответствии с выражением из статьи [13], эффективность выхода излучения можно рассчитать по следующей формуле:

$$\eta_1 = 1 - k_0 \exp\{-2x_{\phi}^2 / (r_{o\sigma}^2 + \omega_{\phi}^2)\}, \qquad (5)$$

где $k_0 = 4/(r_{ob}/\omega_{\phi} + \omega_{\phi}/r_{ob})^2$, r_{ob} – радиус оболочки OB, x_{ϕ} геометрически определяется по рис. 4, ω_{ϕ} – радиус гауссова луча, при изгибе OB на угол Φ :

$$\omega_{\phi}^{2} = \omega_{0}^{2} \{ 1 + [(\lambda R t g \Phi) / (\pi \omega_{0}^{2})]^{2} \}.$$
 (6)

Для дальнейшего эффективного сбора, вышедшего из оболочки излучения в приемную градиентную линзу, требуется из вышедшего излучения выделить ту часть, которая сможет попасть в апертуру градиентной линзы. Так как апертура градиентной линзы представляет собой телесный угол, в поперечном сечении которого круг, рассчитаем эффективный радиус модового пятна излучения вышедшего на изгибе по формуле:

$$\omega_{i\phi} = [(\omega_{\phi} + x_{\phi} - r_{o\delta})\sin(90 - \Phi)]/2.$$
 (7)

где Φ – угол изгиба OB, $r_{o\delta}$ – радиус оболочки OB, $\omega_{a\phi}$, x_{ϕ} и ω_{ϕ} представлены рис. 4.



Рис. 4. Выход излучения за пределы отражающей оболочки

Эффективность ввода вышедшего за отражающую оболочку ОВ излучения в градиентную линзу η₃ определяется по формулам расчета эффективности [13]:

$$\eta_{3} = k \exp(-k\{x^{2}(1/\omega_{1}^{2}+1/\omega_{9\phi}^{2})/2+\pi^{2}\theta^{2} \times [\omega_{9\phi}^{2}(z)+\omega_{1}^{2}]/2\lambda^{2}-x\theta z/\omega_{9\phi}^{2}\}), \qquad (9)$$

где ω_1 – радиус гауссова луча ПОУ с градиентной линзой на ее рабочем расстоянии; x – радиальное смещение вектора Умова – Пойтинга выходящего гауссова луча и оптической оси ПОУ, мкм; z – продольное смещение вектора Умова –Пойтинга выходящего гауссова луча и оптической оси ПОУ, мкм;

 θ – угловое рассогласование вектора Умова – Пойтинга выходящего гауссова луча и оптической оси ПОУ, град; λ – рабочая длина волны, мкм.

$$k = 4\omega_{2\phi}^{2}\omega_{1}^{2}/[(\omega_{2\phi}^{2} + \omega_{1}^{2})^{2} + \lambda^{2}z^{2}/\pi^{2}]; \qquad (10)$$

$$\omega_{3\phi}^{2}(z) = \omega_{3\phi}^{2} \left[1 + \left[\frac{\lambda z}{(\pi \omega_{3\phi}^{2})}\right]^{2}\right].$$
(11)

Коэффициент согласования по длине изгиба определяется как часть излучения, выведенного на длине изгиба, которая захватывается апертурой ПОУ и определяется по формуле:

$$\gamma = 2\omega_{ab}/\Phi R, \tag{12}$$

где ω_{ϕ} – эффективный радиус гауссова луча, мкм; Φ – угол изгиба, рад; *R* – радиус изгиба, мкм.

Коэффициент пропускания излучения из сердцевины ОВ на выходной оптический соединитель приемного ОВ определяется как коэффициентами пропускания излучения на каждой оптической среде, так и коэффициентами пропускания излучения на границах раздела сред с разными показателями преломления. Коэффициент вычисляется как произведение:

$$\tau = \tau_{n1} \cdot \tau_{n2} \cdot \tau_{n3} \cdot \tau_{od} \cdot \tau_{n4} \cdot \tau_{cn} \cdot \tau_{oc}, \qquad (13)$$

где τ_{n1} – коэффициент пропускания границы раздела «оболочка – первое защитное покрытие»; τ_{n2} – коэффициент пропускания границы раздела «первое защитное покрытие – второе защитное покрытие»; τ_{n3} – коэффициент пропускания границы раздела «второе защитное покрытие – оптическая деталь»; τ_{od} – коэффициент пропускания оптической детали; τ_{n4} – коэффициент пропускания границы раздела «оптическая деталь - воздух»; $\tau_{rл}$ – коэффициент пропускания градиентной линзы; τ_{oc} – коэффициент пропускания выходного оптического соединителя OB.

С помощью формулы Френеля и формулы для пропускания оптических материалов все коэффициенты пропускания легко могут быть определены [15]. После определения коэффициента дополнительных потерь A_{∂} по формуле (2) и коэффициента передачи k_n по формуле (3), можно рассчитать коэффициент вывода по следующей формуле[1]:

$$A_{\theta} = 10 \lg[k_n (1 - 10^{-0.1(2A\partial)})].$$
(14)

Оптимизация параметров передачи излучения

На основании предложенных методик расчета была написана программа для расчета характеристик УВС. На рис. 5 представлены расчетные графики зависимости дополнительных потерь и коэффициента передачи от коэффициента вывода для разных радиусов изгиба ОВ. Расчет проводился для OB SMF-28 с параметрами из таблицы. Диапазон дополнительных потерь 2*Ад* составлялот 0,001 до 0,05 дБ. Оптимальная юстировка ПОУ предполагалась для каждого угла изгиба OB.

Анализ графиков говорит о том, что получить максимальные значения коэффициентов передачи при всех значениях внесенных дополнительных потерь возможно при радиусах изгиба 1,5 мм или 2 мм. При этом, следует учитывать то, что чем меньше радиус изгиба OB, тем большеначальный угол изгиба \mathcal{O}_0 , который рассчитывается по формуле (1). Большему начальному углу изгиба будут соответствовать большие начальные потери. Поэтому оптимальным радиусом изгиба следует считать 2 мм. На рис. 6 представлена расчетная зависимость коэффициента дополнительных потерь от угла изгиба OB при радиусе изгиба 2 мм. Из рис. 6 видно, что для диапазона потерь от 0,001 до 0,1 дБ требуется изменять угол изгиба на 1,3° (от 12,9° до 14,2°).

На рис. 7 представлены расчетные зависимости коэффициента передачи от дополнительных потерь при радиусе изгиба 2 мм.



Рис. 5. Характеристики УВС для различных радиусов изгиба



Рис. 6. Зависимость дополнительных потерь от угла изгиба



Рис. 7. Зависимости коэффициента передачи от дополнительных потерь: 0 – юстировка ПОУ при каждом значении дополнительных потерь; 1 – юстировка ПОУ при Ад_ю = 0,005 дБ; 2 – при Ад_ю = 0,01 дБ; 3 – при Ад_ю = 0,02 дБ; 4 – при Ад_ю = 0,05 дБ; 5 – при Ад_ю = 0,1 дБ

Из рис. 7 следует, что максимальных значений коэффициента передачи можно добиться только путем юстировки ПОУ при каждом значении внесенных дополнительных потерь (кривая *0*). При работе в узком диапазоне дополнительных потерь можно проводить юстировку для какого-либо одного значения.

Верификация расчетных данных

Для подтверждения правильности разработанной методики расчета были проведены экспериментальные исследования. Для этого был разработан и изготовлен макет УВС. С использованием макета была собрана экспериментальная установка, состав и структурная схема которой приведены на рис. 8. В установке использованы компоненты, длякоторых проводился расчет: OB – SMF-28, ПОУ – оптический зонд Miniature OCT Fiber Probe фирмы Agiltron [5], оптическая деталь (ОД) 19 изстекла БК8, у которого показатель преломления на $\lambda = 1,55$ мкм равен 1,53 [14]. В конструкции устройства использованы детали, размеры которых определены расчетными данными: радиус оправы 15 равен 2 мм; входная грань ОД 19 задает начальный угол изгиба OB около 13°; входная грань призмы 21 располагается в точке, с координатами, рассчитанными по методике и схеме, приведенной на рис. 2.



Рис. 8. Состав и структурная схема экспериментальной установки: ΦK – фрейм контроллер AQ 2212; ОПД – оптический передатчик AQ 2200-131 (λ = 1,55 мкм); ОПМ – оптический приемник AQ 2200-211; ИМ – измеритель мощности FOD1204; ЮП – юстировочная подвижка; ПОВ – приемное оптическое волокно; 1 – основание; 2 – пластина; 3 – подвижка, 11 – прижим OB; 12 – оптическое волокно; 15 – оправа; 19 – оптическая деталь; 21 – призма; 20 – прижим втулки

В ОВ 12, рис. 8, от оптического передатчика ОПД вводился постоянный сигнал мощностью W_{ond} . Угол изгиба ОВ задавался с помощью линейного перемещения подвижкой 3 с последующим пересчетом в угол изгиба. Для каждого задаваемого угла изгиба измерялись мощности на входе W_{ond} и выходе W_{onm} изогнутого ОВ – 12 с помощью оптического приемника ОПМ, дБм. Мощность выведенного сигнала на выходе ПОУ измерялась с помощью измерителя мощности ИМ, дБм.

Было проведено десять серий измерений. По измеренным величинам мощностей вычислялись параметры изогнутого ОВ в зависимости от угла изгиба:

 $A_{6}(\Phi)$, дБ – коэффициент вывода от угла изгиба по формуле:

$$A_{\theta}(\Phi) = W_{uM}(\Phi) - W_{ond}, \qquad (15)$$

 $2A_{\partial}(\Phi), \ \partial E$ – коэффициент дополнительных потерь на двух изгибах от угла изгиба:

$$2A_{\partial}(\Phi) = W_{onm} - W_{onm}(\Phi), \qquad (16)$$

 $k_n(\Phi)$, отн. ед. – коэффициент передачи бокового излучения с изгиба ОВ на вход ИМ:

$$k_n(\Phi) = 10^{-0,1A_{\theta}(\Phi)} / (1 - 10^{-0,1[2A\partial(\Phi)]}).$$
(17)

По полученным результатам были построены экспериментальные характеристики, которые приведены на рис. 9 и рис. 10.

На рис. 9 и рис. 10 разнотонными квадратами отмечены экспериментальные результаты каждой из

десяти серий (один тон для одной серии). Кривые 1 и 2 построены как верхняя и нижняя огибающие экспериментальных данных. Кривая 3 построена по данным расчета по разработанной методике.

По полученным результатам можно сделать следующие выводы:

– расчетная зависимость $2A\partial$ от Φ имеет форму несколько отличную от экспериментальных результатов (рис. 9). Это связано, вероятно, с неточностью задания формулы расчета потерь.

– имеется большой статистический разброс экспериментальных результатов. Это, вероятно, обусловлено нестабильностью прижима ОВ к оптической детали, что вызывает появление нестабильного воздушного зазора, который в расчетах не учитывается. Кроме того, замечен люфт прижимного механизма, который также влияет на силу и геометрию прижима. Различия в k_n и A_d при одних и тех же A_6 в разных сериях измерений достигают от 3 до 5–7 раз.

– расчетные зависимости $2A_{\partial}$ и k_n от A_e расположены вблизи нижней и верхней границ экспериментальных данных соответственно. Нижняя граница зависимости $2A_{\partial} = f(A_e)$ определяет максимальный уровень выводимой мощности при минимальных потерях (лучший результат), а верхняя граница зависимости $k_n = f(A_e)$ определяет максимальную эффективность сбора потерянного на изгибе излучения (лучший результат).



Рис. 9. Зависимости дополнительных потерь от угла изгиба OB: 1 – нижняя граница экспериментальных данных, 2 – верхняя граница экспериментальных данных, 3 – расчетная кривая при условии идеальной юстировки приемного OB



Рис. 10. Зависимости коэффициентов дополнительных потерь и передачи от коэффициента вывода: 1 – нижняя граница экспериментальных данных, 3 – расчетная кривая при условии идеальной юстировки ПОУ

Заключение

Предложена оптическая схема УВС сигнала с боковой поверхности ОВ на ПОУв виде одномодового оптического волокна с использованием градиентной линзы на входе. Разработана методика расчета оптимального положения ПОУ относительно плоскости начала изгиба. Для предложенной схемы разработаны методики расчета дополнительных потерь от угла изгиба и коэффициента передачи оптического излучения с боковой поверхности изогнутого ОВ на выходной полюс ПОУ. Проведена верификация расчетных методик. Сравнение расчетных и экспериментальных данных показывает достаточно хорошее совпадение результатов. Результаты работы могут быть использованы при проектировании УВС различного назначения.

Результаты работы опубликованы в журнале ВАНТ [3], также подготовлены материалы еще двух статей в ВАНТ: «Методика расчета потерь на начальном участке изогнутого одномодового оптического волокна» и «Методика расчета коэффициента передачи излучения из сердцевины изогнутого одномодового оптического волокна в приемное волокно».

Литература

1. Шубин В. В. Волоконно-оптические системы и информационная безопасность. ГРОЦ. – С-Петербург: Изд. «Ива», 2006.

2. КБ «Волоконно-оптических приборов». Ответвитель – прищепка FOD-5503. [Electronic resource]. Mode of access: www.fods.com.

3. Малых Ю. В., Шубин В. В. Метод расчета эффективности передачи излучения с боковой поверхности изогнутого одномодового оптического волокна на приемное оптическое устройство. // ВАНТ. Серия математическое моделирование физических процессов. 2016, Вып.1, С. 69–79.

4. US Patent 4889403. Distribution optical fiber tap. 1989. [Electronic resource]. Mode of access: patents.com.

5. Оптические зонды Miniature OCT Fiber Probe фирмы Agiltron. [Electronic resource]. Mode of access: www.aligtron.com.

6. Gambling W. A., Matsumura H., Ragdale C. M. and Sammut R .A. Measurement of radiation loss in curved single-mode fibres. Microwave, optics and acoustics. July, 1978. Vol. 2, No 4, P. 134–140.

7. Снайдер Дж. Лав Теория оптических волноводов. – М.: «Радио и связь», 1987.

8. Optical A. Communication Systems. Bending loss and reliability in optical fibres. School of electrical and communications engineering.

9. Iodicicco A., Paladino D., Moccia M., Quero G., Campopiano S., Bock W. j., Cusano A. Mode coupling and field distribution in sub-mm permanelly bent single mode optical fibers. Optical & Laser Technology, 47 (2013), 292–304.

10. Schulze C., Lorenz A., Flamm D., Hartung A., Shroter S., Bartelt H., Duparre M. Mode resolved bend loss in few-mode optical fibers. Optics express. Vol. 21, No 3, P. 3170–3181, 2013.

11. Аксенов В. А., Волошин В. В., Воробьев И. Л., Иванов Г. А., Исаев В. А., Колосовский А. О., Моршнев С. В., Чаморовский Ю. К. Потери в одномодовых волоконных световодах на однократных изгибах по малому радиусу. Прямоугольный профиль показателя преломления // Радиотехника и электроника. 2004, Т. 49, № 6, С. 734–742.

12. Моршнев С. В. Оптические свойства изогнутых волоконных световодов. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук. Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова (г. Фрязино, Московской обл.). 2009.

13. Saruwatary M., Nawata K. Semiconductor Laser to Single-Mode fiber Coupling. Applied Optics, 11, 18, 1979, P. 1847–1856.

14. ГОСТ 13659-78. Стекло оптическое бесцветное. Физико-химические характеристики. Основные параметры. – М.: Изд-во стандартов, 1978.

15. Чуриловский В. Н. Теория оптических приборов. – М.–Ленинград: «Машиностроение», 1966.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИЧИН ВИБРОАКТИВНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СОВМЕСТНОГО АНАЛИЗА ВНЕШНЕГО ВИБРАЦИОННОГО И ВНУТРЕННЕГО АКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

<u>М. Г. Маслов</u>, М. Ю. Гантман, Д. Н. Патрушев Е. И. Шмелев

АО «ОКБМ Африкантов», г. Н. Новгород

Введение

Современные требования, предъявляемые к оборудованию, предусматривают снижение металлоемкости и габаритов, увеличении долговечности и надежности функционирования. Это приводит к повышению скоростей движения рабочих сред, возрастанию динамических нагрузок на все элементы систем оборудования и, как следствие, к интенсификации вибрации и шума. В настоящее время методы акустического проектирования позволяют найти оптимальное соотношение между массогабаритными характеристиками оборудования и его виброакустическими характеристиками.

Создаваемые оборудованием шумы могут вызываться механическими, аэродинамическими (гидродинамическими) и электромагнитными процессами. В большинстве случаев шум паропровода и оборудования имеет аэродинамическое (гидродинамическое) происхождение. Чаще всего причинами аэродинамического (гидродинамического) шума являются нестационарные процессы, связанные с обтеканием плохообтекаемых тел.

Вибрации и пульсации давления, порождаемые оборудованием, передаются на трубопроводы и распространяются по их структуре и по потоку рабочей среды. Однако зачастую в паропроводах и оборудовании возникают резонансные колебания при совпадении собственных частот колебаний участков трубопроводов (структурные резонансы) или столбов заключенных в них жидкости (акустические резонансы) с частотой возмущающих динамических сил или давлений.

Основным методом снижения шума оборудования – максимальное уменьшение его в источнике образования, однако для этого необходимо знать его физическую природу, основные закономерности возникновения и распространения. В большинстве случаев, исследование виброакустических характеристик оборудования может производиться только по внешним уровням вибрации на корпусе. Для описания причин виброактивности оборудования, спектрограмм вибрации корпуса недостаточно, что требует дополнительного источника информации о процессах, происходящих в проточной части оборудования гидравлических систем.

Для решения данной проблемы актуально использовать численные расчеты, а именно расчеты собственных структурных и акустических частот оборудования методом конечно-элементного моделирования в совокупности с газодинамическими расчетами потока среды в проточной части оборудования.

Объект исследования

Объектом исследования виброакустических характеристик в данной работе является запорная паровая арматура. Принципиальный вид паровой арматуры показан на рис. 1.



Рис. 1. Принципиальная схема запорной паровой арматуры

Описание целей работы

Целью данной работы является определение причины виброактивности исследуемой запорной паровой арматуры с помощью расчетно-экспериментальных методов.

Экспериментальная часть работы

В рамках данной работы были выполнены испытания запорной паровой арматуры на стенде в широком диапазоне скоростей потока продуваемого пара. Во время испытаний запорный механизм испытываемой арматуры находился в поднятом состоянии, что соответствует открытому положению. На каждом режиме продувке паром производились замеры уровней вибрационного и акустического полей. Контроль уровней виброускорений корпуса арматуры осуществлялся в контрольных точках (см. рис. 1) с помощью пьезокерамических датчиков в трех взаимно-перпендикулярных направлениях. Измерение внешнего акустического поля арматуры осуществлялось с помощью микрофона «свободного поля» установленного на штативе на расстоянии 1 м от испытуемого изделия.

Все сигналы с измерительной аппаратуры поступали на цифровой сборщик, с которого оцифрованные сигналы передавались по сети Ethernet на персональный компьютер (ПК). Характерный спектр виброускорения на корпусе арматуры показан на рис. 2.

Спектр виброускорения содержит большое количество близко расположенных максимумов над широкополосной частью спектра, что сильно усложняет задачу по определению причины виброактивности испытываемой арматуры. Однако, из подробного исследования спектров вибрации на разных режимах продувки был выделен гармонический ряд узкополосных максимумов, амплитуды которых значительно (более чем в 2 раза) превышают амплитуды менее добротных экстремумов.

С целью определения возможных причин возникновения процессов, приводящих к появлению выявленных добротных максимумов, рассмотрены спектры виброускорений корпуса арматуры для разных скоростей потока при одинаковых параметрах давления и температуры пара. По результатам анализа, выявлена зависимость частоты первого максимума гармонического ряда от скорости потока пара. Данная зависимость представлена на рис. 3.



Рис. 2. Характерный спектр виброускорения на корпусе арматуры



Рис. 3. Зависимость между скоростью потока и частотой узкополосного максимума

Представленная на рис. З зависимость имеет линейный характер, однако, присутствуют области, где частота максимума от скорости потока пара через исследуемую арматуру не зависит. Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что первопричиной появления гармонического ряда в спектральном составе вибрации корпуса арматуры, являются интенсивные вихреобразования, генерируемые при обтекании проточной части арматуры.

Детальный анализ экспериментальных результатов показал, что вибрация на частотах выделенного гармонического ряда присутствует во всех точках контроля вибрации арматуры, причем во всех трех направлениях. Выделить конкретную область с повышенной вибрацией на выделенных частотах из анализа результатов не удается.

Расчетная часть работы

Первоочередной задачей при расчетном исследовании причин виброактивности арматуры, является определение протекающих в потоке пара процессов, путем получения распределений внутренних профилей скорости, давления и анализа пульсаций давления в локальных точках в проточной части арматуры.

С целью решения данной задачи использовалось специализированное программное обеспечение для газодинамических расчетов.

Данные для расчета представлены на рис. 4.

Расположение контрольных точек в проточной части арматуры было выполнено следующим образом. По центральной продольной оси арматуры в области затвора расположены четыре поперечных сечения, рис. 4,б, в которых по окружности разных радиусов расположены контрольные точки, рис. 4,в. Угол по окружности между соседними точками составляет 10 градусов. Характерный спектр пульсаций давления в одной из контрольных точек для одного режима расхода пара (v = 51 м/с) представлен на рис. 4,а.

На спектре, представленном на рис. 4,а, хорошо видны эквидистантно расположенные максимумы, при этом частота первого максимума для схожего по параметрам потока пара режима в эксперименте, получилась f = 356 Гц. Результаты для остальных режимов и сравнение с экспериментально полученными данными представлены в таблице.

Из анализа полученных результатов, представленных в таблице хорошо видно, что расчетная частота первого максимума в спектре пульсаций давления достаточно хорошо совпадает с частотами, взятыми из спектров вибрации на корпусе. Относительная погрешность составляет 14 %, что говорит о хорошей сходимости расчетной модели к натуре.

Для локализации расположения максимальных пульсаций скорости в проточной части арматуры, проведено сравнение амплитуд на данных дискретных составляющих в зависимости от местоположения расчетной точки, а именно от:

 положения поперечного сечения в арматуре, на котором располагается расчетная точка;

 радиуса окружности, на котором расположена расчетная точка;

 от угла расположения расчетной точки на окружности.



Рис. 4. Данные для расчета: а – характерный спектр пульсаций давления в одной из контрольных точек; б – схема расположения расчетной точки на окружности в сечении

Сравнение расчетных и экспериментальных спектральных составляющих в спектрах пульсаций давлений и вибрации соответственно

Режим	Эксперимент	Расчет
T = 233,5 °C; P = 0,926 МПа; V = 39 м/с	f = 240 Гц	f = 275 Гц
T = 233,5 °C; P = 0,926 МПа; V = 51 м/с	f = 357 Гц	f = 356 Гц
T = 233,5 °C; P = 0,926 МПа; V = 66 м/с	f = 467 Гц	f = 450 Гц

Характерная зависимость амплитуды первого и второго максимума от угла расположения контрольной точки в сечении представлена на рис. 5.



Рис. 5. Характерная зависимость амплитуды первого и второго максимума от угла расположения контрольной точки в сечении

Проанализировав круговые зависимости было выявлено, что максимальная амплитуда пульсаций давления на частоте первого и второго максимума гармонического ряда наблюдается в третьем сечении в верхней части арматуры. При этом, в этой же области лучше всего наблюдаются гармоники данной Для решения вопроса о том, может ли данный процесс инициировать колебания арматуры на своей частоте, был проведен расчет виброотклика конструкции арматуры от воздействия на нее со стороны потока.

В качестве исходных данных необходимых для расчета, из результатов аэродинамического расчета были экспортированы пульсации давления с поверхности проточной части арматуры в каждый момент времени. Разработана конечно-элементная модель корпуса арматуры и заданы граничные условия в местах ее закрепления. Для расчета виброотклика данные о давлении интерполировались с каждого узла поверхности на узлы расчетной структурной сетки арматуры.

Расчетные точки контроля вибрации расположены на фланцах, в соответствии с расположением их при испытаниях натурной арматуры. Спектр виброускорений в точке расположенной на фланце арматуры показан на рис. 7.

В спектре на рис. 7 на частоте f = 344 Гц виден узкополосный максимум, однако его амплитуда меньше или сравнима с амплитудами других максимумов. Причиной этого является тот факт, что в эксперименте наблюдается резонансное усиление.

Несмотря на разницу спектров вибрации корпуса арматуры, полученных расчетным и экспериментальным путями, можно сказать, что в ходе исследований был определен источник появления в спектрограмме вибрации гармонического ряда узкополосных максимумов. Однако, остается открытым вопрос о природе процесса, который усиливает колебания конструкции вызванные срывом дискретных вихрей.





частоты. Для более наглядного представления о процессе, протекающем в проточной части арматуры, вычислены мгновенные (пульсационные) составляющие скорости в продольных и поперечных сечениях. Визуализация профиля скорости в продольном вертикальном сечении представлена на рис. 6.

По картинкам поля скорости, построенным на разных временных отсечках, хорошо видно развитие дискретного вихря, срывающегося с кромки, в которой происходит соприкосновение между конструкциями запорного органа и корпуса арматуры при ее закрытии. Для выяснения данного механизма усиления колебаний было проведено измерение собственных частот колебаний конструкций арматуры методом искусственного возбуждения с помощью специального акустического молотка. В результате измерений частоты собственных колебаний запорного органа показали близкие значения с частотами, связанными с интенсивным вихреобразованием (рис. 3). Данное предположение подразумевает синхронизацию частоты срыва вихрей и частоты собственных колебаний запорного органа арматуры.



Рис. 7. Расчетный спектр виброускорений в точке расположенной на фланце арматуры

Кроме того, в настоящее время анализируется возможность усиления колебаний за счет собственных акустических мод (стоячих волн) подводящего/отводящего трубопровода. Предварительный расчет показал, что значения их частот также близки к частотам срыва вихрей.

Выводы

В данной работе отработан алгоритм расчетноэкспериментального метода исследования причин виброактивности оборудования. Выявлен источник вихревого звука в проточной части арматуры. В настоящее время проводятся дополнительные исследования по определению механизма усиления колебаний в арматуре. Рассматривается возможность усиления колебаний за счет процесса синхронизации частоты вихревого срыва с частотой собственных колебаний конструкций затвора арматуры, а также с частотой колебаний столба «пара» в проточной части системы «арматура-трубопровод».

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕПРЕРЫВНЫХ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ В РЕЖИМЕ ИМПУЛЬСНОГО ПИТАНИЯ ПРИБОРОВ СВЧ

И. В. Ошкин, В. Б. Профе, К. В. Троцюк, А. И. Гузов, А. Е. Рыбкин

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

Введение

Экспериментальные работы по исследованию спектральных характеристик непрерывных сигналов приборов СВЧ повышенной мощности связаны с большими тепловыми нагрузками на основные функциональные узлы [1]. При проведении предварительной настройки, выполнении входного контроля и при исследовании в предельных режимах требуются значительные времена работы, что в некоторых практических случаях может привести к дефекту или разрушению функциональных узлов прибора. Существенно снизить тепловые нагрузки возможно в импульсном режиме работы прибора. В отличие от непрерывного режима питания, импульсный режим позволяет проводить измерения спектральных характеристик выходного сигнала прибора СВЧ в тех же диапазонах напряжений питания и токов пучка при значительном снижении тепловых нагрузок на функциональные узлы прибора и основную нагрузку СВЧ [2, 3]. Исследования спектральных характеристик прибора СВЧ проводятся с помощью осциллографа с встроенным фильтром быстрого преобразования Фурье (БПФ) или с помощью анализатора спектра (АС). Выбор измерительного оборудования зависит от частотного диапазона, от требований к разрешающей способности спектрального анализа и его стоимости. Кроме того, при исследовании сложных сигналов, в частности, при анализе сложномодулированных сигналов разрешающей способности спектрального анализа осциллографа недостаточно. Поэтому важной и актуальной задачей является разработка методов проведения исследований непрерывных широкополосных сигналов в импульсном режиме в зависимости от параметров измерительного оборудования и от технических характеристик высоковольтного источника питания.

Целью данной работы является разработка методов проведения экспериментальных исследований амплитудного спектра непрерывных сигналов при импульсном режиме электропитания приборов СВЧ.

Условия проведения исследований

Схема для проведения исследований (см. рис. 1) включает генератор сигналов произвольной формы (ГСПФ), АС с рабочей полосой до 13 ГГц и высокоскоростной цифровой осциллограф с полосой пропускания до 1 ГГц и встроенной опцией БПФ. ГСПФ позволяет смоделировать выходной сигнал в условиях импульсного электропитания, представляющий собой периодическую последовательность радиоимпульсов с широкополосным высокочастотным заполнением. В качестве широкополосного высокочастотного заполнения используется сигнал типа «меандр» с частотой следования 5 МГц, спектр которого представляет собой только нечетные гармоники, убывающие по амплитуде пропорционально номеру гармоники. Сформированный сигнал последовательности радиоимпульсов с выхода ГСПФ поступает на вход АС и на вход осциллографа, позволяя проводить сравнительную оценку спектров выходного сигнала в зависимости от параметров импульсной последовательности ГСПФ.



Рис. 1. Схема для проведения исследований

Параметры импульсной последовательности ГСПФ выбираются в соответствии с техническими характеристиками высоковольтного источника питания прибора СВЧ и исходя из возможности качественно оценить искажения спектра в зависимости от временного соотношения длительности радиоимпульсов т_{имп} и времени свипирования t_{свип} AC.

Время свипирования по частоте t_{свип} AC (длительность развертки) – время, за которое AC осуществляет один полный цикл развертки по частоте от начальной частоты полосы обзора до конечной. Минимально возможное время свипирования используемого AC

составляет t_{свип} = 2мс для измерения 201 точки спектрограммы. Однако в этом случае, при установленной полосе обзора в 200 МГц, на каждый мегагерц полосы обзора приходится один отсчет частоты, что может быть критично при проведении исследовательских работ. Поэтому в нашем случае условно принято минимально возможное время свипирования t_{свип} = 4 мс при измерении 401 точки спектрограммы сигнала при разрешении с полосой 200 МГц.

В качестве высоковольтного источника питания СВЧ-генератора используется импульсный источник питания (ИИП) со следующими техническими характеристиками блока коммутатора: диапазон регулирования длительности импульса 100–2000 мкс; диапазон регулирования периода повторения импульсов 1–1000 мс; минимальная скважность импульсной последовательности 5; минимальная длительность переднего и заднего фронтов выходного напряжения 20 мкс.

В условиях импульсного питания появляются составляющие, обусловленные переходными процессами на переднем и заднем фронтах радиоимпульса (импульса высокого напряжения ИИП). Для исключения спектральных составляющих, обусловленных переходными процессами, запуск развертки АС должен быть задержан на время длительности переднего фронта радиоимпульса и должен завершиться до начала заднего фронта радиоимпульса. Это обеспечивается искусственным введением задержки запуска развертки и времени свипирования AC t_{свип} = 4 мс. На осциллографе для исключения спектральных составляющих, обусловленных переходными процессами на переднем фронте, устанавливается величина задержки t₃, превышающая длительность переднего фронта t_{пф} радиоимпульса для ИИП не менее 20 мкс.

В работе рассматриваются три случая с возможными соотношениями параметров импульсной последовательности радиоимпульсов ГСПФ и времени свипирования по частоте t_{свип} AC:

 $-\tau_{\rm имп}=t_{\rm CBИП};$

 $- \tau_{\rm им \pi} < t_{\rm cbu \pi};$

 $-t_{CBUIT} > 3T_{UMTT}$

где $T_{\rm имп} = 50$ мс – период последовательности радиоимпульсов.

Результаты исследований

На рис. 2 представлена осциллограмма непрерывного сигнала на выходе ГСПФ, на рис. 3 – спектрограмма сигнала при непрерывной генерации с внутренним запуском развертки АС. Спектрограмма непрерывного сигнала является образцовой и необходима для проведения сравнительного анализа со спектрограммами, полученными при измерениях в импульсных режимах. На рис. 4 представлена спектрограмма, полученная с помощью осциллографа с использованием встроенной опцией БПФ временной реализации фрагмента радиочастотной составляющей сигнала.



Рис. 2. Непрерывная генерация сигнала: 1 – сигнал на выходе ГСПФ, 2 – сигнал внешней синхронизации АС, 3 – сигнал выполнения цикла развертки АС



Рис. 3. Спектр радиочастотного заполнения при непрерывной генерации, полученный анализатором спектра



Рис. 4. Спектр радиочастотного заполнения при непрерывной генерации, полученный осциллографом

Рассмотрим случай, когда длительность радиоимпульса $\tau_{имп}$ на входе AC равна времени свипирования $t_{свип}$ и составляет 4 мс (рис. 5). На рис. 6 представлена спектрограмма сигнала, полученная AC. Как видно из рис. 6, полученная при таком соотношении длительность радиоимпульса и времени свипирования спектрограмма полностью идентична спектрограмме, полученной при непрерывной генерации. В этом случае выполняется условие непрерывного наличия сигнала радиочастотного заполнения на входе AC во время выполнения полного цикла развертки по частоте. Такая же картина наблюдается при $\tau_{имп} > t_{свип}$ при условии, что сигнал радиочастотного заполнения стационарен (Т/ $\tau_{имп}$ = const) во время выполнения цикла развертки AC.



Рис. 5. Генерация импульсного сигнала при т_{имп} = t_{свип}: 1 – сигнал на выходе ГСПФ, 2 – сигнал внешней синхронизации AC, 3 – сигнал выполнения цикла развертки AC



Рис. 6. Спектр радиочастотного заполнения при $\tau_{имп} = t_{свип}$

На рис. 7 представлена осциллограмма, когда длительность радиоимпульса на входе AC меньше времени свипирования AC, то есть $\tau_{имп} < t_{свип}$. Если

длительность радиоимпульса $\tau_{имп}$ соответствует наименьшей длительности импульса блока коммутатора ИИП $\tau_{\rm имп} = 100$ мкс, то на спектре радиочастотного заполнения достоверно виден лишь короткий начальный участок действительного спектра (рис. 8). Если длительность радиоимпульса на входе АС $\tau_{\rm имп} = 2$ мс (в два раза меньше времени свипирования $t_{CBMII} = 4$ мс), то в этом случае наблюдаемая спектрограмма (рис. 9) соответствует спектрограмме в непрерывном режиме лишь до половины развертки АС. когда с момента ее запуска прошло 2 мс, то есть время равное длительности радиоимпульса т_{имп}. Однако спектрограммы, полученные с помощью осциллографа для случаев $\tau_{\rm имп} = 100$ мкс и $\tau_{\rm имп} = 2$ мс, не имеют подобных искажений и полностью соответствует спектрограмме в непрерывном режиме. Это означает, что применение метода измерения спектра высокочастотного заполнения радиоимпульсов с использованием АС ограничивается минимальным временем свипирования по частоте, следовательно, длительности измеряемых радиоимпульсов не должны быть меньше этой величины.



Рис. 7. Генерация импульсного сигнала при т_{имп} < t_{свип}: 1 – сигнал на выходе ГСПФ, 2 – сигнал внешней синхронизации AC, 3 – сигнал выполнения цикла развертки AC







при $\tau_{\scriptscriptstyle \rm ИМ\Pi} = 100~{\rm MKc} < t_{\scriptscriptstyle \rm CBИ\Pi}$

. Спектр радиочастотного заполн при $\tau_{\rm имп} = 2 \text{ мc} < t_{\rm свип}$

Рассмотрим случай, когда за время свипирования на вход AC поступает несколько радиоимпульсов. На осциллограмме рис. 10 длительность импульсов для наглядности эффекта увеличена до 10 мс. На рис. 11 представлена спектрограмма сигнала, когда время свипирования $t_{свип} = 160$ мс имеет более чем трехкратное превышение периода следования радиоимпульсов $T_{имп} = 50$ мс. Как видно из рис. 11 в таком режиме наблюдается эффект «нарезания» спектра: частотные составляющие отображаются в спектре лишь во время присутствия сигнала на входе AC.



Рис. 10. Генерация импульсного сигнала при t_{свип} > 3T_{имп}: 1 – сигнал на выходе ГСПФ, 2 – сигнал внешней синхронизации AC, 3 – сигнал выполнения цикла развертки AC

На основе полученных результатов исследований можно сформулировать условие применения метода измерения спектра высокочастотного заполнения радиоимпульсов с помощью АС. Для наблюдения спектра высокочастотного заполнения периодической последовательности радиоимпульсов с помощью АС

длительность радиоимпульса $\tau_{имп}$ должна быть больше времени свипирования по частоте $t_{свип}$ на величину, учитывающую длительности переднего и заднего фронтов радиоимпульса. При этом условии спектр будет наблюдаться во всей заданной полосе обзора AC. Данное условие вносит определенное ограничение на длительность импульсов ИИП со стороны их минимальной величины обусловленное имеющимся минимумом времени свипирования по частоте AC.



Полученные результаты исследования позволяют провести измерения спектральных характеристик прибора СВЧ, в качестве которого выберем резонансный СВЧ-генератор О – типа дециметрового диапазона [4]. Резонансный СВЧ-генератор О – типа при заданном уровне согласования с выходной нагрузкой и амплитуде рабочего напряжения генерирует сигналы с различной формой спектральной плотности, что позволяет использовать его как объект исследования для оценки применения метода измерения спектра высокочастотного заполнения радиоимпульса.

Схема подключения измерительного оборудования представлена на рис. 12. Спектральные параметры выходного сигнала СВЧ-генератора измеряются АС. Информация о выходном токе и выходном напряжении поступает на осциллограф. Электропитание в импульсном и непрерывном режимах катода и катодно-подогревательного узла электронной пушки обеспечивается ИИП.

На рис. 13 представлены результаты измерения спектра сигнала на выходе СВЧ-генератора в режиме непрерывного и импульсного ($T/\tau_{имп} = 100$) электропитания катода пушки. Согласно рис. 13, спектр выходного сигнала в условиях импульсного режима электропитания СВЧ-генератора полностью эквивалентен спектру при непрерывном режиме.



Рис. 12. Схема подключения измерительного оборудования для исследования спектральных характеристик СВЧ-генератора



Рис. 13. Спектр выходного сигнала в режиме непрерывного и импульсного электропитания СВЧ-генератора: 1 – импульсный режим, 2 – непрерывный режим

Выводы

Таким образом, предложенный метод измерения спектра высокочастотного заполнения радиоимпульсов, позволяет проводить исследования непрерывных широкополосных сигналов в режиме импульсного электропитания приборов СВЧ при значительно меньших тепловых нагрузках на основные функциональные узлы. Полученные экспериментальные результаты показывают, что для получения достоверного спектра выходного сигнала с помощью AC время анализа должно быть меньше длительности радиоимпульса. В этом случае получается спектр полностью эквивалентный спектру непрерывного сигнала в условиях импульсного электропитания приборов СВЧ. Использование импульсного режима позволяет снизить мощность, рассеиваемую в приборе СВЧ, в десять и более раз, проводить исследования предельных режимов без его разрушения, экономить электроэнергию и теплоноситель.

Литература

1. Ошкин И. В., Троцюк К. В. Общая схема разработки электронно-оптических систем в приборах СВЧ. Сборник докладов Восьмой научнотехнической конференции «Молодежь в науке». – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2009. Вып. 8. С. 492–497.

2. Oshkin I. V., Profe V. B., Trotsyuk K. V. Study of the external loading influence on BWT-generator operation modes. 2014 24th Int. Crimean Conf. «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo-2014). – Sevastopol, P. 165–166. 3. Ошкин И. В., Профе В. Б., Троцюк К. В. Экспериментальное исследование режимов генерации колебаний резонансной лампы обратной волны. Сборник докладов 22-й международной научнотехнической конференции «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC-2016). – Воронеж: НПФ «САК-ВОЕЕ» ООО, 2016. Т. 2. С. 1342–1349.

4. Ошкин И. В., Профе В. Б., Троцюк К. В. Режимы генерации колебаний резонансного ЛОВгенератора. Сб. докл. Четырнадцатой научнотехнической конф. «Молодежь в науке». – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2015. Вып. 14. С. 242–247.

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНОЛОГИИ МИКРОСФЕРИЧЕСКОГО ТОПЛИВА

<u>К. А. Поздняков</u>, А. В. Белеевский, Е. В. Клюкин, З. Ш. Никурадзе, А. А. Перцев, О. А. Стрельцов, М. В. Юдин

АО «ВНИИНМ», г. Москва

1. Введение

В АО «ВНИИНМ» проводятся работы по усовершенствованию технологии изготовления микросферического топлива для реакторов ВТГР, основными стадиями которой являются получение кернов из оксидов делящегося материала, нанесение на них ТРИЗО покрытий («ТРехструктурное ИЗОтропное» покрытие, в английской терминологии TRISO «TRistructural ISOtropic») из пироуглерода и карбида кремния, изготовление топливных компактов. При этом используются оксиды урана различного обогащения, в перспективе плутоний, вредные химические вещества (ВХВ): метилтрихлорсилан, тетрахлорэтилен, азотная кислота, а также взрывоопасные газы: водород, ацетилен, пропилен. Помимо этого, образующиеся в процессе получения микросферического топлива газообразные продукты содержат хлористый водород, продукты пиролиза фенолформальдегидной смолы, сажу, водород, пары кислот и р/а аэрозоли. Все это требует создания технологий и оборудования для защиты окружающей среды от этих вредных факторов.

Принимая во внимание еще и местоположение Боксовой Исследовательской Установки (БИУ), остро встала проблема экологической безопасности проводимых работ. Для каждого участка исследовательской установки были разработаны локальные системы газоочистки (ЛСГО), методы обращения с радиоактивными отходами всех видов. Представлены краткое описание этапов технологии, оборудование, позволяющие проводить исследования по разработке технологии микросферического топлива в условиях московского мегаполиса с соблюдением экологических норм, без загрязнения окружающей среды отходами, а также комплекс технических решений, позволяющих снизить до приемлимого уровня или полностью исключить выход вредных и/или радиоактивных материалов в окружающую среду.

Создание экспериментальной базы для производства микросферического топлива для высокотемпературных газовых реакторов потребовало параллельного решения проблем защиты окружающей среды от выбросов вредных химических веществ, радиоактивных аэрозолей, обращения с разнообразными радиоактивными отходами (РАО).

2. Состав экспериментальной установки

На БИУ (рис. 1) проводятся технологические процессы по изготовлению микросферического топлива с соблюдением требований существующих норм и правил работ с делящимися материалами (ДМ) и ВХВ.

БИУ разделена на следующие технологические участки:

 приготовления растворов и получения кернов на основе оксидов ДМ;

– нанесения на керны защитных ТРИЗО покрытий – получение микротвэлов (МТ);

- изготовления топливных компактов (ТК);
- контроля качества (КК).



Рис. 1. Боксовая исследовательская установка

Для защиты окружающей среды и обеспечения безопасности персонала на трех участках созданы локальные системы газоочистки, проводится разбавление уже очищенных газов, а на участке контроля качества отходящие от боксов газы направляются в спецвентиляцию и подвергаются очистке в системе газоочистки института. Подача взрывоопасных газовых смесей, проводится с использованием конструкции «труба в трубе» с протоком инертного газа (азота) в межтрубном пространстве и контролем содержания Н₂ на выходе. Имеются системы резервного водоснабжения для охлаждения печей, контроля до взрывоопасных концентраций горючих и взрывоопасных газов, автоматического управления процессами (СКУ). На установке имеется автоматические системы учета и контроля ДМ и сбора и хранения информации, обеспечена физическая защита от несанкционированного проникновения в производственную зону и доступа к ДМ.

3. Общие меры безопасности

В соответствии с требованиями ОСПОРБ-99/2010 на БИУ используется трехзональная планировка помещений для работы с ДМ. Контроль объемной активности в воздухе операторской и рабочей зоны обеспечивается пробоотборными устройствами с аналитическими фильтрами. Персонал БИУ имеет индивидуальные малогабаритные дозиметры ДТЛО2. Установка оборудована санпропускниками. В подвальном помещении имеется система резервного водоснабжения, которая берет на себя охлаждение высокотемпературных печей при нештатных ситуациях. Баллоны со сжатыми газами и оборудование регулирования расхода газов расположены в отдельном помещении – газобаллонной станции, расположенном в 20 м от корпуса, где расположена БИУ (рис. 2).



Рис. 2. Газобалонная станция

3.1. Системы контроля и автоматического управления процессами (СКУ) БИУ

На всех участках БИУ имеются системы контроля и автоматического управления технологическими процессами, и соответствующее программное обеспечение. Информация поступает на рабочую станцию оператора-технолога и отражается на дисплее. СКУ имеет возможность управлять процессами, как в автоматизированном, так и ручном режимах. В первом случае управление осуществляется без вмешательства оператора на отдельной стадии технологического процесса, но именно оператортехнолог принимает решение о переходе к следующему этапу. В ручном режиме оператор имеет возможность осуществлять ручной ввод параметров и управлять процессом по своему усмотрению. Важная для безопасности информация о текущей концентрации водорода, хлористого водорода и кислорода в боксах и операторских зонах измеряется газосигнализаторами типа ИГС-98 и отображается восьмиканальным пороговым пультом контроля концентраций этих газов.

3.2. Инертная защитная атмосфера перчаточных боксов и другие меры безопасности

Боксы, где производятся работы с пожарои взрывоопасными газами имеют инертную атмосферу. Вытеснение воздушной среды из боксов перед экспериментами производится аргоном до содержания кислорода в боксе 0,7 % об. Для строгого контроля содержания кислорода – установливаются по два датчика на кислород на разной высоте. В процессе экспериментов производится подпитка инерной среды аргоном и азотом. Герметичные перчаточные боксы подсоединены к спецвентиляции, в которых поддерживается разрежении не менее 20 мм вод. ст., линии притока и вытяжки оборудованы фильтрами ФВ-0,4 и снабжены электромагнитными клапанами.

3.3. Организация физической защиты ДМ

В целях обеспечения сохранности ДМ, а также для обнаружения несанкционированного доступа к ним на БИУ осуществляется физическая защита (ФЗ) ДМ. На БИУ применяется система допуска персонала согласно требованиям и правилам Федеральных Законов, действующих в ГК «Росатом».

4. Безопасность изготовления кернов

4.1. Технология изготовления кернов

При изготовлении кернов на БИУ применяется один из вариантов золь-гель метода – метод внутреннего гелирования. Метод основан на изменении свойств рабочего раствора при изменении внешних условий, в частности, температуры. Рабочий раствор, устойчивый при температуре около 0 °С, диспергируется (рис. 3) в несмешивающуюся с водной фазой среду, например, тетрахлорэтилен, нагретую до температуры 70–80 °С. При этом происходит гелирование рабочего раствора внутри объема капли с образованием моноразмерных гель-сфер. Далее гель-сферы старят при температуре гелирования, отделяют от гелирующей среды, промывают 1–2 % водным раствором аммиака, сушат, прокаливают и спекают в восстановительной атмосфере до требуемой плотности.



Рис. 3. Диспергирование рабочего раствора

В процессе изготовления кернов возможно образование как жидких, так и твердых отходов, содержащих РМ. Жидкие радиоактивные отходы (ЖРО) образуются в результате промывки гель-сфер аммиаком, а также аппаратов после технологического цикла. Содержащиеся в промывных водах РМ осаждаются, прокаливаются и возвращаются в начало цикла. Твердые радиоактивные отходы (ТРО) образуются при преждевременном гелировании рабочего раствора, образовании некондиционной фракции сферических частиц. ТРО также возвращаестя в начало технологии тем самым снижая до минимума невозвратные потери РМ.

4.2. ЛСГО участка растворов и кернов

Сдувки (удаляемые из технологического оборудования парогазовые смеси, вещества в газообразном и/или аэрозольном виде) с операций участка растворения и изготовления кернов условно можно разделить на «кислые» и «щелочные».

«Кислые» сдувки образуются с операций:

растворения оксида урана (плутония) в азотной кислоте;

- сорбционной очистки раствора урана (плутония);

 упаривания раствора урана (плутония) и промывных растворов.

Сдувки содержат до 10 мг/м³ урана, значительное содержание аэрозолей HNO₃.

Для «кислых» сдувок используется отдельная ветка очистки отходящих газов с операций, которые проводятся под разрежением (от 0,05 до 0,2 атм) – упаривание раствора урана (плутония) и упаривание промывных растворов, так называемую систему очистки вакуумных «кислых» сдувок. Система очистки вакуумных «кислых» сдувок. Система очистки вакуумных «кислых» сдувок одновременно обеспечивает разрежение в приемных бачках для реагентов и жидких отходов, размещаемых в ремзоне технологических боксов.

Сдувки с операций гелеобразования и последующих технологических операций вплоть до спекания и получения UO₂ относятся к «щелочным».

ЛСГО «щелочных» сдувок обеспечивает очистку от аэрозолей с содержанием урана от 0,1 до 10 мг/м³ на разных операциях, Таким образом, система ЛСГО участка растворения и изготовления кернов включает три ветки:

- систему очистки «кислых» сдувок,
- систему очистки «щелочных» сдувок,
- систему очистки вакуумных «кислых» сдувок.

Для вакуумных «щелочных» сдувок отдельной ветки газоочистки не предусмотрено. Передача в технологические аппараты растворов на щелочных операциях производится периодически и может осуществляться насосом, установленным на ЛСГО вакуумных «кислых» сдувок

В каждой из веток ЛСГО высокоэффективная очистка обеспечивается системой из трех последовательно установленных стекловолокнистых фильтров тонкой очистки типа ФСТО (рис. 4). Фильтры ФСТО снаряжены ультратонким стекловолокном с диаметром волокон 0,8 мкм производства Новгородского завода стекловолокна. Конструкция фильтров, позволяет, в случае необходимости, изменять плотность упаковки фильтрующего материала. Коэффициент очистки такого фильтра > 5 × 10³.



Рис. 4. Фильтр ФСТО

Такие фильтры используются на всех участках БИУ, и, фильтрующие элементы на них, заменяются при достижении ими аэродинамического сопротивления 100 мм водного столба.

Отбор проб для оценки эффективности очистки от радиоактивных аэрозолей предусмотрен на входе в первый фильтр и выходе из последнего фильтра на каждой из трех веток. Отобранные на эти фильтры пробы анализируются на альфа-радиометре.

5. Безопасность получения микротвэлов

5.1. Технология нанесения защитных ТРИЗО покрытий на керны

Микротвэл представляет собой керны с четырехслойным покрытием, и каждый слой имеет определенное назначение:

– первый буферный слой из пористого пироуглерода (ВРуС) позволяет защитить следующие три слоя покрытий от повреждения осколками деления, обеспечивает локальный объем для газообразных продуктов деления (ГПД) и окиси углерода, образующихся при облучении, компенсирует размерные изменения керна, слой образуется при пиролизе ацетилена в среде аргона;

 второй слой из плотного изотропного пироуглерода (IPyC) обеспечивает защиту топлива от хлористого водорода, образующегося при нанесении слоя карбида кремния, а также являться барьером, снижающим вероятность химического воздействия ПД и СО на карбид кремния, слой образуется при пиролизе смеси пропилена и ацетилена в среде аргона;

 третий слой из плотного карбида кремния (SiC) представляет собой главный силовой слой, надежно удерживающий газообразные, летучие (I, Cs) и твердые продукты деления, слой образуется при пиролизе метилтрихлорсилана (МТХС) в среде водорода;

– четвертый (внешний) слой из плотного пироуглерода (ОРуС), предназначен для защиты силового слоя карбида кремния от механических воздействий при изготовлении топливных компактов, или шаровых топливных элементов, а также, благодаря усадке, создает сжимающие напряжения в SiC слое и повышает прочность конструкции в целом, слой создается при пиролизе смеси пропилена и ацетилена в среде аргона.

Также предусмотрено добавление геттера кислорода в первое покрытие ВРуС в двух видах, либо в виде тонкого слоя SiC, либо в виде мелкодисперсных частиц карбида кремния, распределенных в слое пироуглерода при пиролизе метилсилана.

Процессы нанесения покрытий проводятся в аппаратах «кипящего» слоя коутерах (рис. 5) в интервале температур 1100–1600 °С. в газовом потоке от коутера содержится водород, хлористый водород, сажа, аэрозоли карбида кремния. Поэтому, для очистки отходящих газов участка нанесения покрытий разработаны две отдельные ветки газоочистки.

Одна используется при нанесении на керны UO₂ пироуглеродных покрытий и состоит (последовательно, по направлению движения газов) из двух регенерируемых металлотканевых фильтров, двух регенерируемых стекловолокнистых фильтров тонкой очистки (ФСТО) и фильтра ФВ-0,4. Их эффективность 90 и 99 %, соотвественно. Другая ветка ЛСГО, используемая для очистки газов при нанесении покрытий из карбида кремния состоит (по направлению движения газов) из двух ФСТО, трех адсорберов для поглощения хлористого водорода (рис. 6), еще одного фильтра ФСТО, и фильтра ФВ 0,4. Ранее для улавливания НСІ использовались барботеры с раствором щелочи. Для улучшения условий проведения процесса нанесения покрытий карбида кремния перешли на поглощение хлористого водорода «твердыми» поглотителями. В качестве адсорбента применяется известковый хемосорбент «Sofnolime». Таким образом, одновременно, происходит очистка и от аэрозолей и от вредных химических веществ на одной ЛСГО. В перчаточном боксе, где размещена ЛСГО, создается инертная атмосфера (аргон, азот) и непрерывно контролируется содержание кислорода, водорода и хлористого водорода.



Рис. 5. Аппарат «кипящего» слоя - коутер

5.2. ЛСГО участка нанесения покрытий

Процесс нанесения ТРИЗО покрытий сопровождается образованием радиоактивных аэрозолей в результате истирания кернов в «кипящем слое» коутера. В случае нанесения пироуглеродных покрытий в отходящих газах к ним добавляются частицы сажи, водород, аргон. При нанесении слоя карбида кремния



Рис. 6. Адсорбер HCl

5.3. Система разбавления отходящих газов ЛСГО УНП

Водородсодержащий газовый поток от коутера, после прохождения газоочистки, попадает на установку эжектирования, где разбавляется воздухом до взрывобезопасной концентрации. Установка приводится в действие компрессором ВК7Е 8-270. Объемные скорости подачи сжатого воздуха от компрессора и воздуха, идущего на разбавление, измеряются диафрагменными расходомерами и отражаются на мнемосхеме на дисплее рабочей станции операторатехнолога. Разрежение в системе (изменение расхода воздуха на разбавление) осуществляется шаровым краном с электрическим приводом оператором установки нанесения покрытий. Отходящие после системы газоочистки газы разбавляются воздухом до взрывобезопасного содержания водорода на установке эжектирования.

Система эжектирования имеет два компрессора, расположенные в подсобном помещении – основной и резервный. Воздух от компрессора очищается от пыли, влаги и следов масла на системе фильтров сжатого воздуха и поступает в эжектор. Очищенные отходящие газы после ЛСГО УНП поступают в камеру разрежения эжектора. В эту же часть эжектора поступает воздух по линии подсоса, расход которого регулируется шаровым краном с электроприводом с РСОТ УНП. Объем воздуха, поступающий на разбавление отходящих газов, от компрессора и по линии подсоса измеряется диафрагменными расходомерами и контролируется оператором на РСОТ УНП в дистанционном режиме.

В отходящих газах предусмотрен контроль содержания радиоактивных материалов.

6. Безопасность получения топливных компактов

6.1. Технология получения компактов

В соответствии с принятой на БИУ технологией изготовления топливных компактов изготовление «сырых» компактов проводится методом теплого формования смеси МТ (или МТ со «сверхпокрытием») и пресс-композиции (ПК) – смесь из порошков природного и синтетического графитов и фенолформальдегидной смолы (ФФС) в качестве связующего с последующей двухстадийной термообработкой.

Полимеризация и карбонизация связующего производится, как единая операция низкотемпературной обработки (НТО), приводящая сначала к полимеризации, а затем разложению связующего (ФФС) и удаления основной массы летучих продуктов пиролиза фенолформальдегидной смолы. Процесс НТО проводится в протоке инертного газа до максимальной температуры 850 °C с выдержкой в течение часа в горизонтальной муфельной печи.

Высокотемпературная обработка (ВТО) проводится в вакуумной высокотемпературной печи с графитовым нагревателем, смонтированной в перчаточном боксе в динамическом вакууме (не выше 100 Па) до максимальной температуры 1800 °С с часовой выдержкой. Компакты загружаются в печи НТО и ВТО в специальном графитовом контейнере.

6.2. ЛСГО смешения и формования

Смешение и формование компактов сопровождается выделением относительно незначительных количеств пыли графита, паров воды, а также паров фенола и спиртов. Поэтому для отвода отходящих газов используется только местный зонд в зоне расположения технологического оборудования, а сама ЛСГО размещена вне бокса в ремонтной зоне. Вытяжной зонд располагается над технологическим столом. Размеры зонда определяются расположением технологического оборудования проводимой операции. Линейная скорость потока на входе в газоход должна быть не меньше 5 м/сек, что соответствует при dy = 15 мм объемному расходу 3,1 м³/час.

Необходимый расход воздуха над рабочим столом обеспечивает вакуумный мембранный насос HBM-5. Разрежение в системе газоочистки, которое должно составлять не менее ~30 мм вод. ст. фиксируется вакуумметром.

Загрязненный воздух через вытяжной зонд поступает на два аэрозольных стекловолокнистых фильтра тонкой очистки типа ФСТО, установленных последовательно.

Оба фильтра работают в сухом режиме фильтрации. Очищенный от аэрозолей поток поступает в угольный адсорбер, затем через расходомер и вакуумный насос в спецвентиляцию.

6.3. ЛСГО карбонизации

ЛСГО карбонизации расположена в боксе и в ремонтной зоне позади бокса и предназначена для очистки отходящих газов от радиоактивных аэрозолей и вредных газов, образующиеся при термической обработке «сырых» топливных компактов, содержащих продукты разложения фенолформальдегидной смолы: сажу, углеводороды, водород, оксид углерода, пары воды. Максимальная нагрузка на ЛСГО может достигать ~40 г твердых, жидких и газообразных отходов на одну операцию карбонизации. Большая часть отходов конденсируется на водоохлаждаемой части печи, играющей роль первой ступени газоочистки, в виде жидкой смолы (рис. 7).



Рис. 7. Конденсация продуктов пиролиза ФФС

Сама же система газоочистки состоит из двух стекловолокнистых фильтров тонкой очистки типа ФСТО (рис. 4), адсорбера с активированным углем, термохимического реактора, адсорбера с цеолитом NaA.

Стекловолокнистые фильтры предназначены для очистки от радиоактивных аэрозолей, в основном сажи, в незначительном количестве выделяющейся в процессе отверждения фенолформальдегидной смолы. Адсорбер с активированным углем предназначен для улавливания углеводородов в отходящих газах. Термохимический реактор, заполненный нанесенным на пористый носитель оксидом меди, обеспечивает разложение фенола и формальдегида до CO_2 и окисления водорода до воды. Термохимический реактор снабжен печью обогрева шахтного типа с регулятором температуры. Рабочая температура термохимического процесса разложения до 600 °C.

Адсорбер с цеолитом NaA предназначен для удаления паров воды из аргона. После адсорбера с NaA очищенный газ поступает на побудитель расхода и выбрасывается в спецвентиляцию.

7. Обращение с радиоактивными отходами

По каждому технологическому участку отходы делятся на брак, твердые (ТРО) и жидкие (ЖРО) отходы и по содержанию урана: высокое, низкое и «следовое». Под термином «следовое» понимаются содержание урана в жидких отходах, слив которых разрешен в специальную канализацию для переработки на МСП (Московская станция переработки).

Все РАО, собираются в месте первичного сбора и временного хранения, после чего, практически полностью, возвращаются в технологический цикл. В случае невозможности повторного использования, РАО передаются в хранилище временного хранения Общества для дальнейшей переработки и утилизации в соответствии со стандартом Общества.

7.1. РАО участка растворов и кернов

Этот участок отличается довольно большим разнообразием видов, как твердых, так и жидких отходов.

Твердые отходы образуют преждевременно загелировавший рабочий раствор, некондиционные сухие микросферы и спеченные керны, а также твердые отходы с низким содержанием урана, к которым отходам относятся: сметки при сухой уборке в перчаточных боксах, ветошь от протирки оборудования, а также отработанные фильтрующие элементы ЛСГО. Содержание урана в этих отходах имеет небольшие значения. Оценочно, содержание урана в этих отходах не превышает 0,1 % от его общего использованного количества.

Основным источником жидких отходов являются растворы от промывки аппаратов и трубопроводов, используемых для приготовления технологических урановых растворов. Эти отходы относятся к отходам со средним содержанием урана (несколько граммов урана в литре раствора).

Помимо этого жидкими отходами являются:

отработанные аммиачные растворы после промывки гель-сфер;

 конденсаты (образующиеся в основном при высушивании микросфер);

 выводимый на регенерацию перхлорэтилен (очистка перхлорэтилена проводится периодически по мере его загрязнения продуктами реакций ГМТА и мочевины). Эти растворы относятся к низкоактивным РАО, содержание урана в них не превышает нескольких миллиграммов на литр раствора.

7.2. РАО участка нанесения ТРИЗО покрытий

Источниками радиоактивных отходов на УНП являются:

– брак и отходы, образующиеся на операциях нанесения покрытий, отделяемые от кондиционного продукта на операциях рассева и откатки. Как показал опыт, масса частиц, не соответствующих требованиям по размеру и форме, может составить от 1,3 % брак по форме частиц с ТРИЗО покрытием и около 5 % брак по размеру частиц с покрытием от общей массы покрытых частиц. В составе этих отходов обнаружены частицы, как с большей, так и с меньшей толщиной покрытий и чешуйки пироуглерода;

 – реторты с забитым отложениями входным каналом подачи газа и отложениями в конусной части реторты, а также реторты с поврежденной резьбой);

 сажевые аэрозоли, уловленные регенерируемыми металлотканевыми фильтрами;

отработанные фильтрующие элементы фильтров ФВ-0,4 и ФСТО.

 – растворы от мокрой уборки боксов и оборудования перед демонтажем для ремонта, концентрация урана в них очень низкая;

– операции отмывки покрытых частиц от сажи с использованием изопропилового спирта. Загрязнения ураном изопропилового спирта не было обнаружено, а количество отделенного сажевого остатка было незначительным, и он был объединняется с сажей, выгруженной из холодильника и фильтров ЛСГО.

7.3. РАО участка топливных компактов

Источником отходов на УТК могут быть:

 просыпание частиц и пресс-композиции при дозировании, перегрузке покрытых частиц и пресскомпозиции. Величина этих отходов на начальных операциях не превышала 0,1% от загрузки;

 – брак от операций формования, карбонизации и высокотемпературной обработки ТК, формирующийся по результатам контроля характеристик заготовок и готовых топливных компактов. В период отработки технологии величина брака по геометрии была незначительна;

 вспомогательные материалы: ветошь, применяемая для уборки боксов, протирки приборов инструментов, для сбора проливов ЖРО, различные монтажные материалы, а также отработанные фильтрующие элементы фильтров В-0,4 и ФСТО;

 отработанный поглотитель с угольного адсорбера (загрязненный активированный уголь);

 – растворы, которые будут применяться для дезактивации оборудования перед ремонтом или перед заменой. Уровень загрязнения этих растворов должен быть незначительным. Экспериментальных данных нет, т. к. в данных исследованиях такие растворы не применялись; конденсаты смолистых веществ, образующиеся на охлаждаемых водой стенках загрузочной камере печи карбонизации.

При проведении карбонизации из компактов выделяются газы, твердые аэрозоли, летучие смолистые вещества. В ходе разработки технологии получения микросферического топлива на БИУ, одновременно, были отработаны и методы работы со всеми видами отходов.

7.4. РАО участка контроля качества

На участке контроля качества, в основном, предусмотрено использование неразрушающих методов анализа, что позволяет избежать образование радиоактивных отходов:

 МТ с частично удаленными покрытиями после процедуры «выщелачивание-сжигание-выщелачивание»;

 керны после отделения чешуек покрытий (для измерения их плотности);

 вспомогательные материалы, применяемые для уборки боксов, отработанные фильтрующие элементы ЛСГО. остатки растворов после проведения в них измерений концентраций ДМ и примесей;

 микрочастицы кернов в шлифовальной пасте, образующиеся при изготовлении шлифов.

8. Заключение

В соответствии с проектом технологии получения микросферического топлива для высокотемпературных газовых реакторов удалось создать комлекс мероприятий, обепечивающий радиационно-экологическую безопасность БИУ:

 соблюдается комплекс мероприятий по безопасности при работе с радиоактивными материалами;

 применены технические решения для обеспечения безопасности при работе с взрывоопасными газами;

 созданы локальные системы для очистки от возможных выбросов в атмосферу;

организовано обращение с радиоактивными отходами.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ИСКРИВЛЕНИЙ ТВС НА НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ PWR С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОДОВ CASMO5-SIMULATE5

Л. В. Леванов, <u>А. Ф. Радостин</u>, В. Е. Кузин

АО «ОКБМ Африкантов», г. Н. Новгород

Искривление твэлов и направляющих каналов под действием механических нагрузок, термических напряжений и радиационного воздействия в процессе эксплуатации тепловыделяющих сборок (TBC) в реакторе приводит к изменению, в том числе увеличению межкассетных зазоров.

В рамках проекта «ТВС-Квадрат» ОКБМ активно взаимодействует с оператором третьего блока шведской АЭС «Ringhals». Шведскими специалистами отмечено, что начиная с 28-ой топливной загрузки, в процессе эксплуатации наблюдаются отклонения в расчетных и измеренных значениях энерговыделения в активной зоне. Одной из причин такого рода различий может быть увеличение межкассетных зазоров в результате искривления ТВС. Это в свою очередь приводит к увеличению объема замедлителя, отнесенного к одному твэлу, а значит и к увеличению энерговыделения в этих твэлах. Такое увеличение особенно заметно для твэлов крайнего ряда и, в меньшей степени, для второго ряда твэлов.

Анализ влияния искривлений референсных ТВС на энерговыделение в активной зоне для 30–31-го топливных циклов был выполнен с использованием кодов CASMO5-SIMULATE5 [1, 2, 3, 4]. Расчетный комплекс CASMO5-SIMULATE5 разработки компании «Studsvik» Scand Power, Inc. используется в AO

«ОКБМ АФРИКАНТОВ» для нейтронно-физических расчетов активных зон реакторов PWR.

При проведении расчетов межкассетных зазоров использовались измеренные данные по искривлениям ТВС 3 блока АЭС «Ringhals». Термомеханические расчеты величины прогибов и распределения зазоров между ТВС были выполнены с использованием программного комплекса «ANSYS» [5].

На рис. 1 приведена сравнительная гистограмма распределения зазоров в активной зоне на конец 30–31-ой топливных загрузок с учетом измеренных величин и направлений прогибов ТВС различных типов на АЭС «Ringhals-3».

Картограммы расчетной модели активной зоны для 30-ой и 31-ой топливных загрузок с отображением топливных сборок, для которых были заданы увеличенные межкассетные зазоры, представлены на рис. 2 и рис. 3, соответственно. Для получения максимального эффекта влияния искривлений ТВС на энерговыделение учитывались зазоры более 3 мм, при этом уменьшение номинального зазора между сборками в расчетной модели не задавалось. На картограммах отмечена величина зазора и его местоположение относительно сторон топливной сборки. Значения зазоров для выделенных ТВС соответствуют результатам термомеханического расчета. Аксиальная форма искривления задавалась в виде косинуса.



Рис. 1. Распределения зазоров в активной зоне «Ringhals-3» для 30-31-ой топливных загрузок



Рис. 2. Картограмма расчетной модели активной зоны для 30-ой топливной загрузки с отображением топливных сборок с увеличенными межкассетными зазорами (мм)



Рис. 4. Изменение относительной мощности ТВС (%) в начале 30-го топливного цикла с увеличенными зазорами

Эффект увеличения энерговыделения в активной зоне (%) на начало 30–31-го топливных циклов приведен на рис. 4 и рис. 5.

Оператором АЭС «Ringhals-3» также высказывалось мнение, что на увеличение отклонений между рассчитанным и измеренным энерговыделением в активной зоне может влиять неопределенность коэффициентов гидравлических сопротивлений (КГС). На примере 30-ой топливной загрузки была произведена оценка влияния такого рода неопределенности на относительную мощность ТВС и максимальную относительную мощность твэла.

Программный комплекс SIMULATE5 позволяет задать коэффициент гидравлического сопротивления для различных типов дистанционирующих решеток. В расчете принято, что максимальная неопределенность значения КГС дистанционирующих решеток RFA-2 составляет 20 %, что примерно соответствует 10 % для полного КГС топливной сборки.



Рис. 3. Картограмма расчетной модели активной зоны для 31-ой топливной загрузки с отображением топливных сборок с увеличенными межкассетными зазорами (мм)



Рис. 5. Изменение относительной мощности ТВС (%) в начале 31-го топливного цикла с увеличенными зазорами

Тип TBC RFA-2 составляют наибольшую долю свежих TBC (73 %), доля их относительно всех сборок – 34 %.

Для получения наибольшего эффекта для всех ТВС данного типа значения КГС дистанционирующих решеток уменьшены на 20%. Уменьшение значения КГС приводит к увеличению расхода через топливную сборку, что в свою очередь приводит к уменьшению подогрева теплоносителя. Уменьшение подогрева за счет обратной связи по температуре вызывает увеличение энерговыделения в ТВС.

На рис. 6 и рис. 7 представлены изменения расхода теплоносителя через ТВС (%) и температуры на выходе (°С). Максимальное увеличение расхода составило 3 %, максимальное изменение температуры на выходе – 1,2 °С (0,4 %). Максимальное увеличение относительной мощности ТВС для типа RFA-2 составило 0,3 %.



Рис. 6. Изменение расхода теплоносителя через ТВС с учетом неопределенности КГС ДР для RFA-2 (%)

Проведенный анализ влияния увеличения межкассетных зазоров на энергораспределение в активной зоне на основании термомеханических расчетов распределения зазоров между ТВС и физических расчетов относительной мощности ТВС и максимальной относительной мощности твэла позволяет сделать следующие основные выводы:

– 95 % зазоров находятся в интервале 0-6,5 мм;

 среднее значение увеличения относительной мощности ТВС с увеличенными межкассетными зазорами для 30–31 топливного цикла составляет 1–1,2 %, максимальное увеличение – 2 %;

– среднее значение увеличения максимальной относительной мощности твэла для области с увеличенными зазорами для 30–31-ой топливной загрузки составляет 3,2–3,6 %, максимальное увеличение не превышает 7 %.

Также была произведена оценка влияния неопределенности коэффициентов гидравлического сопротивления дистационирующих решеток для определенного



Рис. 7. Изменение температуры теплоносителя на выходе ТВС с учетом неопределенности КГС ДР для RFA-2 (°С)

типа топливных сборок на энерговыделение в активной зоне. Максимальное увеличение относительной мощности ТВС на начало 30-го топливного цикла составляет 0,3 %, для принятой в расчете неопределенности КГС ДР для ТВС типа RFA-2 20 %.

Приведенные выше работы были выполнены в рамках договора с АО «ТВЭЛ».

Литература

1. SSP-07/431 Rev4 «CASMO5 A FUEL ASSEMBLY BURNUP PROGRAM User's Manual».

2. SSP-10/438 Rev3 «SIMULATE5 Advanced Three-Dimensional Multi-Group Reactor Analysis Code».

3. SSP-10/465 Rev2 «SIMULATE5 Methodology».

4. SSP-10/437 Rev3 «CMSLINK5 User's Manual».

5. ANSYS/LS-DYNA. Регистрационный № ПС – 736 от 27.12.11 г. Аттестационный паспорт № 327 от 18.04.13 г., выдан ФБУ «НТЦ ЯРБ.

СОЗДАНИЕ ТИПОВОЙ КД ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ТРУДОЕМКОСТИ ПРОТЕКАНИЯ ПРОЦЕССА ТПП ПО СПЕЦИАЛЬНОМУ РЕЖУЩЕМУ ИНСТРУМЕНТУ

<u>Е. А. Рыбкин</u>

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

Введение

Металлорежущий инструмент разнообразен по типоразмерам и конструктивным особенностям. При современном развитии машиностроения, его гибкости и высокой продуктивности, при технологической подготовке производства, появляется необходимость в быстром оснащении стандартным и специальным режущим инструментом.

Целью работы является разработка типовой конструкторской документации (КД), позволяющей дорабатывать стандартный режущий инструмент (ГОСТ) в специальный режущий инструмент, с минимальными временными затратами и минимальным набором дорабатываемых поверхностей с непосредственным сокращением времени на технологическую подготовку производства по оснащению специальным режущим инструментом.

Порядок прохождения заявки на специальный режущий инструмент

Цепочка прохождения заявки на изготовление специального режущего инструмента – средство технологического оснащения (СТО) включает в себя: технологическое бюро, бюро планирования, конструкторский отдел, инструментальный цех (рис. 1).



Рис. 1. Схема прохождения заявки на изготовление СТО

При применении типовой КД из цепочки заявки на изготовление СТО исключается конструкторский отдел. Это позволяет экономить не только основное время работы конструктора, но и ведет к сокращению вспомогательного организационного времени, связанного с согласованием, утверждением и регистрацией КД. Бюро планирования при этом исключает из плана работу конструкторского отдела (разработчика-исполнителя), а также не формирует дополнительных отчетов о разработке КД (т. е. приводит к сокращению дополнительного времени работы планировщика, который тратил до этого время на обработку информации, поступившей от конструктора), см. рис. 2.

При этом типовая КД позволяет расширить параметры и размерный ряд заказываемого специального режущего инструмента, дорабатываемого из инструмента, изготовленного по ГОСТ, что дает возможность заказчику с минимальным набором дорабатываемых поверхностей получать требуемый инструмент.



Рис. 2. Проектирование КД на СТО
Внедрение типовых чертежей. Выбор инструмента

Выбор типов инструмента, дорабатываемого из инструмента, выполненного по ГОСТ, продиктован непосредственной потребностью заказчика (технологического бюро) и изготавливаемым изделием.

Приоритетными типами инструмента, в которых нуждается заказчик, являются: сверла с направлением, сверла с прямым торцем, удлиненные сверла, пробойники, комбинированные пробойники, метчики с направлением, резцы радиусные с выгнутым профилем, резцы радиусные с вогнутым профилем, фрезы концевые, фрезы концевые радиусные.

На данный момент разработаны типовые чертежи:

- сверла с прямым торцем (рис. 3),
- сверла с направлением,
- пробойников,
- комбинированных пробойников,
- метчиков с направлением.

где D – диаметр сверла (указывается с допуском и принимается в зависимости от получаемого отверстия),

l – длина спиральной части сверла,

R – радиус при вершине пера сверла.

Передний угол γ и главный задний угол α зависят от обрабатываемого материала [1–4] и затачиваются согласно табл. 1 на рис. 3.

Пример условного обозначения сверла для обработки из стали (см. технические требования п.3 на рис. 3): $D \times l \times R - l - C$.

Пример условного обозначения сверла для обработки из чугуна (см. технические требования п.3 на рис.3): $D \times l \times R$ –2–46.

Заключение

На данный момент разработаны пять видов типовых чертежей, каждый из которых замещает определенное количество выпущенной ранее КД.



Рис. 3. Типовой чертеж на сверла с прямым торцем

Заказ сверла с прямым торцем

В качестве заготовок используются сверла по ГОСТ, согласно типовому чертежу имеется возможность заказа сверл с конусом Морзе.

Согласно чертежу, технолог при заказе определенного сверла указывает размеры: *D*, *l*, *R*, *puc*. (см. рис. 3),

Типовой чертеж сверла с прямым торцем замещают 450 обозначений, сверла с направлением – 120 обозначений, пробойники – 70 обозначений, комбинированные пробойники – 20 обозначений, метчики с направлением – 20 обозначений.

Процесс прохождения заявки с применением типовой КД позволяет экономить до 30 часов времени, входящего в цикл изготовления 1 ед. специального режущего инструмента.

Экономия времени достигается за счет расширения параметров и размерных рядов заказываемого специального режущего инструмента, дорабатываемого из инструмента, изготовленного по ГОСТ. А также за счет вывода из цепочки изготовления инструмента конструкторского отдела, что позволяет экономить не только основное время работы конструктора, но и ведет к сокращению вспомогательного организационного времени, связанного с согласованием, утверждением и регистрацией КД. Данные факторы значительно снижают себестоимость заказываемого специального режущего инструмента.

Разработанная КД включена в ПСР – проект «Снижение трудоемкости протекания процесса технологической подготовки производства по специальному режущему инструменту».

Литература

1. Боровский Г. В., Григорьев С. Н., Маслов А. Р. Справочник инструментальщика / Под редакцией А. Р. Маслова. – М.: Машиностроение, 2005. 464 с.

2. Справочник технолога-машиностроителя. В 2х т.: т. 2 / под ред. Косиловой А. Г. и Мещерякова Р. К., 4-е изд., перераб. и доп. – М: Машиностроение, 1986. 496 с.

3. Справочник токаря-универсала / под ред. Шеметова М. Г. и Безъязычного В. Ф. 2-е изд. – М.: Машиностроение, 2007. 576 с.

4. Справочник металлиста в 5 т.: т. 3 кн. 1 /под ред. Владиславлева В. С. // Раковский В. С. Металлокерамические твердые сплавы. – М.: МАШГИЗ, 1960. Гл. 7. 560 с.

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПРОФИЛЯ КОНВЕКЦИОННОГО МЕТОДА ОПЛАВЛЕНИЯ ПРИПОЯ

И. И. Силаева

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

Введение

Вся современная техника имеет «электронную начинку», основой которой в большинстве случаев является электронный узел, выполненный на печатной плате с паяными электронными компонентами. Для техники ответственного назначения одной из базовых характеристик является надежность функционирования. Задача любого производства – изготовить изделия с заданным уровнем надежности, обеспечив этот уровень специальной технологией изготовления. Задача технологов – технологически обеспечить надежность изделия в приемлемых условиях производства.

Для развития опытного и организации серийного изготовления приборов систем автоматики (СА) на заводе ВНИИЭФ был реализован проект по техническому перевооружению монтажно-гальванического цеха радиоэлектронной аппаратуры.

В рамках проекта были внедрены основные технологические процессы, такие как: изготовление многослойных печатных плат с металлизацией сквозных отверстий с соотношением толщины к диаметру 6:1; изготовление двусторонних печатных плат 4–5 класса точности; изготовление электронных блоков по технологии поверхностного монтажа; визуальный и рентгеновский контроль.

С целью успешного внедрения прогрессивной технологии поверхностного монтажа компонентов, производство было оснащено технологическим оборудованием по подготовке паяльной пасты; нанесению клея и пасты на плату; системой визуального контроля; установкой компонентов; конвекционной печи оплавления; системами отмывки, ремонта, рентгеновского контроля и функционального контроля; установки нанесения влагозащиты.

Внедрение пайки методом конвекционного оплавления позволило повысить уровень качества и надежность изделия, при этом сократить цикл изготовления и затраты выпускаемой продукции, тем самым повысить конкурентоспособность завода ВНИИЭФ.

В данной работе рассмотрена технология построения температурного профиля конвекционной печи оплавления припоя, которая позволила определить факторы, влияющие на формирование паяного соединения в конвекционной печи и облегчить решение задачи по повышению качества соединения за счет оптимизации термопрофиля, а так же дать оценку надежности такого соединения.

Температурный профиль конвекционной пайки

Оплавление паяльной пасты является основным методом формирования паяных соединений при сборке печатных узлов по технологии поверхностного монтажа. В конвекционной печи, имеющейся в монтажно-гальванического цеха радиоэлектронной аппаратуры, оплавление происходит путем нагрева печатной платы с компонентами. Плата продвигается через семь зон печи с заданными температурами. При правильном применении пайка оплавлением обеспечивает высокий выход годной продукции, ее высокую надежность и низкую себестоимость. Среди всех условий данного процесса температурный профиль пайки – один из наиболее важных моментов, определяющих уровень дефектов пайки. Основными факторами, влияющими на формирование температурного профиля пайки оплавления, являются: компоненты, печатные платы, паяльная паста, оборудование. График, по которому изменяется температура в печи и происходит пайка оплавлением, называется температурным профилем пайки (термопрофилем). Он представляет собой зависимость температуры нагрева в рабочей зоне от времени нагрева и имеет вид согласно рис. 1. [1]



Рис. 1. Температурный профиль пайки и его стадии: фронт 1 – постепенный нагрев с заданной скоростью до температуры предварительного нагрева; ступень 1 – выдержка; фронт 2 – нагрев до пиковой температуры, превышающей температуру плавления припоя; ступень 2 – небольшая выдержка и охлаждение с заданной скоростью

Фронты температурного профиля должны иметь определенный наклон, что необходимо для снижения теплового удара. Наклон фронта определяется свойствами паяльной пасты, требованиями, предъявляемыми изготовителями компонентов и конструкцией платы. Если нагрев оказывается слишком быстрым, это может привести к повреждению платы или компонентов, а так же неоптимальной работе паяльной пасты. Если нагрев слишком медленный, это необоснованно удлиняет операционный цикл пайки. Типичные значения скорости нагрева лежат в пределах от 2 до 3 °С/с.

Температурный профиль пайки можно разделить на четыре основные стадии, каждая из которых оказывает свое влияние на результаты пайки: предварительный нагрев; стабилизация (зона температурного выравнивания); оплавление; охлаждение.

Стадия предварительного нагрева

Данный этап позволяет снизить тепловой удар на электронные компоненты и печатные платы. В процессе предварительного нагрева происходит испарение растворителя из паяльной пасты. При использовании паяльных паст для «свинцовой» технологии предварительный нагрев рекомендуется осуществлять до температуры 95–130 °C, скорость повышения температуры 2–4 С/с.

Завышение скорости предварительного нагрева может приводить к преждевременному испарению растворителя, содержащегося в паяльной пасте.

Стадия стабилизации

Стадия стабилизации позволяет активизировать флюсующую составляющую и удалить избыток влаги из паяльной пасты. Повышение температуры на этой стадии происходит очень медленно. Стадию стабилизации также называют стадией температурного выравнивания, так как эта стадия должна обеспечивать нагрев всех компонентов на плате до одинаковой температуры, что предотвращает повреждение компонентов за счет теплового удара.

Максимальная активация флюса происходит при температуре около 150 °C. Рекомендуемое время стабилизации составляет 90–150 с. В конце зоны стабилизации температура обычно достигает 150–170 °C

Сокращение времени стабилизации может приводить к дефектам типа «холодная пайка» рис. 2 и эффекту «надгробного камня» рис. 3.



Рис. 2. Дефект «Холодная пайка»



Рис. 3. Эффект «Надгробный камень»

Стадия оплавления

На стадии оплавления температура повышается до расплавления припоя пасты и происходит формирование паяного соединения.

Для образования надежного паяного соединения максимальная температура пайки должна быть на 30–40 °C превышать точку плавления паяльной пасты и составлять 205–225 °C (на плате). Время, в течение которого печатная плата находится выше точки плавления (179–183 °C), должно быть в пределах 30–90 с, предпочтительно не более 60 с. Скорость повышения температуры в зоне оплавления должна составлять 2–4 С/с. Пиковая температура и время выдержки при температуре, выше точки плавления припоя, зависят от многих факторов и выбираются, как правило, для каждого изделия индивидуально.

Пониженные температура пайки и время выдержки обеспечивает слабую смачиваемость, особенно для компонентов с плохой паяемостью и могут привести к отсутствию плавления припоя, повышенные – к повреждению компонентов, платы, а так же к вскипанию флюса, что приводит к разбрызгиванию припоя с образованием дефекта « шарики припоя» рис. 4.



Рис. 4. Дефект «Шарики припоя»

Стадия охлаждения

Для обеспечения максимальной прочности паяных соединений скорость охлаждения должна стремиться к максимально допустимой. Рекомендуемая скорость охлаждения 3–4 С/с до температуры ниже 130 °С.

Завышение скорости принудительного охлаждения может приводить к возникновению больших внутренних напряжений в печатной плате из-за различного коэффициента теплового расширения базового материала печатных плат, корпусов компонентов, металлических печатных проводников и металлизированных отверстий.

Теоретическое построение профиля пайки является лишь исходной информацией для его создания. Несмотря на выше сказанное, окончательная корректировка температурного профиля выполняется инженером-технологом исходя из конструкции печатной платы; количества, типа и размеров компонентов; типа используемой паяльной пасты; особенностей используемого оборудования, а так же результатов экспериментальных паек для каждого печатного узла. Таким образом в технологии построения температурного профиля конвекционной печи оплавления нельзя обойтись без специалиста, знающего тонкости процесса.

Технология процесса построения температурного профиля конвекционной печи оплавления

Термопрофиль – это температурно-временная характеристика процесса пайки.

В процессе прохождения платы через конвекционную печь оплавления с помощью термопар осуществляется измерение и запись в память устройства составляющих температурно-временной характеристики, которые передаются в режиме реального времени на персональный компьютер и, с помощью специализированного программного обеспечения, отображаются на мониторе оператора.

Таким образом, инженер-технолог анализирует полученные характеристики и регулирует настройки системы пайки, а так же сохраняет, редактирует полученный профиль и использует его для других систем.

Для определения оптимальных параметров температурного профиля пайки ЭРИ, в качестве паяльного материала использовалась паста Sn 62U SS4M фирмы Almit, имеющая точку плавления 205–220 °C. В качестве экспериментальных образцов использовались платы разного размера, конфигурации и с различной плотностью монтажа.

Построение температурного профиля компонентов

Отработка процесса термопрофилирования проводилась на нескольких опытных партиях.

На первой партии плат, отрабатывались новые принципиальные технологические решения для завода ВНИИЭФ:

а) прогрессирующая технология поверхностного монтажа ЭРИ на печатную плату, включающая:

– нанесение паяльной пасты с помощью бестрафаретного принтера МУ Date 500;

 установка компонентов с помощью полуавтоматической системы компонентов FP-600; – пайка ЭРИ методом оплавления в печи конвекционного оплавления;

– контроль визуальный с помощью стереоскопической безокулярной системы LYNX и рентгенографический не разрушающий контроль на системе контроля компании Dage, основанной на критерии рентгенотовании оптически невидимых объектов, рис. 5.

б) технологии по установке и оплавлению элементов с размером корпуса от 0402 до BGA $(44 \times 44 \text{ мм})$, микросхем с шагом выводов 0,65 мм.

В первой опытной партии отрабатывался график зависимости температуры от времени на каждый из этих элементов. Для построения термопрофиля использовалась технология описанная ранее. Поскольку многие компоненты имеют недоступные для контактной пайки выводы (н-р BGA FipChip), при выполнении оплавления, термопары крепились на печатную плату, на элемент и с противоположной стороны платы под элемент. Манипулируя температурой воздуха, подаваемого в каждой зоне печи, добивались того, чтобы график реальной температуры в зоне пайки максимально соответствовал термопрофилю, рекомендованному для данного компонента.

Соблюдение термопрофиля имеет особое значение при пайке BGA-компонентов, выводы которых нагреваются только сквозь корпус компонента. Пайка без соблюдения термопрофиля приводит к перегреву корпуса BGA, так как он нагревается быстрее, чем выводы (шарики), контактирующие с менее нагретой платой. Только термопрофиль за счет теплового насыщения позволяет ограничить нагрев корпуса во время пайки и создать условия для нормальной работы флюса. Процесс конвекции служит лишь источником тепловой энергии, направляемой на компонент. Управляя температурой воздуха в конвекционном объеме, мы управляем количеством тепла, передаваемого компоненту. Поэтому для удобства программирования термопрофиля достаточно задавать эту температуру и время, с последовательной отработкой как минимум трех зон:

 – плавный предварительный подогрев до 100– 120 °С для предотвращения резких перепадов температур, которые особенно опасны, когда компонент в холодном состоянии;

 – зона стабилизации – длительная выдержка компонента при температуре 145–170 °С, позволяющая выровнять температуру внутри компонента и активировать флюс;

– и только после этого в зоне оплавления выполняется нагрев до температуры 205–220 °С, необходимой для растекания припоя и полного смачивания им паяемых контактов для получения качественного соединения.

Необходимо отметить, что при проведении опытов первой партии сборок, изготавливаемых по технологии поверхностного монтажа у образцов, после оплавления, выявлены дефекты пайки, рис. 5 и рис. 6:

 плохое смачивание; расползание пасты и образование перемычек;





Рис. 5. Рентгеновский снимок компонента BGA, смещение

Рис. 6. Смещение чип-компонента, пористость

 эффект «надгробного камня» рис. 4 и «холодная пайка» рис. 2;

 образование бусинок припоя «припойные шарики» рис. 3;

– капиллярное затекание припоя;

 – растрескивание компонента, а так же отслоение припоя или контактной площадки из- за внутренних напряжений;

- образование пустот;
- деформация паяных соединений;
- отсутствие контакта.

Такие результаты показали необходимость дальнейшей отработки процесса пайки методом оплавления.

Построение температурного профиля однотипных плат с разнородными компонентами

Далее необходимо было решить вопрос о совместимости режимов пайки разнородных компонентов в одном печатном узле. Для отработки температурного профиля во второй опытной партии использовались однотипные платы, на которые устанавливались разнородные компоненты рис. 7.



Рис. 7. Качественно выполненное оплавление паяльной пасты (фрагмент платы)

При проведении экспериментальных работ, для измерения температурно-временных характеристик

и построения оптимального температурного профиля термопары закрепляли в критических точках определяемых как: точка сильного нагрева, где установлен легкий элемент; точка слабого нагрева, где установлен тяжелый элемент, с большой «тепловой массой»; точка повышенной температурной чувствительности.

Изменяя температуру нагревателей, мы добивались того, чтобы вид термопрофиля максимально соответствовал виду кривой, показанной на рис. 1. Если на одной или более зон устанавливали максимально допустимую температуру, а температура на поверхности платы получалась ниже необходимой, увеличения последней добивались путем уменьшения скорости движения конвейера, либо путем увеличения времени, установленного на таймере.

По отработанному температурному профилю оплавление паяльной пасты произошло на хорошем уровне. Паяные соединения имеют глянцевый вид, проявляют признак смачиваемости и сцепления, что наглядно видно на рис. 7

Технологические тренировки (стойкость и прочность к воздействию климатических и механических факторов, проверка работоспособности) по программе и методике испытаний с целью подтверждения общих технических требований и правильности выбора оптимального термопрофиля опытная партия прошла успешно.

Построение температурного профиля плат разного размера, конфигурации и плотностью монтажа

В третьей партии (рис. 8) использовались платы разного размера (380×250 мм, 95×80 мм, \emptyset 70 мм), конфигурации и с разной плотностью монтажа (плата \emptyset 70 мм с двусторонним монтажом).

Необходимо было определить зависимость построения термопрофиля от размера и конфигурации платы, а так же плотности монтажа.

Первоначально сняли тепловой портрет для плат с большими размерами, используя нашу технологию процесса построения термопрофиля, и регулировали параметры установки до достижения оптимальных условий оплавления. Затем провели аналогичную работу для малогабаритных плат и плат с двусторонним монтажом элементов.



Рис. 8. Платы, используемые для выполнения третьего эксперимента (платы разного размера и конфигурации и с разной плотностью монтажа)

Применение оптимального температурного профиля платы большого размера для малогабаритных плат и плат с двусторонним монтажом, а так же оптимального температурного профиля малогабаритных плат для плат с двусторонним монтажом требовало подстройки термопрофиля пайки. Оптимального режима добивались увеличением скорости движения ленты конвейера, либо изменением режима одной, двух зон. По итогам экспериментов третьей опытной партии получены результаты, которыми можно руководствоваться при создании нового термопрофиля:

– любой метод быстрого нагрева изделия создает перепад температур. Величина этого перепада зависит от скорости нагрева, массы и геометрии изделия. Скорость нагрева может регулировать инженертехнолог, но при этом он не может контролировать изменения таких характеристик изделия, как размеры, форма и масса элементов, их теплопроводимость.

Опасения, связанные с перегревом элементов с высокой степенью черноты поверхности корпусов, не оправдались. Температура внутри несравнима с температурой поверхности ПП и быстро выравнивается вследствие теплопроводности и конвекции;

 при разработке температурного профиля следует учитывать, что реальная температура на плате в ходе выполнения стадий процесса пайки будет на 20–30 °С ниже установленной в печи конвекционного оплавления;

 – зоны предварительного нагрева и насыщения у различных термопрофилей, как правило, отличаются только длительностью. Длительность зоны плавления определяется во время первой экспериментальной пайки;

 – разная номенклатура компонентов на одном и том же размере печатной платы требует подстройки термопрофиля пайки; отработка термопрофиля позволяет существенно повысить эффективность процесса пайки, качество и надежность паяного соединения.

Следует обратить внимание на то, что оплавление плат с двусторонним монтажом в конвекционных печах по сравнению с другими способами оплавления выполняется за один проход. При этом сил поверхностного натяжения, используемой паяльной пасты, оказывается достаточно, чтобы удержать элементы, которые оказываются снизу (опыты проводились на интегрированных микросхемах в корпусах с выводами J-типа и чип-элементах). Однако, на стороне печатной платы, которая при пайке будет являться нижней, не следует устанавливать чипэлементы и микросхемы весом более 0,5 г. Это необходимо предусматривать при разработке топологии печатной платы и при разработке нового технологического процесса.

Высокое качество паяных соединений, полученных пайкой оплавлением в конвекционной печи по оптимальному термопрофилю, подтвердилось результатами визуального и рентгеновского контроля.

Испытания качества паяных соединений (после визуального и рентгеновского контроля, а так же измерения целостности электрических цепей) проводились в соответствии с требованиями указанными в конструкторской документации на сборки. Нами оценивалась вероятность безотказной работы основных конструктивных типов паяных соединений ЭРИ:

 в условиях предельно допустимых механических нагрузок, действующих на паяные соединения;

 в условиях изменения температуры окружающей среды от предельно повышенной до предельно пониженной, действующей на паяные соединения.

После окончания испытаний были проведены замеры сопротивления всех цепей и работоспособность сборок. Результаты измерений и внешний осмотр паяных соединений показали, что целостность измерительных цепей и, следовательно, паяных соединений не нарушена. Механических повреждений не обнаружено. Поэтому мы можем говорить о том, что технология процесса пайки оплавлением по температурному профилю в конвекционной печи состоятельна.

Выводы

В работе решены следующие задачи:

 разработана технология поверхностного монтажа разнородных компонентов;

 проведена экспериментальная отработка предложенной технологии и подтверждена ее состоятельность;

– проведен ряд испытаний, подтвердивших надежность полученных паяных соединений.

Проведены экспериментальные работы по монтажу ЭРИ, контролю паяных соединений и анализу полученных результатов. Результаты анализа, используются при технологической подготовке изделий к запуску в производство и непосредственно при производстве изделий (была откорректирована технология пайки поверхностного монтажа, учитывающая температуру, длительность проведения пайки, геометрические размеры паяного соединения и другие влияющие характеристики). Указанные рекомендации используются технологами и монтажниками при проведении операций монтажа изделий (дополнена и уточнена инструкция по применению конвекционной печи оплавления фирмы HELLER, позволяющая учитывать разнородность электронных компонентов).

Непрерывный мониторинг качества процесса пайки улучшает показатели качества монтажа печатных плат, обрабатываемых в печи. Создание индивидуального термопрофиля для каждой конфигурации печатной платы, архивация его для обеспечения возможности последующего использования, обеспечивает повторяемость процесса пайки конкретного типа плат и предотвращает возможность необратимых процессов, упрощает работу инженера и сокращает время, необходимое на настройку и отработку нового профиля оплавления в конвекционной печи. Вся измеряемая информация анализируется и обрабатывается технологом, это дает возможность планировать термопрофиль и настраивать параметры работы системы пайки, а так же мониторинга и контроля ошибок в работе, использование испытанного раннее термопрофиля на любой другой системе (например: ремонтный центр).

Такие возможности позволяют предотвратить нештатные ситуации в процессе производства, сократить временные затраты на разработку, планирование и проверку соответствия, повысить надежность и качество процесса пайки.

Литературы

1. Парфенов А. Температурный профиль конвекционной пайки.Что это такое? // Технологии в электронной промышленности. № 2. 2009.

2. Руководство по эксплуатации конвекционной печи оплавления фирмы HELLER.

ОСОБЕННОСТИ КОНТРОЛЯ ВИБРОСОСТОЯНИЯ ОСНОВНОГО РОТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЭНЕРГОБЛОКА АЭС

Д. С. Синицын

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

Введение

Предупреждение возникновения аварий на основном роторном оборудовании играет огромную роль в обеспечении безопасной эксплуатации энергоблока АЭС. В связи с этим предъявляются жесткие требования к вибродиагностике данного оборудования, что позволяет на ранней стадии выявить дефекты и прогнозировать дальнейшую работу жизненно важных элементов АЭС.

Большие габаритные размеры и массивные элементы основного роторного оборудования, представляющие собой сложную колебательную систему, требуют особо тщательно подходить к контролю вибросостояния, которое характеризует наличие дефектов, в составных частях оборудования. Появление повышенной вибрации приводит к значительным нагрузкам подвижных элементов конструкций и ускоряет их износ и старение. Контроль параметров вибрации насосных агрегатов усложняется большой вероятностью возникновения кавитационных эффектов, которые характеризуются гидравлическими ударами и могут быть причиной перегрузки измерительных каналов аппаратуры виброконтроля.

Основное роторное оборудование энергоблока АЭС

К основному роторному оборудованию энергоблока АЭС относятся:

 турбогенератор (ТГ), в состав которого входят паровая конденсационная турбина и генератор переменного тока, монтируемые на общем фундаменте;

– питательные насосные агрегаты с электро-(ПЭН) или турбоприводом (ТПН). ПЭН состоят из бустерного насоса, главного насоса и электродвигателя. В состав ТПН входят бустерный насос, главный насос и приводная паровая турбина с редуктором;

 – главные циркуляционные насосные агрегаты (ГЦН), состоящие из вертикального, центробежного, одноступенчатого насоса и выносного электродвигателя;

 – циркуляционные насосные агрегаты (ЦН), состоящие из осевого поворотно-лопастного вертикального или центробежного насосаи электродвигателя.

Выбор вибропреобразователя

Для контроля параметров абсолютной вибрации в качестве первичных преобразователей применяют следующие вибропреобразователи: – электродинамические вибропреобразователи, обладающие высокой помехозащищенностью, низким выходным сопротивлением, но вместе с тем ограниченным частотным диапазоном с достаточно большой нелинейностью АЧХ, сложной по реализации конструкцией и, как следствие, высокой ценой;

– зарядовые пьезоэлектрические вибропреобразователи получили широкое распространение по причине того, что имеют самые широкие диапазоны рабочих температур и частот, в общем случае, невысокую цену, но обладают низкой помехозащищенностью ввиду огромного выходного сопротивления, требуют применения усилителей заряда, расположенных в непосредственной близости. Увеличение помехозащищенности достигается путем применения экранирования, выставления особых требований по реализации цепей заземления, конструктивного обеспечения симметричности линий дифференциального выходавибропреобразователя и входа усилителя заряда,что неизбежно приводит к многократному росту цены.

- пьезоэлектрические вибропреобразователи со встроенной электроникой являются компромиссным решением. Они обладают достаточно широким частотным диапазоном и небольшой неравномерностью АЧХ и, вместе с тем, невысоким выходным сопротивлением и достаточной помехоустойчивостью за счет того, что усилитель заряда размещается непосредственно в корпусе вибропреобразователя. Поскольку технология их изготовления и схемотехнические решения реализации встроенных усилителей достаточно хорошо отработаны, то стоимость данных вибропреобразователей практически не отличается от стоимости доступных зарядовых вибропреобразователей. К недостаткам пьезоэлектрических преобразователей со встроенной электроникой следует отнести ограниченный диапазон рабочих температур, который определяется максимальной рабочей температурой компонентов, применяемых в схеме встроенного усилителя - как правило, он ограничен величиной 125 °C, но у некоторых производителей есть исполнения до 163 °С. Кроме того, следует отметить, что пьезоэлектрические преобразователи со встроенной электроникой имеют меньший динамический диапазон, чем зарядовые преобразователи, обусловленный наличием собственных шумов встроенного усилителя, что в большинстве случаев не накладывает ограничения по их применению.

Обеспечение электромагнитной совместимости

В ходе проведения работ по выбору оптимального построения измерительного канала абсолютной вибрации для использования на основном роторном оборудовании энергоблока АЭС в качестве предварительных оценочных испытаний на обеспечение требованиям электромагнитной совместимости были проведены испытания на воздействие статического электричества. Испытаниям были подвергнуты:

 зарядовые вибропреобразователи AP62 (ООО «Глобалтест»), 8324 («Брюль и Кьер»)с усилителями заряда 2661(«Брюль и Кьер») и встроенный в измерительный преобразователь ИВА-И (собственного производства);

– пьезоэлектрический вибропреобразователь со встроенной электроникой АРЗ6-100-01 (ООО «Глобалтест»), HT624A01 («РСВ Piezotrotronics»).

По результатам проведенных испытаний устойчивыми к воздействию статического электричества (до 16 кВ при воздушном разряде и 8 кВ – контактном) с критерием функционирования «А» признаны измерительные каналы на основе вибропреобразоваттеляАР36-100-01 и комплекта из вибропреобразователя 8324 с усилителями заряда 2661 («Брюль и Кьер»). На функционирование измерительного канала на основе вибропреобразователяНТ624А01 воздействие статического электричества оказывало незначительное влияние и при дополнительном экранировании соединительного кабеля его удавалось исключить.

Сочетание зарядовых преобразователей производства ООО «Глобалтест», усилителя заряда собственного производства и аппаратуры «Брюль и Кьер» не позволяло получить устойчивый к воздействию статического электричества измерительный канал, кроме полной реализации канала на оборудовании «Брюль и Кьер», что объясняется специальными мерами экранирования и обеспечением симметричности сигнальных цепей как в вибропреобразователе, так и в усилителе заряда. Следует отметить, что стоимость комплекта вибропреобразователя 8324 с усилителем заряда 2661 составляет порядка 4000 долларов, что на порядок превосходит стоимость вибропреобразователя АРЗ6.

Виброобследование основного роторного оборудования энергоблока АЭС

Для определения реальных уровней вибрации на конструктивных элементах роторного оборудования энергоблоков АЭС были проведены виброобследования с применением измерительного оборудования, имеющего частотный диапазон до 30 кГц (вибропреобразователь АР2030 и портативный анализатор спектра ультразвукового диапазона ZetlabA19-U2). Верхняя граничная частота выбрана из условий, что большинство промышленных пьезоэлектрических вибропреобразователей имеют резонансные частоты в полосе до 30 кГц.

По результатам проведенного виброобследования турбогенератора энергоблока № 2 Ростовской АЭС в режиме работы в сеть при загрузке 100 % уровни виброскорости на опорах турбины находятся в пределах 1-3 мм/с, основная мощность вибрации сосредоточена на основной оборотной гармонике, распределение по высшим оборотным гармоникам – практически экспоненциальное, с ростом номера гармоники уровень виброскорости падает. На опорах генераторавозбудителя уровень виброскорости на 3-ей оборотной гармонике несколько больше по сравнению с вибрацией на опорах турбины и составляет до 30 % от значения на оборотной гармонике, что обусловлено влиянием числа полюсов генератора. Максимальная амплитуда виброускорения на опорах турбогенератора не превышает 5 g в обследуемом частотном диапазоне.

При обследовании турбогенераторов энергоблоков № 2, 4 Балаковской АЭС при работе в сеть при загрузке 100 % и одновременном включении насосов гидроподъема ротора (НГПР) было выявлено, что при включении НГПР на подшипниках 1, 2 и 8 появляется высокочастотная (18–20 кГц) составляющая вибрации большой амплитуды (до 20 g и выше) в точке измерения, расположенной на верхнем бугеле подшипника, вероятной причиной которой является неравномерность потока масла на выходе из подшипника при возросшем давлении. Характерные спектры виброскорости и виброускорения при выключенном и включенном НГПР приведены на рис. 1.



Рис. 1. Спектры виброскорости: а – при выключенном НГПР, б – при включенном НГПР. Спектры виброускорения: в – при выключенном НГПР, г – при включенном НГПР

По результатам проведенного виброобследования турбопитательных насосов энергоблока № 2 Ростовской АЭС спектр вибрации ТПН2 не содержит высокочастотных составляющих большой амплитуды, основная мощность сосредоточена в низкочастотной области. На 8-ом подшипнике ТПН1 выявлено наличие непостоянной во времени высокочастотной вибрации амплитудой до 50 g. Типовой вид спектра, усредненного за 10 с, и мгновенного сигнала виброускорения представлен на рис. 2. По другим опорам ТПН1 вибрация на 14 кГц также присутствует, но ее амплитудные значения не превышают 10 g. Наличие высокочастотных составляющих было обусловлено дефектом в подшипнике, выявленном при вскрытии опоры.



Рис. 2. Параметры вибрации на подшипнике 8 ТПН1: а – спектр виброускорения, б – осциллограмма виброускорения

При виброобследовании циркуляционных насосов энергоблока № 2 Ростовской АЭС было установлено, что на камерах рабочего колеса (КРК) насосов спектр вибрации не имеет ярко выраженных составляющих, непостоянен во времени, амплитудные значения виброускорения периодически достигают 200 g (высокочастотные всплески). Типовой вид спектра, усредненного за 10 с и мгновенного сигнала виброускорения на КРК ЦН представлен на рис. 3. На нижнем подшипнике насоса ЦН спектр вибрации аналогичен КРК, но с гораздо меньшими амплитудными значениями – до 40 g. В остальных точках измерения вибрации корпуса ЦН высокочастотной вибрации с большими амплитудными значениями не наблюдается. Причиной возникновения высокочастотных ударных нагрузок на камерах рабочего колеса насосов является возникновение кавитационных процессов. Следует отметить, что наличие кавитации в насосах способствует разрушению их элементов и производителями насосного оборудования предусматриваются меры по исключению эффекта кавитации, однако высокочастотная вибрация, обусловленная их наличием, не несет информации о состоянии подшипниковых узлов агрегата и не должна учитываться при контроле

параметров вибрации насосного агрегата. Контроль наличия и интенсивности кавитационных процессов в насосах может быть реализован в виде отдельного диагностического канала.



Рис. 3. Параметры вибрации на КРК ЦНЗ: а – спектр виброускорения, б – осциллограмма виброускорения

Контроль допустимых значений вибрации на конструктивных элементах оборудования (опорах валопроводов) регламентируется ГОСТ 2954, ГОСТ 10816, ГОСТ Р 55265.2 - контролю подлежит среднеквадратическое значение виброскорости в диапазоне частот от 10 до 1000 Гц (от 2 до 1000 Гц – для оборудования с частотой вращения менее 600 об/мин). Наличие вибрации за пределами контролируемого частотного диапазона не должно оказывать влияния на результаты измерения контролируемой величины СКЗ виброскорости. Однако, вследствие того, что измерительные каналы имеют конечное значение амплитудного диапазона, воздействие на вибропреобразователь ускорений, имеющих большие значения амплитуд, могут приводить к ограничению сигнала в измерительном тракте и, следовательно, к искажению результатов измерения в полосе 10-1000 Гц.

Возможной причиной регистрации ложных завышенных результатов измерения вибрации на оборудовании может являться наличие высокочастотных составляющих виброускорения, имеющих амплитудные значения большие, чем амплитудный диапазон вибропреобразователей. Кроме того, высокочастотная вибрация может совпадать с резонансной частотой пьезоэлемента вибропреобразователя и, в данном случае, при воздействии вибрации амплитудой меньшей, чем амплитудный диапазон вибропреобразователя, возможно насыщение его усилителя. Наличие указанной составляющей вибрации зависит от режима работы оборудования и может быть следствием неравномерности потока смазки в подшипниковых узлах, а также возникновением кавитационных процессов в камерах рабочих колес насосов, о чем свидетельствует ее проявление в характерных точках измерения и непостоянство во времени. Экспериментальное

определение предельных значений уровней высокочастотной вибрации по результатам обследования вибросостояния затруднено, т.к. произвести измерения во всех режимах работы и заданном техническом состоянии оборудования практически невозможно.

Выбор типа вибропреобразователя и предъявляемые требования

Очевидно, что с точки зрения стоимостных характеристик оборудования контроля вибрации и достижения необходимых требований по электромагнитной совместимости неоспоримыми преимуществами обладают пьезоэлектрические вибропреобразователи со встроенной электроникой.

Для исключения влияния воздействия высокочастотных составляющих вибрации, имеющих большие амплитудные значения виброускорения, при выборе вибропреобразователя необходимо предусмотреть достаточный запас по амплитудному диапазону. Но увеличивая амплитудный диапазон вибропреобразователя, получаем увеличение собственных шумов измерительного канала вследствие небольшого значения динамического диапазона пьезоэлектрических преобразователей со встроенной электроникой. Ограниченное значение динамического диапазона обусловлено наличием собственного шума встроенного усилителя, который в силу жестких ограничений по габаритным размерам имеет в своей основе простейшие схемотехнические решения.

Например, вибропреобразователь АРЗ6-100-02 имеет амплитудный диапазон 25g и уровень СКЗ шума 0.0003 g, а у АРЗ6-10-02 амплитудный диапазон 250 g, но и уровень СКЗ шума также на порядок выше 0,003 g. Ситуация усугубляется еще и тем, что контролю подлежит значение виброскорости в то время как выходным сигналом данных вибропреобразователей является виброускорение и, после интегрирования выходного сигнала вибропреобразователя получаем достаточно высокое значение собственных шумов виброскорости, т. к. интенсивность шумов обратно пропорциональна частоте. Так для измерительного канала, реализованного на АРЗ6-100-02 уровень собственных шумов составляет менее 0,01 мм/с, на АРЗ6-10-02 – уже до 0,07 мм/с, что при диапазоне измерения 20 мм/с позволяет достичь динамического диапазона измерения не более 30 дБ.

Исходя из изложенного выше, целесообразным является выбор вибропреобразователя и его адапта-

ция под задачи контроля вибрации конкретного оборудования. По результатам проведенных работ по контролю вибрации турбинного оборудования были выбраны вибропреобразователи AP36-30-02 (для обеспечения диапазона рабочих температур 125 °C) и AP36-30-03 (для обеспечения диапазона рабочих температур 150 °C), имеющие амплитудный диапазон 75 g.Фильтр низкой частоты встроенного усилителяс частотой среза 5 кГц обеспечивает практически полное подавление резонансного выброса на AЧX вибропреобразователя.

Для контроля вибрации элементов насосного оборудования использование пьезоэлектрических акселерометров с встроенной электроникой крайне затруднительно ввиду наличия на элементах насосов виброускорений амплитудой до 200 g и необходимостью контроля вибрации от 2 Гц (для насосов частотой вращения менее 600 об/мин). По данной причине базовым вибропреобразователем, используемым для контроля вибрации насосного оборудования, нами был предложен пьезоэлектрический велосиметр AV04 – пьезоэлектрический преобразователь со встроенной электроникой, у которого встроенный усилитель реализован по схеме интегратора, причем интегрирование происходит в его первом каскаде, что обеспечивает устойчивость к воздействию виброускорения не менее 2000 g.

По результатам испытаний на электромагнитную совместимость схемы вибропреобразователей АРЗ6 и AV04 доработаны установкой дополнительных фильтров, препятствующих прохождению электромагнитных импульсов, наведенных в выходных цепях вибропреобразователя на вход встроенного усилителя через емкость пьезокристалла, а также введением дополнительного экранирования в выходной кабель.

Выводы

По результатам проведенных работ был оптимизирован состав вибропреобразователей для реализации измерительных каналов контроля параметров вибрации основного роторного оборудования энергоблока АЭС. Правильность принятых технических решений подтверждается отсутствием нареканий к работе данных вибропреобразователей в составе систем вибродиагностики на оборудовании энергоблоков Ростовской АЭС, Балаковской АЭС, Белоярской АЭС, Нововоронежской АЭС.

ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ СИСТЕМ АКТИВНОЙ ВИБРОЗАЩИТЫ МАЛОГАБАРИТНОЙ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ

Ю. Г. Сметанина, А. В. Иванов, А. А. Куфтин, С. А. Калмыков

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

Высокие требования по точности и надежности функционирования малогабаритной бортовой аппаратуры (МБА) при вибрационных воздействиях ставят перед разработчиками ряд проблем, для решения которых требуется поиск новых эффективных концептуальных подходов, основанных на применении интеллектуальных систем, способных длительно и автономно функционировать в экстремальных условиях. Электронная МБА, устанавливаемая на подвижных объектах, работает при интенсивном воздействии вибрации в широком диапазоне частот, что приводит к возникновению резонансных колебаний печатных плат ячеек электронной аппаратуры. Известно, что наиболее сильное негативное влияние вибрационные воздействия оказывают на печатные платы, расположенные внутри блоков МБА на нескольких точках крепления. Воздействие вибрации на радиоэлектронные устройства вызывает в них различные явления. Например, в индуктивностях и трансформаторах наблюдаются явления магнитострикции и изменения магнитной проницаемости сердечников, в конденсаторах наблюдается микрофонный эффект, некоторые типы резисторов обладают пьезоэффектом, в диодах, транзисторах и интегральных микросхемах возникают тензорезистивный эффект, эффект смещения энергетических уровней и изменения ширины запрещенной зоны в полупроводниках.

Приборы МБА подвергаются воздействиям различных типов вибрации в диапазоне от 3 до 3000 Гц при ускорении 2-40 g. Для снижения влияния вибрационных нагрузок на МБА существуют активные и пассивные средства защиты, а также гибридные совместное использование активных и пассивных. Основой всех пассивных систем являются упругий и демпфирующий элементы, такие как прокладки, демпферы, амортизаторы, дополнительные ребра жесткости и пр. Пассивные системы позволяют смягчить ударное воздействие и погасить колебания в устройстве, широко применяются в лабораторных и промышленных условиях. При этом существует достаточная теоретическая база, наработки, которые подтверждают их надежность, эффективность и неприхотливость в эксплуатации. На данный момент широко применяется заливка МБА полимерными компаундами [1], амортизирующие платформы [2]. Однако пассивные системы не всегда бывают эффективными. Среди недостатков можно отметить заметное увеличение габаритов прибора, снижение эффективности на низких частотах, отсутствие возможности изменить

подавляемую частоту, а также во многих случаях сложность или невозможность замены деталей и частей прибора, что негативно отражается на ремонтопригодности и влияет на применение модульной конструкции устройств. Также повышается стоимость каждой ошибки ввиду отсутствия возможности ремонта при высоких стоимостях элементов.

Возможным решением подобных проблем является применение активных средств виброзащиты, в общем случае, они относятся к числу многомерных, многосвязанных систем автоматического управления волновым полем. Такие системы предназначены для снижения перемещения элементов МБА во всем требуемом диапазоне частот, что обеспечивается присутствием гасителей вибровоздействия с дополнительным источником энергии. В состав систем активной виброзащиты (САВ), рис. 1, как правило, входят акселерометры для обнаружения и фиксации колебаний, микропроцессорные системы анализа колебаний и формирования управляющих сигналов – блок управления, а также механизм реализации активной компенсации, генерирующий противофазные колебания - устройство компенсации. САВ формируют с помощью компенсируюизлучателей дополнительное гасящее поле ших с требуемыми пространственными и частотными характеристиками. Наложение на исходное поле гасящего поля приводит к их взаимной компенсации.

Анализ создания подобных систем показывает, что практически все они подчинены общей концепции – установке защищаемого устройства на виброзащитную платформу. Общий вид схемы виброзащиты представлен на рис. 1 [3, 4].



Рис. 1. Схема виброзащиты

Применение подобных систем значительно увеличивает массогабаритные характеристики и сложность конструкции, а соответственно и себестоимость изделия. В то время, как разработчики постоянно сталкиваются с дефицитом полезного объема в изделии (например, ракеты-носителя, ракеты и пр). Поэтому актуальной задачей является разработка нового устройства для снижения вибрационных воздействий с условием минимальных габаритов.

Предлагается концепция расположения системы активной виброзащиты непосредственно на защищаемом объекте – плате, рис. 2. На печатной плате *1* вместе с остальнымиэлектрорадиоизделиями (ЭРИ) должны быть установлены акселерометр 2 для снятия показаний воздействия вибраций, блок управления – микропроцессор 4, обрабатывающий сигнал с датчика и преобразующий его, а также устройство компенсации – вибратор 3.



Рис. 2. Схема малогабаритной активной системы гашения вибраций:1 – печатная плата защищаемого устройства, 2 – акселерометр, 3 – генератор вибраций, 4 – микропроцессор, 5 – функциональные элементы защищаемого устройства

Адаптивная система автоматического управления, получая сигнал с акселерометров, рис. 3, обрабатывает его при помощи алгоритма микропроцессора, корректирует генерируемые противофазные вибрации, необходимые для гашения колебаний. Вибрационные воздействия в такой системе рассматриваются с точки зрения цифровой обработки сигналов.

Важной проблемой при расширении рабочей полосы частот является возникновение условий для положительной обратной связи, и вместо ослабления наступает неустойчивая работа системы, а на некоторых частотах даже самовозбуждение, проявляющееся в резком возрастании амплитуд колебаний системы. Возможный вариант решения этой проблемы – исследования модальных характеристик защищаемого изделия на этапе разработки при помощи методов имитационного моделирования.



Рис. 3. Структурная схема САВ

Как известно, наиболее опасной для конструкции является первая собственная частота колебания изделия, т. е. избежав ее появления, не будет явления резонанса. 3D модель изделия можно рассчитать при помощи компьютерного моделирования и метода конечных элементов. Пример расчета первой собственной частоты колебания печатной платы представлен на рис. 4.



Рис. 4. Форма собственных колебаний конструкции (имитационное моделирование). Первая собственная частота колебания данной конструкции 1112 Гц

Математическая модель компенсации вибровоздействий показана на рис. 5.

Зная модальные характеристики прибора, можно прогнозировать поведение изделия при вибронагрузках и предотвращать их: когда частота колебания платы будет приближаться к значению первой собственной частоты, блок управления подаст на устройство генерации сигнал в противофазе и условий резонанса можно будет избежать, рис.5,6.



Рис. 5. Математическая модель компенсации вибровоздействий: - - - входной сигнал; ____ компенсирующий сигнал

Основной проблемой является то, что точный вид вибрации. от которой приходится зашишаться. неизвестен, поэтому весомая часть создания активной системы виброзащиты связана с рядом теоретических проблем. Отсутствие разработанной теории анализа и синтеза подобных малогабаритных систем виброзащиты затрудняет реализацию несложной на первый взгляд задачи компенсации. Рассмотрим действие защищаемого устройства как задачу управления движением защищаемой механической системы, а динамические воздействия, вызывающие соответствующее изменение параметров - как управление, рис. 6. Таким образом, для анализа и синтеза виброзащитной системы можно воспользоваться теорией автоматического управления [5]. На рис. 6,а изображена защищаемая конструкция, на которую воздействует виброзащитная система, создающая силу U(t), приложенную в точке С и имеющую постоянную линию действия. Такое устройство является динамическим гасителем, который предназначается для уменьшения перемещения x(t) точки С по линии действия силы. На рис.6б показана структурная схема системы, где x(t) – выход системы, U(t) – сила, создаваемая генератором вибраций. U(t) зависит от конструкции гасителя и формирует управление, зависящее от x(t). Иными словами, осуществляется функциональная связь вида:

$$\mathbf{U}(\mathbf{t}) = \Phi \{ \mathbf{x}(\mathbf{t}) \}$$

где Ф – некоторый оператор, учитывающий особенности воздействия и конструкции.



Рис. 6. САВ с точки зрения задачи управления: а – конструкция, на которую воздействует виброзащитная система, б – структурная схема

Для определения оператора Ф необходимо определить модель амортизируемого объекта. что усложняется нерегулярностью структуры радиоэлектронных приборов. Массы конструкции заменяются несколькими сосредоточенными массами, распределенные и диссипативные свойства конструкции также заменяются сосредоточенными элементами жесткости и неупругих сопротивлений. Для исследования распространения волн в объекте можно воспользоваться методами численного имитационного моделирования, но для описания закона компенсирующего воздействия необходима аналитическая модель, так как она обеспечивает необходимую глубину анализа. Но при построении аналитической модели поведения амортизируемого объекта приходится идти на упрощение реальных явлений, это позволяет изучить только некоторые свойства сложной системы. Например, известно, что при возникновении явления резонанса, все точки крепления движутся синфазно. Если фазу одной из точек крепления смещать в диапазоне от 0° до 180°, то амплитуда результирующих кривых уменьшается с увеличением смещения фаз [6], рис. 7.

Однако смешение фазы той же точки крепления от 180° до 360° приводит к обратному результату: увеличение амплитуды с увеличением смещения фазы, рис. 8.

Таким образом, расположив генератор вибраций ближе к одной из точек крепления, можно наоборот спровоцировать возникновение условий резонанса. Поэтому с увеличением сложности защищаемой платы, увеличением количества компонентов на ней все больше усложняются динамические связи всех элементов, а вместе с тем и аналитическая модель. Также присутствие на плате элементов с большой массой смещает центр масс и, соответственно, точку основного воздействия. Таким образом, необходимо определять аналитическую модель защищаемого устройства для каждого конкретного случая, при этом учитывать взаимосвязь всех элементов платы, чтобы вывести закон управления САВ.



Рис. 7. График зависимости резонанса платы от смещения фазы одной из точек крепления от 0° до 180°



Рис. 8. График зависимости резонанса платы от смещения фазы одной из точек крепления от от 180° до 360°

Еще одной важной проблемой является техническая реализация устройства. Кроме задачи анализа, важное значение имеет определение параметров вибрационного устройства, совершающего требуемые колебания. И если миниатюрные акселерометры и микросхемы для обработки данных представлены на современном рынке, например, миниатюрные линейные вибропреобразователи предприятия Global-Test серии AP1019 массой не более 0,18 г и размерами: Ø 3 × 3,6мм отвечают требованиям по габаритам, тореализация миниатюрного виброгенератора (вибровозбудителя) на данный момент является задачей разработчиков. Наиболее подходящим в данных условиях является электромагнитный вибровозбудитель, так как обладает рядом достоинств: простотой регулирования амплитуды вибрации и возможность ее регулирования при работе устройства, надежностью и долговечностью, что обусловлено отсутствием пар трения, возможностью применения в одном устройстве несколько одновременно действующих вибровозбудителей без специальных мер по обеспечению синхронизации [7]. Однако, ситуация усложняется тем, что силы, создаваемые электромагнитными возбудителями, определяются не только параметрами электромагнита, но и параметрами (жесткостями, массами и т.д.) связанной с ним колебательной системы. Это объясняется взаимодействием механических и электромагнитных процессов вибровозбудителя. Высокие воздействия вибрации на МБА требуют большой компенсирующей силы, возможность технической реализации которой на данный момент не определена.При этом необходимо учитывать негативное воздействие электромагнита на ЭРИ. Поэтому окончательная схема подобного вибровозбудителя возможна при конкретном описании модели защищаемого устройства, а затем на основе ее определение закона управления виброгенератором.

Таким образом, после проведения анализа существующих средств виброзащиты, была разработана концепция системы активной виброзащиты малогабаритной бортовой аппаратуры, выбрана и проанализирована математическая модель работы устройства, а также разработана его структурная схема. Но, не смотря на кажущуюся простоту решения проблемы виброзащиты фазовым сдвигом гасящего воздействия, существует проблема определения аналитической модели устройства активной виброзащиты, установленной непосредственно на защищаемом объекте – плате, от этого зависит и техническая реализация генератора вибраций, при этом готовых решений не выявлено.

Литература

1. Иванов А. В., Куфтин А. А., Демарева А. И. и др. Защита малогабаритной бортовой аппаратуры от вибрационных и ударных воздействий // Проектирование и технология радиоэлектронных средств. 2015. № 2.

2. Пат. 2410583 РФ, МПК F16F 3/08. Устройство для защиты / Кузьмин Э. Н., Малков М. В., Панкратова Н. М., Прыкин В.А. // Бюл. № 3 27.01.2011.

3. Пат. 2406620РФ, МПК В60G 17/015. Система активной виброзащиты и стабилизации / Фурунжиев Р. И., Хомич А. Л. // Бюл. № 35 20.12.2010.

4. Автор А. А. Активное гашение вибраций на поезде ICE1 // Ж. д. мира. 2004, № 5. С. 51–54.

5. Коловский М. З. Автоматическое управление виброзащитными системами. – М.: «Наука», 1976.

6. Лысенко А. В. Информационно-измерительная система управления активной виброзащитой радиоэлектронных устройств: Диссертация канд. техн. наук. – Пенза, 2014.

7. Вибрации в технике / Под. ред. Э. Э. Лавендела, Т. 4. Вибрационные процессы и машины. – М.: «Машиностроение», 1981.

8. Елисеев С. В., Нерубенко Г. В. Динамические гасители колебаний. – Новосибирск: Наука, 1982.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА АВТОНОМНОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ

<u>Н. В. Федотов</u>, В. А. Садчикова, Е. А. Никифоров, И. А. Егоров, А. В. Белугин, А. В. Романов

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

Представлено описание разработанного в РФЯЦ-ВНИИЭФ автономного источника питания. Рассмотрены возможные варианты материалов теплоизоляции для защиты от отрицательных температур аккумуляторной батареи источника питания. Дано обоснование выбора конструкции источника питания. Представлены расчеты нестационарного теплового режима источника питания и результаты проведенных испытаний на опытном образце.

Введение

Для обеспечения питания переносной пультовой аппаратуры необходим автономный источник питания (ИП) с длительной сохранностью энергии и работоспособностью в жестких режимах разряда в широком диапазоне температур при обеспечении высокой механической прочности. Разработка ИП велась в соответствии с техническим заданием на составную часть опытно-конструкторской работы (ОКР). Целью выполнения составной части ОКР являлась разработка ИП для питания переносной пультовой аппаратуры со встроенным индикатором снятой емкости, взамен аккумуляторных батарей на базе аккумуляторов КНП-А, применяемых для аналогичных целей.

Выбор способа теплоизоляции

В соответствии с ТЗ ИП должен быть работоспособным при температуре окружающей среды от минус 50 до плюс 50 °С. АБ 23 НКМ-5, используемая в ИП, обеспечивает электрические характеристики при температуре от 0 до плюс50 °С. Время, в течение которого температура АБ достигнет 0 °С при помещении ИП из среды с температурой плюс 20 °С в среду с температурой минус 30 °С, должно быть не менее 2 ч.Срок хранения ИП должен быть не менее 16 лет. ИП должен быть стоек к воздействию атмосферных выпадающих осадков с интенсивностью от 3 до 7 мм/мин, быть работоспособным после воздействия многократных механических ударов с ускорением 39 м/с² и после падения с высоты 0,5 м. Для выполнения этих требований ТЗ АБ должна быть помещена в кожух-корпус, имеющий соответствующую тепловую проводимость, герметичность и достаточную прочность.

Для теплоизоляции АБ от внешней среды рассматривались как материалы, разрешенные к применению отраслевым стандартом: пенопласт ППС, полистирол ПСВ, пенополиуретан ППУ, войлок АТИМ,

так и применение готового корпуса – кейса «Корсар». Рабочая температура пенополиуретана ППУ от минус 40 до плюс 100 °С и срок хранения не более 10 лет. Войлок имеет высокое водопоглощение, низкую стойкость к воздействию плесневелых грибов, а также плотность 90 кг/м³ (плотность ППС17 равна 17 кг/м³). Кейс «Корсар» требовал значительных доработок для установки индикатора снятой емкости. Выбор был сделан в пользу полистирола вспенивающегося ПСВ-С, с формообразованием непосредственно в металлический кожух. Как материал-заменитель выбран полистирольный ППС17 пенопласт плиточный и ПС-1-100 в виде пластин, приклеиваемых к стенкам кожуха. Выбранные материалы имеют коэффициент теплопроводности $\lambda = 0.04$ Вт/м·К.

В процессе проектирования рассматривались различные варианты компоновки ИП. В результате был выбран вариант конструкции, представленный на рис. 1. Тепловая схема ИП представлена на рис. 2. В тепловой схеме не показана проводимость металлического кожуха (лист АМц.М 1,5) и в последующих расчетах она соответственно не учитывалась.



Рис. 1. Компоновка ИП: 1 – кожух; 2 – крышка; 3, 4, 5 – теплоизоляция; 6 – индикатор снятой емкости; 7 – АБ; 8 – текстолитовые втулки; 9 – ручка для переноски



Рис. 2. Тепловая схема ИП: t_{Ab} —температура Ab; t_c температура среды; σ_{Bk} — проводимость воздушной прослойки за счет конвекции; σ_{Bn} — проводимость воздушной прослойки за счет излучения; σ_{BT} — проводимость воздушной прослойки за счет теплопроводности; σ_{H3} — проводимость пенопластовой теплоизоляции; $\sigma_{корк}$ — проводимость корпус-окружающая среда за счет конвекции; $\sigma_{корл}$ — проводимость корпус-окружающая среда за счет излучения Внутренние размеры оболочки теплоизоляции определяются размерами AB($260 \times 85 \times 133$) мм, величиной воздушного зазора и равны $l_1 = 275$ мм, $l_2 = 137$ мм, $l_3 = 189$ мм. Для определения толщины слоя теплоизоляции и соответственно внешних размеров оболочки теплоизоляции необходимо вычислить темп охлаждения *m*, c⁻¹, который должен иметь ИП [1]:

$$m = \frac{1}{\tau_{12}} \ln \frac{t_1 - t_c}{t_2 - t_c},$$
 (1)

где τ_{12} время, требуемое для охлаждения АБ, до температуры t_2 , с; t_1 – начальная температура АБ, °С; t_2 – конечная температура АБ, °С.

Подставляя в формулу (1) время $\tau_{12} = 10800$ с и остальные величины из T3 ($t_1 = 20$ °C, $t_2 = -30$ °C), получаем темп равным 4,73·10⁻⁵c⁻¹.

При этом темп охлаждения также определяется по формуле [2]:

$$m = \frac{\sigma}{C},\tag{2}$$

где σ – тепловая проводимость от АБ к внешней среде, Вт/К; C – тепловая емкость АБ, Дж/К.

Зная темп охлаждения ИП, и, используя усредненные коэффициенты теплоотдачи от кожуха в среду, между АБ и оболочкой теплоизоляции, можно определить требуемую толщину слоя теплоизоляции.

АБ имеет объем 0,0029 м³ и массу 6,6 кг, что соответствует плотности 2276 кг/м³. Для упрощения предполагаем, что АБ изготовлена из однородного материала и по коэффициенту теплопроводности и удельной теплоемкости идентична сплаву АМц. Тогда тепловая емкость АБ определяется по следующей формуле:

$$C = c_{\rm p} \cdot M, \qquad (3)$$

где $c_{\rm p}$ – удельная теплоемкость АБ, Дж/кг·К; M – масса АБ, кг.

Тепловая проводимость от АБ к внешней среде определяется по формуле [3]:

$$\sigma = \frac{1}{\sigma_{\rm AB}^{-1} + \sigma_{\rm BO3,I}^{-1} + \sigma_{\rm W3}^{-1} + \sigma_{\rm KO,K}^{-1}},$$
(4)

где σ_{Ab} – тепловая проводимость Ab, Bt/K; $\sigma_{возд}$ – тепловая проводимость воздушного зазора между Ab и теплоизоляцией, Bt/K; $\sigma_{и_3}$ – тепловая проводимость теплоизоляции, Bt/K; $\sigma_{кож}$ – тепловая проводимость от кожуха ИП к окружающей среде, Bt/K.

В формуле (4) неизвестна только проводимость теплоизоляции. Тепловая проводимость АБ[4]:

$$\sigma_{AE} = \frac{2\lambda_{AE}S_{AE}}{L_{AE}},\tag{5}$$

где λ_{AE} – коэффициент теплопроводности АБ, Вт/м·К; S_{AE} – площадь поверхности АБ, м²; L_{AE} – определяющий размер АБ, м. Определяющий размер АБ:

$$L_{\rm AE} = 0,254\sqrt{S_{\rm AE}}\,,\tag{6}$$

Проводимость воздушной прослойки от АБ к внутренней поверхности теплоизоляции[2]:

$$\sigma_{\text{возд}} = (\alpha_{\text{KB}} + \alpha_{\pi}) \cdot S_{\text{B}} + (\alpha_{\text{KF}} + \alpha_{\pi}) \cdot S_{\text{F}}, \quad (7)$$

где $\alpha_{\rm KB}$ – коэффициент теплоотдачи конвекцией для вертикальной прослойки, Вт/м²·К; $\alpha_{\rm K\Gamma}$ – коэффициент теплоотдачи конвекцией для горизонтальной прослойки, Вт/м²·К; $\alpha_{\rm A}$ – коэффициент теплоотдачи излучением, Вт/м²·К; $S_{\rm B}$ – площадь вертикальной поверхности АБ, м²; $S_{\rm \Gamma}$ – площадь горизонтальной поверхности АБ, м².

Для определения тепловой проводимости от кожуха ИП в окружающую среду необходимо знать внешние размеры кожуха. Принимая в первом приближении толщину теплоизоляции равной 50 мм, получаем размеры ($375 \times 290 \times 289$) мм и площадь поверхности кожуха $S_{\rm нп} = 0,602$ м². Тогда тепловую проводимость от кожуха ИП в окружающую среду можно определить по формуле [2]:

$$\sigma_{\rm KOW} = 9S_{\rm MII},\tag{8}$$

Таким образом, предполагая, что оболочка телоизоляции образована двумя кубами с общим центром, можно определить требуемую толщину слоя теплоизоляции [2]:

$$\delta = \frac{6l^2 \cdot \lambda}{\sigma_{_{\rm H3}} - 12^3 \sqrt{l_1 \cdot l_2 \cdot l_3} \cdot \lambda},\tag{9}$$

Выполняя расчет по формулам (3)–(9), получаем в первом приближении $\delta = 35$ мм. Корректируя размеры кожуха, получаем во втором приближении $\delta = 34$ мм. Эта величина была использована при разработке рабочей документации (РКД) опытного образца ИП.

На этапе разработки РКД были проведены испытания макета ИП, в котором в качестве теплоизоляционного материала был использован войлок АТИМ-8 10,0, имеющий коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,04$ Вт/м·К. Корпус макета был изготовлен из листа АМц М2. АБ крепилась через втулки из текстолита непосредственно к корпусу. Войлок был уложен в четыре слоя, что дало толщину 40 мм. Воздушный зазор между АБ и слоем войлока был равен 10 мм. Испытание макета ИП на воздействие пониженной температуры минус 50 °С показало время охлаждения корпуса АБ до 0 °С не менее 2 ч что видно по рис. 3.

Расчет нестационарного теплового режима

Исходными данными для расчета нестационарного теплового режима являются : габариты кожуха ИП ($347 \times 262 \times 235$) мм; масса ИП 12 кг ;внешние размеры теплоизоляции($343 \times 258 \times 231$) мм; внутренние размеры теплоизоляции ($275 \times 189 \times 140$) мм; масса АБ 6,6 кг; масса кожуха 4 кг; коэффициенты

теплопроводности – АБ и кожуха117 Вт/м·К, воздуха 0,027 Вт/м·К, теплоизоляции 0,04 Вт/м·К.



Рис. 3. График охлаждения корпуса АБ при температуре минус 50 °C

Температура АБ при помещении ИП в окружающую среду с температурой t_c изменяется в течении времени τ в соответствии с выражением [1]:

$$t_{AE} = e^{-\tau m} (t_1 - t_c) + t_c, \qquad (10)$$

Темп охлаждения системы АБ – оболочка *m* вычисляется по следующим формулам[5]:

$$m = \frac{a_1 - \sqrt{a_1^2 - 4b_1}}{2},$$

$$a_1 = m_{\text{KOW}} + m_{\text{AE}}(1+\beta),$$

$$b_1 = m_{\text{KOW}} m_{\text{AE}},$$

$$\beta = C_{\text{AE}} / (\psi C_{\text{KOW}}),$$

$$m_{\text{KOW}} = \sigma_{\text{KOW}} / \psi C_{\text{KOW}},$$

$$m_{\text{AE}} = \sigma_{\text{AE-KOW}} / \psi C_{\text{AE}},$$
(11)

где C_{AB} , C_{KOW} – теплоемкости AB и кожуха; Ψ – критерий неравномерности температурного поля AB; σ_{AB-KOW} – тепловая проводимость от AB к кожуху (воздушной прослойки и теплоизоляции).

Критерий неравномерности определяется по формуле:

$$\psi = 1 / \left(\sqrt{H^2 + 1,44H + 1} \right),$$

$$H = \frac{\sigma K}{\lambda_{\Delta E} V_{\Delta E}},$$
(12)

где σ – тепловая проводимость определяемая по формуле (4); *К* – коэффициент формы АБ [2, с. 68].

Тепловая проводимость от кожуха в окружающую среду определялась для средней температуры минус 20 °С по методике [2, с.70]. При определении коэффициента конвективного теплообмена не учитывалось уменьшение перегрева ИП по отношению к среде и соответственно уменьшение критерия Грасгофа. Проводимость воздушной прослойки за счет конвекции и излучения определялась по формуле (7).

Тепловая проводимость за счет кондукции оболочки из воздуха и оболочки пенопластовой теплоизоляции определялась по формуле [3]:

$$\sigma = \frac{\lambda (L_z l_y - L_y l_z) (L_x - l_x)}{\delta_{x1} \delta_{x2} \ln (L_z l_y) / (L_y l_z)} + \frac{\lambda (L_x l_z - L_z l_x) (L_y - l_y)}{\delta_{y1} \delta_{y2} \ln (L_x l_z) / (L_z l_x)} + , \qquad (9)$$
$$+ \frac{\lambda (L_y l_x - L_x l_y) (L_z - l_z)}{\delta_{z1} \delta_{z2} \ln (L_y l_x) / (L_x l_y)},$$

где λ – коэффициент теплопроводности материала; L_x , L_y , L_z – внешние размеры оболочки, м; l_x , l_y , l_z – внутренние размеры оболочки, м; δ_{x1} , δ_{x2} , δ_{y1} , δ_{y2} , δ_{z1} , δ_{z2} – толщины стенокоболочки, м.

Расчеты выполнялись с помощью Mathcad. Темп охлаждения системы АБ-воздушная прослойка –теплоизоляция – кожух получился равным $3,662 \times 1^{-5}$ с⁻¹. Результат расчета по формуле (8) для температуры среды минус 30 °C представлен на рис. 4.



Рис. 4. Расчетное изменение температуры АБ в течении времени

Испытания на воздействие отрицательных температур

Для подтверждения требований ТЗ были проведены испытания по определению температурных кривых охлаждения ИП при воздействии отрицательных температур и определению температурной кривой отогрева ИП перед применением после воздействия отрицательной температуры.

При проведении испытаний использовалось следующее оборудование:

термокамера MC-81P;

 мультиметр APPA-109N с измерительными термопарами – 2 шт.;

измеритель температуры и влажности Center 314.

Термопары располагались в ИП в соответствии с рис. 5.

Результатами испытаний стали кривые охлаждения ИП при воздействии отрицательной температуры окружающей среды, показанные на рис. 6 и рис. 7,и кривая отогрева ИП после воздействия отрицательной температуры окружающей среды, представленная на рис. 8.



Рис. 5. Размещение измерительных термопар внутри ИП: 1 – Термопара 1 (располагается на корпусе АБ); 2 – Термопара 2 (располагается в центре АБ между аккумуляторами)

Время сохранения положительной температуры ИП при температуре окружающей среды минус 15 °C – 7 ч, при температуре окружающей среды минус 30 °C – 4 ч, при температуре окружающей среды минус 50 °C – 3 ч. Вся информация приведена в руководстве по эксплуатации на ИП. Испытания опытного образца подтвердили требования T3.



Рис. 6. График зависимости температуры в центре АБ от времени при охлаждении в режимах минус 50 °C, минус 30 °C, минус 15 °C



Рис. 7. График зависимости температуры корпуса АБ от времени при охлаждении в режимах минус 50 °С и минус 30 °С



Рис. 8. График зависимости температуры в центре АБ от времени при отогреве с температуры минус 50 °С

Литература

1. Дульнев Г. Н., Теория тепло- и массообмена. - СПб.: НИУИТМО, 2012.

2. Дульнев Г. Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. –М.: Высш. шк., 1984.

3. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: Справочник / Под общей ред. В. А. Григорьева и В. М. Зорина. – М.: Энергоиздат, 1982.

4. Справочник конструктора РЭА: Общие принципы конструирования / Под ред. Р. Г. Варламова. – М.: Сов. Радио, 1980.

5. Кондратьев Г. М., Дульнев Г. Н. Платунов Е. С., Ярышев Н. А. Прикладная физика: Теплообмен в приборостроении. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2003.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭКРАННЫХ СВОЙСТВ ЭКРАНИРУЮЩИХ ОБОЛОЧЕК

Н. А. Прудкой, И. А. Куприянов, <u>Л. И. Чиркова</u>

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

Введение

Для обеспечения защиты от электромагнитных воздействий при проектировании аппаратуры реализуются мероприятия по обеспечению экранирования проводных линий, соединяющих блоки аппаратуры между собой и с внешними системами.

В изделиях РФЯЦ-ВНИИЭФ по условиям эксплуатации в качестве экранов линий связи применяются гибкие металлические оболочки (плетенки). В настоящее время отечественной промышленностью наряду с традиционными плетенками (ПМЛ) выпускается много новых типов экранирующих материалов, предназначенных для экранирования линий связи. В технической документации, как правило, характеристики защитных свойств экранов, применяемых для защиты линий связи, отсутствуют или приведены в виде, неприемлемом для оценки их эффективности применительно к защищаемым объектам. Имеющиеся теоретические модели позволяют предсказывать экранные свойства традиционных плетенок из металлических проволок, однако точность этих моделей невысока. Задача расчета защитных свойств экранных оболочек с более сложной структурой (многослойные экраны, объемные экранирующие оболочки) на сегодняшний день пока не решена и вряд ли будет решена в обозримом будущем из-за сложности и многофакторности задачи. Также отсутствуют методы расчетной оценки экранных свойств соединителей в экранированном исполнении. Поэтому единственный надежный источник достоверных данных о характеристиках экранирования оболочек – экспериментальные исследования.

Для обеспечения возможности выбора оптимальных по защитным свойствам и массогабаритным характеристикам экранирующих оболочек была разработана методика измерения сопротивления связи, ориентированная на применение анализаторов цепей.

О сопротивлении связи и его теоретических моделях

Традиционно в аппаратуре для экранирования линий связи используются металлические плетенки. В качестве количественной меры защищенности экранированных кабелей будем использовать сопротивление связи. Сопротивление связи Z_{coup} для кабеля определяется через соотношение:

$$Z_{coup} = \varepsilon_{\Delta x} / I_{sc} \Delta x,, \qquad (1)$$

где I_{sc} – ток, протекающий в экране; $\varepsilon_{\Delta x}$ – напряжение, создаваемое этим током на бесконечно малом участке внутреннего проводника Δx .

Сопротивление связи содержит составляющую, которая связывает ток экрана с продольным электрическим полем внутри экрана (диффузионная составляющая), а также составляющую, обусловленную взаимной индуктивностью, между экраном и жилой. Поэтому для полного сопротивления связи можем записать:

$$Z_{coup} = R_d + Z_h \,. \tag{2}$$

где R_d – диффузионная составляющая сопротивления связи; Z_h – индуктивная составляющая.

Аналитическое выражение для R_d может быть получено в предположении, что экран ведет себя как сплошная труба, имеющая то же погонное сопротивление, что и плетенка:

$$R_{d} = R_{0} \frac{t \cdot \sqrt{\frac{i2\pi f \,\mu_{sc} \mu_{0}}{\rho_{sc}}}}{sh\left(t \cdot \sqrt{\frac{i2\pi f \,\mu_{sc} \mu_{0}}{\rho_{sc}}}\right)},\tag{3}$$

где *t* – толщина эквивалентного трубчатого экрана; *f* – частота; ρ_{sc} – удельное сопротивление материала экрана; μ_{sc} – удельная относительная магнитная проницаемость материала экрана; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \, \Gamma$ н/м – магнитная постоянная; R_0 – сопротивление экрана постоянному току; $t = \frac{0,67d}{\sqrt{\cos \alpha}}$,

d – диаметр экрана, α – угол плетения плетенки.

Для того чтобы записать (3) в компактном виде, введем обозначение:

$$\eta = t \sqrt{\frac{2\pi\mu_{sc}\mu_0}{\rho_{sc}}} , \qquad (4)$$

тогда

$$R_d = R_0 \frac{\eta \sqrt{if}}{sh(\eta \sqrt{if})}.$$
(5)

Что касается индуктивной составляющей сопротивления связи, на сегодняшний день известно две основные теоретические модели. Первая разработана Венсом [2].

В модели Венса:

$$Z_h = i2\pi f M_c, \tag{6}$$

где M_c – постоянная величина, которая называется индуктивность связи.

Согласно модели Венса, на низких частотах доминирует диффузионная составляющая и сопротивление связи падает с частотой. С некоторой частоты преобладающей становится индуктивная составляющая и сопротивление связи растет пропорционально частоте. Типовая частотная зависимость сопротивления связи по Венсу представлена на рис. 1. Однако согласно экспериментальным данным, для многих кабелей фактическая частотная зависимость на высоких частотах лежит в диапазоне между $\Box \sqrt{f}$ и $\Box f$, т. е. сопротивление связи растет медленнее, чем предсказывает теория Венса. Рядом исследователей было предприняты попытки модернизировать модель Венса, чтобы добиться лучшего соответствия теории и эксперимента.



Рис. 1. Характерные зависимости сопротивления связи от частоты

Итогом этих попыток стала теория Клейна, который предложил следующее выражение для индуктивной составляющей сопротивления связи [3]:

$$Z_{h} = i2\pi f M_{c} + e^{i\frac{3}{4}\pi} 2\pi f L_{s}(f), \qquad (7)$$

где $L_s(f) = a/\sqrt{f}$ – так называемая скин-индуктивность, обусловленная той частью магнитного потока, которая проникает внутрь плетенки через материал экрана; *a* – постоянная величина, определяемая конструктивными параметрами экрана.

Методика измерения сопротивления связи

Измерения сопротивления связи проводят на специальных образцах, изготовленных из радиочастотного кабеля. Для этого у кабеля удаляется защитная диэлектрическая оболочка, а штатная оплетка заменяется плетенкой, свойства которой подлежат исследованию. Часть подготовленного для исследований образца помещают в триаксиальную линию. Устройство триаксиальной линии, рекомендованной МЭК [4], поясняет рис. 2.

Металлическая труба и кабель с исследуемой плетенкой образуют систему двух связанных линий «экран – труба» и «экран – жила». Линия «экран – труба» является короткозамкнутой на одном конце. Электромагнитная волна, бегущая со стороны генераторного порта анализатора, отражается от места короткого замыкания, и в линии «экран – труба» образуется стоячая волна. Поместим начало отсчета координат в месте короткого замыкания этой линии. Тогда ток стоячей волны можно описать уравнением:

$$I_{sc}(x) = I_m \cos(\beta_{sc} \cdot x), \qquad (8)$$

где I_m – действующее значение тока в пучности; $\beta_{sc} = i \sqrt{\epsilon_{sc}} \frac{\omega}{c}$ – фазовая постоянная линии «экран – труба»; ϵ_{sc} – относительная диэлектрическая проницаемость изоляции линии «экран-труба»; x – расстояние от точки короткого замыкания до точки наблюдения.



Рис. 2. Схематическое изображение триаксиальной линии

Под действием тока, текущего в линии «экран – труба» в линии «жила – экран» возникает распределенный источник ЭДС $\varepsilon_w(x) = I_{sc}(x)Z_{coup}$.

Воспользуемся обобщенной теоремой об эквивалентных источниках и на участке связи линию «экран – жила» представим в виде эквивалентной схемы рис. 3.



Рис. 3. Эквивалентная расчетная схема линии «жила – экран»

Напряжения (U_b, U_e) на согласованных концах линии «жила – экран», определяющие эквивалентные источники тока и напряжения, можно найти по формулам:

$$U_b = \frac{I_m Z_{coup}}{2} A,$$
(9)

$$U_e = -\frac{I_m Z_{coup}}{2} e^{-i\beta_w l_w} B, \qquad (10)$$

$$A = \int_{0}^{l_{w}} \cos(\beta_{sc} x) e^{-i\beta_{w} x} dx, \qquad (11)$$

$$B = \int_{0}^{l_{w}} \cos(\beta_{sc} x) e^{i\beta_{w} x} dx, \qquad (12)$$

где $\beta_{wc} = i \sqrt{\varepsilon_w} \frac{\omega}{c}$ – фазовая постоянная линии «жила–экран»; ε_w – относительная диэлектрическая проницаемость изоляции линии «жила – экран».

Как следует из (9, 10), потенциально сопротивление связи может быть определено по измерениям напряжения на ближнем или дальнем конце. Введем для определяемого по измерениям напряжения на ближнем конце сопротивления связи обозначение Zb_{coup} , а сопротивление связи, определяемое по измерениям на дальнем конце, обозначим Ze_{coup} .

$$Zb_{coup} = \frac{2U_b}{I_m A}.$$
 (13)

$$Ze_{coup} = \frac{2U_e}{I_m B}.$$
 (14)

При помощи триаксиальной линии, рекомендованной МЭК, определяется сопротивление связи по измерениям на ближнем конце Zb_{coup} , так как отсутствует физическая возможность измерения напряжения на дальнем конце. Нами предложена альтернативная методика, в основе которой лежит определение напряжения на согласованных концах линии «жила – экран» путем пересчета результатов измерений напряжения на ближнем конце линии «жила – экран» в опытах короткого замыкания и холостого хода на дальнем конце этой линии. Для этого вместо согласующей нагрузки на дальнем конце линии с исследуемой плетенкой устанавливается коммутатор, позволяющий менять режим работы линии. Наша методика позволяет одновременно определять Zb_{coup} и Ze_{coup} . Идеи, заложенные в основу предложенной методики, поясняет рис. 4.



Рис. 4. Эквивалентная схема измерения сопротивления связи экранирующей оболочки при помощи триаксиальной линии. U_g – напряжение на согласованном генераторном порте анализатора; R_g – собственное сопротивление генераторного порта анализатора; R_{iz} – собственное сопротивление измерительного порта анализатора; K – ключ, меняющий режим работы кабеля; l_w – длина участка, на котором линии «экран-труба» и «экран-жила» имеют электромагнитную связь; l_s – общая длина линии «экран – труба»

Как следует из эквивалентной расчетной схемы линии «жила – экран», при закороченном дальнем конце напряжение на согласованном ближнем конце равно:

$$U_{ccb} = U_b - U_e e^{-i\beta_w l_w}.$$
 (15)

Если исследуемый кабель разомкнут на дальнем конце, напряжение на согласованном ближнем конце равно:

$$U_{ocb} = U_b + U_e e^{-i\beta_W l_W}.$$
 (16)

Если сложить результаты измерений при закороченном и разомкнутом конце, имеем:

$$U_{ccb} + U_{ocb} = 2U_b; \tag{17}$$

$$Zb_{coup} = \frac{U_{ccb} + U_{ocb}}{I_m A}.$$
 (18)

Если вычесть результаты измерений при закороченном и разомкнутом дальнем конце, получаем:

$$U_{ocb} - U_{ccb} = 2U_e; \tag{19}$$

$$Ze_{coup} = \frac{U_{ccb} - U_{ocb}}{I_m e^{-i2\beta_w l_w} B}.$$
 (20)

Величину тока в пучности найдем из уравнений линии для закороченной на конце линии «экран – труба»:

$$2U_g - R_g I_g = iI_m Z_{sc} \sin(\gamma_{sc} l_s);$$

$$I_g = I_m \cos(\beta_{sc} l_s).$$
(21)

Из этих уравнений следует:

$$I_m = \frac{2U_g}{\left[iZ_{sc}\sin\left(\beta_{sc}l_s\right) + R_g\cos\left(\beta_{sc}l_s\right)\right]}.$$
 (22)

Таким образом, получаем следующие расчетные соотношения для определения сопротивлений связи по результатам измерений:

$$Zb_{coup} = \frac{S_{cc} + S_{oc}}{2A} \times$$

$$\times \left[iZ_{sc} \sin(\beta_{sc}l_s) + Z_0 \cos(\beta_{sc}l_s) \right];$$
(23)

$$Ze_{coup} = \frac{S_{cc} - S_{oc}}{2Be^{-i2\beta_w l}} \times [iZ_{sc}\sin(\beta_{sc}l_s) + Z_0\cos(\beta_{sc}l_s)], \qquad (24)$$

где S_{cc} , S_{oc} – коэффициенты передачи между генераторным и измерительным соединителями триаксиальной линии в режимах короткого замыкания и холостого хода дальнего конца линии, соответственно «жила– экран»; β_w , β_{sc} – фазовые постоянные линий «жила– экран» и «экран – труба», соответственно; Z₀ = 50 Ом – волновое сопротивление портов анализатора.

В идеале сопротивления связи на ближнем и дальнем концах должны быть одинаковыми. Однако на практике они различаются. Это различие определяется: наличием неучитываемого канала передачи энергии из линии «экран – труба» в линию «жила – экран» из-за емкостной связи; неоднородностью исследуемой оболочки; неточностями изготовления триаксиальной линии; погрешностями анализатора цепей. Поэтому по результатам измерений подбирается аппроксимирующая функция в виде огибающей по большим значениям Zb_{coup} и Ze_{coup} , а разность $Zb_{coup} - Ze_{coup}$ используется в качестве критерия

корректности проводимых измерений.

Примеры применения разработанной методики

На рис. 5 представлена установка для измерения сопротивления связи на которой была реализована данная методика. В качестве примеров ее применения на рис. 6 и рис. 7 приведены полученные с ее помощью частные зависимости сопротивлений связи и их аппроксимации по Клейну двух современных типов экранирующих плетенок. Аппроксимирующая функция подбиралась в виде огибающей для Zb_{coup}

и Ze_{coup} одновременно.



Рис. 5. Внешний вид установки для измерения сопротивления связи и устройство «триаксиальной линии»: 1 — металлическая труба; 2 – кабель с исследуемой плетенкой; 3 – коммутатор.



Рис. 6. Результаты измерения сопротивления связи плетенки ПЭМ МС 6-0,06 (ТУ 4833-004-66158671-2011)



Рис. 7. Результаты измерения сопротивления связи плетенки ПЭМ Н 6-0,1 (ТУ 4833-004-66158671-2011

Выводы

Разработана методика измерений сопротивления связи экранирующих оболочек кабельных линий с помощью триаксиальной линии и анализатора цепей. Методика позволяет получать частотные зависимости сопротивления связи, по которым можно оценить защитное действие экранирующих оболочек различных типов с целью выдачи рекомендаций по их дальнейшему применению.

В качестве примера применения разработанной методики в докладе представлены результаты экспериментальных исследований сопротивления связи плетенок ПЭМ МС 6-0,06 (ТУ 4833-004-66158671-2011) и ПЭМ Н 6-0,1 (ТУ 4833-004-66158671-2011).

Литература

1. Broyde F. Comparison of Coupling Mechanisms on Multiconductor Cables, IEEE Trans. EMC, Vol. 35, No 41, 1993, P/ 409–416.

2. Vance E. Shielding effectiveness of braided-wire shields, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. EMC-17, P. 71–77, May 1975.

3. Kley T. Optimized single-braided cable shields, IEEE Trans. EMC, Vol. 35, No 1, 1993, P. 1–9.

4. IEC-Standard 1196-1 (1995-05), 12. Screening effectiveness.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ТОКА

<u>Е. П. Шаплыгин</u>, А. С. Агафонцев, А. В. Мунин

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

Введение

Целью данной работы является оптимизация производственного процесса, увеличение объемов производства и снижение себестоимости изготовления химических источников тока (ХИТ) в РФЯЦ-ВНИИЭФ с применением инструментов производственной системы Росатома (ПСР) и технического перевооружения производственной базы.

Краткая характеристика конструкции ХИТ

РФЯЦ-ВНИИЭФ производит XИТ двух видов: ампульные, тепловые.

Конструкция ампульного ХИТ (АХИТ), рис. 1, основана на раздельном хранении электролита в ампуле сильфонного типа и электродных секций. Электродные секции изготовленны на основе лития, разделенных герметично между собой специальной мембраной, которая при задействовании ХИТ разрезается специальным устройством, обеспечивая вытеснение электролита в электродные секции в результате сжатия сильфона под действием газа, вырабатываемого газогенератором. При химическом взаимодействии лития и электролита на силовых контактах источника тока появляется электрический потенциал.



Рис. 1. Конструкция АХИТ

Конструкция теплового ХИТ (ТХИТ), рис. 2, основана на хранении компонентов электрохимического элемента, состоящего из катода, электролита и анода, в твердом состоянии, не взаимодействующих химически при нормальных условиях. При разогреве электрохимического элемента (ЭХЭ) до рабочей температуры 600 °C от пиротехнических нагревателей происходит переход компонентов ЭХЭ в состояние ионной проводимости с последующей химической реакцией между литием и хлором и появлением электрического потенциала на силовых выводах ТХИТ, при этом время работы ТХИТ определяется падением рабочей температуры до состояния перехода компонентов ЭХЭ в твердое состояние и на порядок меньше времени работы АХИТ.



Рис. 2. Конструкция ТХИТ

Основные технологические переделы производства ХИТ

Для изготовления деталей, составных частей и окончательной сборки ХИТ применяются 2024 технологических процессов, в т.ч.:

входной контроль материалов, химических компонентов;

конструкторское сопровождение;

 изготовление деталей и составных частей XИТ (комплектующих);

изготовление порошка титана;

проведение контрольных испытаний;

 сборка и проведение приемо-сдаточных испытаний (ПСИ) ХИТ;

аттестация ПТС.

В производстве ХИТ в РФЯЦ-ВНИИЭФ задействованы завод ВНИИЭФ – головной изготовитель и подразделения-соисполнители, рис. 3 и рис. 4.

Завод ВНИИЭФ осуществляет изготовление деталей сборочных единиц (ДСЕ), сборку, пооперационный и окончательный контроль ХИТ с предъявлением их представителю заказчика.



Рис. 3. Кооперация в части изготовления ТХИТ



Рис. 4. Кооперация в части изготовления АХИТ

Отделения соисполнители:

 проводят контрольные проверки составных частей и приемо-сдаточные испытания ХИТ;

изготавливают ДСЕ из состава ХИТ (сильфоны, изолятор и крышку);

изготавливают комплекты ДСЕ для ХИТ на станках с ЧПУ;

 изготавливают титановый порошок и ленту пиротехническую, а также осуществляют ПСИ ленты и составов;

 производят литий ортосиликат - ортофосфат и оксид ванадия (III), входящие в состав электрохимических элементов ХИТ.

Проект «Производственная система Росатома (ПСР)»

На заводе ВНИИЭФ реализован проект ПСР «Двукратное увеличение выпуска химических источников тока...»

Целью проекта, на первом этапе, являлось увеличение производительности труда при производстве продукта в два раза за счет:

 – ликвидации разного рода («низко висящих») потерь по времени,

 – резкого снижения объема изготавливаемых партий продукта,

 построения потока единичных изделий при изготовлении продукта.

 организации процесса изготовления продукта по времени такта.

Целью проекта, на втором этапе, являлось снижение себестоимости за счет:

сокращения цикла изготовления продукта,

– экономии фонда оплаты труда в результате отказа от приема дополнительных рабочих,

- экономии средств, запланированных на покупку оборудования и снижения стоимости части ДСЕ за счет грамотной кооперации.

Одним из главных итогов реализации проекта ПСР стало создание непрерывного потока производства продукта.

Создание непрерывного потока производства продукта включает следующие этапы:

определение семейства продуктов,

 определение границ процесса создания продукта (потока создания ценностей (ПСЦ)),

картирование ПСЦ.



потерь при межоперационном перемещением деталей с построением схем межоперационного перемешения («диаграмм спагетти») ДСЕ ХИТ.

При анализе производственного процесса изготовления выбранного продукта (ХИТ) производился сбор следующих показателей на каждом этапе обработки (рис. 6, 7):

 определение режима работы (выполняемая операция, на рис. 6 – рабочий элемент)

время такта;

время цикла каждой операции;

время периодической работы;

загрузка персонала.

В ходе производственного анализа были выявлены следующие проблемы:

- неритмичная поставка ДСЕ ХИТ от цеховкооператоров;

- большие перемещения в процессе изготовления ХИТ:

 работа с большими партиями изготавливаемого продукта;



Перемещение механики Перемещения на ПСИ

Организация рабочего места для ПСИ Перемещения газогенераторов

Рис. 5. Картирование 1-го уровня ПСИ – приемо-сдаточные испытания, ПЗ - контроль представителем заказчика

Ο

В качестве продукта выбраны ХИТы (АХИТы и ТХИТы).

Выбор обусловлен рядом причин:

- высокий удельный вес сотрудников, занятых в изготовлении продукта (ХИТ),

- серийность продукта;
- наличие проблем при производстве продукта;
- технологическая сложность ПСЦ.

После выбора продукта были определены границы описания ПСЦ и проделано картирование ПСЦ (рис. 5), а так же разработаны технологические планировки участков изготовления ХИТ, с указанием мест (участков) применения ПСР – решений расстановки технологического оборудования с минимизацией

 длительное ожидание представителей отдела технического контроля (ОТК) и ПЗ:

- большое количество брака.

Для решения выявленных проблем были предложены, а в дальнейшем реализованы следующие предложения:

- разделение производственных потоков на ТХИТ и АХИТ;

 организация «производственной ячейки» – объединение специализированной группы рабочих и оборудования для изготовления ХИТ в одном месте:

технологические улучшения;

– разработка и внедрение новой оснастки и приспособлений;

концентрация производства ХИТ на заводе _ ВНИИЭФ.

Лист наблюдения ручной работы

~	0 77777 4100									05 001 4		
Состав. От: ТХИТ АКЗ Части До:			Участ	Участок: ХИТ				Дата: 08.07.2014 г.				
		Время	Время такта: 376'16"80				Подготовлено:					
№	Рабочий элемент - t	Точка отсчёта	1	2	3	4	5	t min (t)	Кол-во отрегул. (С)	t отрегул. (t+C)=D	<u>Колеба-</u> ння (A-t)	Комментарин
10	Установка в оправку для сварки	касание оправки	<u>50"28</u>	51"81	53"15)	_	50″ ₂₈		50″ ₂₈	2" ₈₇	
11	Проверка электропараметров и	касание мегаомметра.	<u>1′45″₆₇</u>	1′47″ ₃₈	(1'50"16	$\rangle -$	—	1'45″ ₆₇		1'45″ ₆₇	4" ₄₉	
12	Упаковка в контейнер	касание контейнера	27″ ₅₃	28"40	<u>25″42</u>	—	—	25″ ₄₂		25″ ₄₂	2"98	
13	Выгрузка из линии (бокса)	касание ручки шлюза	<u>48"56</u>	50"42	51"35	$\rangle -$	—	48″ 56		48″ ₅₆	2"79	
_	переход	1 шаг	1'10" ₂₄	1'08"68	1'16"46	. —	_	1'08" ₆₈		1'08" ₆₈	7" ₇₈	
14	Сварка лазерная	касание оправки со сборкой	<u>4′08″ 19</u>	4'20"03	4'17"23	_	_	4′08″19		4′08″19	11" ₈₄	
—	переход	1 шаг	1′06″ 86	<u>1'05"42</u>	(1′09″14)		_	1'05"42		1'05" ₄₂	3"72	
15	Загрузка в линию (бокс)	касание ручки шлюза	1'00"00	57"00	<u>54"00</u>	_	—	54″ ₀₀		54″ ₀₀	6" 00	
16	Выгрузка из линии (бокса)	касание ручки шлюза	50" ₄₉	52"16	<u>49"73</u>	_	_	49"73		49″ ₇₃	2"43	
—	переход	1 шаг	1'10" ₂₄	<u>1'08"68</u>	1'16"46		_	1'08" ₆₈		1'08" ₆₈	7"78	
17	Проверка на герметичность, упаковка в контейнер	касанне контейнера	<u>15′52″₁₆</u>	17'28"85	16'42"73	—	—	15'52''16	1'00" ₀₀	16'52'' ₁₆	1'36"69	
—	переход	1 шаг	1'10" ₂₄	1'08"68	(1'16"46)	-	_	1'08"68		1'08" ₆₈	7"78	
18	Упаковка	касание контейнера	17'00"	16'00" ₀₀	<u>15'00"₀₀</u>	_	_	15'00" ₀₀	1'00" ₀₀	16'00" ₀₀	2'00" ₀₀	
		Σ	79'18'' ₇₉	(81'36"44)	—	—	—	77'15''07	2'03"72	79'18'' ₇₉	7'23"56	
				\sim								
$\sum_{C=0}^{T} t = 0$	$= 77'15''_{07}$ T - $\Sigma t = 79'18''_{79} - 77'115''_{79}$	₀₇ =2'03" ₇₂		Условни Х Зачер	<i>не знаки:</i> кнуть оши	ібку;(Обве	сти наибол	.время (А)	;Подч	еркнуть на	<u>иим</u> . Время (t)

Рис. 6. Лист наблюдения ручной работы



Рис. 7. Таблица сбалансированной работы

Разделение производственных потоков на ТХИТ и АХИТ

Разделение потоков производства XИТ (рис. 8, 9) на АХИТ и ТХИТ предусматривает, что АХИТ

будет преимущественно изготавливаться в помещениях второго этажа, а ТХИТ будет преимущественно изготавливаться в помещениях первого этажа.



Рис. 9. После разделения потоков

Организация «производственной ячейки» для изготовления ХИТ и определение минимального объема партии по каждому виду ДСЕ

С целью сокращения цикла изготовления и обеспечением ритмичной поставки ДСЕ ХИТ цехом, исходя из потребности сборки, было выделено необходимое количество рабочих в «ячейку» по изготовлению ХИТ. Так же была изменена система планирования по каждому виду ХИТ, исходя из недельной потребности сборки, и разработан перечень ДСЕ с определением минимальной партии (рис. 10). изготовление приспособления для размотки и отрезки требуемой длины провода;

- изготовление сварного колпака;

 изготовление подставок для инструмента и приспособлений;

 изготовление нового электроножа для нарезки;

 оборудование рабочего места лупой с подсветкой на пантографическом механизме;

– изготовление многоярусного приспособление для стеклоспая и др.



Рис. 10. Сокращение объема партии

Мероприятия по разделению потоков изготовления ХИТ позволили сократить перемещения:

- для ...АХИТ до 6 км;
- для ...ТХИТ до 6,3 км.

Внедрение улучшений

В ходе реализации проекта было предложено и внедрено более 20 улучшений:

Рассмотрим подробнее изготовление сварного колпака.

Первоначально колпак (стакан) изготавливался вытяжкой. Вытяжка стакана, состоявшего из двух частей 1 и 2, рис. 11, производилась в три перехода с последующей термической обработкой после каждого перехода (время изготовления 32 часа).



Рис. 11. Стакан изготовленный вытяжкой

Для сокращения времени изготовления и уменьшения количества брака была изменена конструкция и внедрена новая технология изготовления колпака.

Замена конструкции колпака на сварную конструкцию (из трех деталей 1, 2, и 3, рис. 12) позволила сократить время протекания процесса изготовления колпака практически в три раза (время изготовления 12 часов), соответственно и сокращение цикла изготовления колпака в 3 раза (цикл 13 дней).



Рис. 12. Сварной стакан

Перевод процесса изготовления деталей с универсальных станков на станки с числовым программным управлением (ЧПУ)

В целях сокращения количества брака, а так же снижения себестоимости изготовления деталей путем

снижения трудоемкости было принято решение о переводе процесса изготовления ряда деталей с универсальных станков на станки с ЧПУ.

Разработаны и отработаны более 50 программ на токарные и фрезерные станки.

Результаты перевода процесса изготовления деталей на станки с ЧПУ представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры	Результат			
показателей	Было	Стало		
Перемещения оператора	14 м.	2 м.		
Цикл изготовления детали	5–31 мин.	1–15 мин.		
Брак (из 100 деталей)	2 шт.	0 шт.		

Результаты перевода процесса изготовления деталей на станки с ЧПУ

Станочников, многократных победителей конкурса «Золотые руки», длительное время работающих без отклонений и брака перевели на самоконтроль. В результате цикл контрольных операций сократился с 11–25 мин. до 1–14 мин.

Концентрация производства ХИТ на заводе ВНИИЭФ

Стратегической задачей в части оптимизации технологической цепочки производства ХИТ является максимальная концентрация всех технологий на заводе ВНИИЭФ и организация опытно-серийного производства ХИТ.

Технологии, передаваемые отделениями - соисполнителями производства ХИТ на завод ВНИИЭФ, в период 2015–2017 гг., приведены в табл. 2.

Таблица 2

Nº	Отделение	Передаваемые технологии (проверки, испытания)	Мероприятия при передаче технологий
1	Соисполнитель	Контрольные проверки СЧ, ПСИ ХИТ	Закупка приборов, оборудования
2	Соисполнитель	Изготовление: – сильфоны; – изолятор; – крышка.	Закупка оборудования, изготовление технологической оснастки
3	Соисполнитель	Изготовление: – титановый порошок; – лента пиротехническая ЛП2; – проведение ПСИ ленты ЛП2,	Закупка оборудования, приборов
4	Соисполнитель	Изготовление комплектов ДСЕ	Закупка оборудования

Технологии,	передаваемые на	а завод	ВНИИЭФ
-------------	-----------------	---------	--------

Для решения задачи концентрации технологий на заводе ВНИИЭФ в настоящее время реализуется несколько проектов:

 предполагается создание специализированного механического участка, что должно обеспечить ритмичность производства, формирование оптимального потока, комплектной поставки ДСЕ с учетом применения инструментов ПСР (поток единичных изделий).
 Это одновременно позволит задействовать высвободившееся оборудование для решения других задач;

– в рамках ФЦП реализуется проект для оснащения завода ВНИИЭФ оборудованием, необходимым для организации производства ДСЕ, в настоящее время изготавливаемых отделениями – соисполнителями, в частности в 2015 г. разработан стенд контроля электрических параметров ХИТ.

Экономический эффект

В результате внедрения новых технологий, разработки и применения приспособлений, а так же инструментов ПСР, себестоимость рассмотренных нами ХИТ удалось снизить: на 5 % – АХИТ и на 10 % – ТХИТ.

Заключение

1. В рамках проделанной работы были переработаны технологии изготовления ДСЕ ХИТ. В результате цикл изготовления некоторых деталей удалось снизить в 3 раза.

2. Перевод ДСЕ ХИТ с универсальных станков на станки с ЧПУ позволил сократить число технологических переходов при механической обработке, тем самым снизив общую трудоемкость, а так же значительно снизить влияние человеческого фактора.

3. Изменение подхода к системе планирования позволило обеспечить ритмичную поставку ДСЕ

по каждому виду ХИТ, исходя из недельной потребности сборки, что в свою очередь значительно сократило время ожидания комплектующих ХИТ.

 Внедрение улучшений выработанных в рамках ПСР проекта позволили улучшить качество условий труда и повысить производительность на ≈55 %.

Реализация данных мероприятий позволила в 2015 г. увеличить выпуск ХИТ в 3 раза по отношению к 2013 г. без привлечения дополнительных ресурсов, а так же снизить себестоимость изготовления ХИТ на 15 %.

Стратегической задачей в части оптимизации технологической цепочки производства ХИТ стала максимальная концентрация всех технологий (за исключением технологий ИЯРФ) на заводе. Разработка стенда для проведения ПСИ ХИТ в отделе 2190 стала первым шагом для реализации этой задачи.

Реализация мероприятий выработанных в рамках ТЗ на техперевооружение ОТЦ по ХИТ позволит увеличить объемы производства ХИТ в 1,5 раза по отношению к 2015 г.

Литература

1. Методические рекомендации «Картирование и оптимизация потока создания ценностей при разработке продукции» (МР ПСР 014-2013).

2. Руководящий документ «Картирование потока создания ценности. Инструменты приведения потока к целевому состоянию» (РД ПСР 088-2011)

3. Руководящий документ «Расчет экономического эффекта реализуемых проектов и внедряемых предложений в ходе внедрения производственной системы POCATOM» (РД ПСР 009-2012).

4. Ильин А. И. Экономика предприятия 2007. – Минск: ООО «Новое знание», 2007.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА ВЛАГОЗАЩИТНОГО ПОЛИЭТИЛЕНОВОГО ПОКРЫТИЯ НА ЕГО ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА

<u>В. Е. Шатунов</u>, Ю. С. Белова, Е. П. Моисеева, М. В. Штыров, А. А. Тарасов

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

Целью данной работы является улучшение эксплуатационных характеристик влагозащитного полиэтиленового покрытия для деталей из химически активного материала, в частности, его эластичности и прочности¹.

В рамках существующей технологии полиэтиленовое покрытие наносится на нагретую до температуры 250 °С деталь методом вибровихревого напыления порошковой композиции на основе полиэтилена высокого давления с добавлением углерода технического и термостабилизатора. В состав покрытия, внедренного в производство, углерод вводится в количестве 2,0 масс. %, термостабилизатор агидол-1-1,1-1,6 масс. %. При длительной эксплуатации изделий, особенно в жестких условиях, от наличия и эффективности термостабилизатора зависит скорость старения полимера, сохранность исходных характеристик покрытия. Несмотря на то, что содержание добавок в полиэтиленовом покрытии невелико, их концентрация существенно влияет на такие характеристики покрытия, как эластичность, прочность, паропроницаемость, морозостойкость, адгезия к материалу деталей.

Вопрос о повышении эластичности полиэтиленового покрытия и сохранении его трещиностойкости в течение длительного времени приобретает особое значение при возникновении факторов, деформирующих покрытие в изделии, а также при ужесточении условий эксплуатации.

В рамках поставленной задачи проведено исследование влияния процентного содержания углерода технического и замены термостабилизатора в составе полиэтиленового покрытия, прежде всего, на его механические свойства, а также на морозостойкость и паропроницаемость.

Объекты исследований

Исследования проводились на свободных пленках и покрытых брикетах, изготовленных из химически активного литийводородсодержащего материала.

Для получения полимерных композиций использовались следующие компоненты в соотношениях, приведенных в табл. 1: порошок полиэтилена высокого давления (ПЭ), фракция до 315 мкм;

углерод технический ГОСТ 7885-86;

 термостабилизаторы – неозон Д по ГОСТ 39-79, агидол-2 ТУ 2492-433-05742686-98.

T		~					1
	а	n	Π	И	п	a	
-	~	~	• •		-	~	-

Состав	исследуемых	покрытий
--------	-------------	----------

Состав композиции	Условное обозначение
Чистый полиэтилен	ПЭ
96,5 % ПЭ + 1,5 % агидола-1 + 2 % углерода технического	1,5 A1 – 2 Y
99,0 % ПЭ + 0,5 % неозона Д + 0,5 % углерода технического	$0,5 \; H_{\rm I\!I} - 0,5 \; m V$
98,5 % ПЭ + 0,5 % неозона Д + 1 % углерода технического	0,5 H _Д – 1 У
98,0 % ПЭ + 0,5 % неозона Д + 1,5 % углерода технического	0,5 H _Д – 1,5 У
97,5 % ПЭ + 0,5 % неозона Д + 2 % углерода технического	0,5 H _Д – 2 У
99,0 % ПЭ + 0,5 % агидола-2 + 0,5 % углерода технического	0,5 A2 – 0,5 Y
98,2 % ПЭ + 0,8 % агидола-2 + 1 % углерода технического	0,8 A2 – 1 Y
97,2 % ПЭ + 0,8 % агидола-2 + 2 % углерода технического	0,8 A2 – 2 Y

Нанесение покрытий из исследуемых композиций на образцы и металлические подложки осуществляли методом вибровихревого напыления в «кипящем» слое полимера. Толщина покрытий находилась в интервале значений ($0,40 \pm 0,15$) мм. Для определения механических характеристик из свободных пленок изготавливали образцы-лопатки в соответствии с ГОСТ 11262-80 тип 1.

Методы исследований

В ходе исследования:

 исследовались механические свойства при растяжении свободных пленок покрытий;

 – оценивалась герметичность покрытий, нанесенных на брикеты, и изменение механических свойств пленок после проведения испытаний на морозостойкость;

 – определялась паропроницаемость покрытий, нанесенных на брикеты.

¹ Подана заявка на изобретение «Способ получения влагозащитного углеродсодержащего покрытия для деталей из химически активного материала». Приоритет № 2015154422 от 17.12.2015 г.

Исследование механических свойств – предела прочности при растяжении и относительного удлинение при разрыве – пленок в исходном состоянии и после испытаний на морозостойкость проводили по ГОСТ 11262-80 на испытательной машине 2038 Р-0,05 со скоростью перемещения активного захвата машины – 100 мм/мин. Температура испытаний – 22 °C, относительная влажность – 51 %.

Методика испытаний на морозостойкость состояла в термоциклировании брикетов и пленок от комнатной температуры до минус 40 °C при первом цикле, а при последующих – от комнатной температуры до отрицательной на 5 °C ниже предыдущего цикла, и так до минус 70 °C. Выдержка по достижении в объеме контейнера температуры, отличающейся от заданной на (\pm 1°C), составляла 1 час. Затем было дополнительно проведено 10 циклов термоциклирования брикетов и пленок от комнатной температуры до минус 70 °C с выдержкой 1 час.

Брикеты и пленки при термоциклировании помещались в металлические герметичные контейнеры, выложенные изнутри теплоизоляционным материалом для предотвращения контакта объектов испытаний со стенкой контейнера. В качестве среды внутри контейнеров использовался воздух влажности не более 0,5 г/м³.

В ходе испытаний на морозостойкость на брикетах визуально определялась герметичность покрытия, а на свободных пленках определялись их механические свойства

Паропроницаемость ПЭ покрытий определялась по изменению массы покрытых брикетов, которые находились в атмосфере с постоянной относительной влажностью 75 % (давление паров H_2O над насыщенным раствором NaCl). Измерения осуществлялись при (22 ± 1) °C.

Результаты и обсуждение

<u>1. Определение механических свойств</u> ПЭ покрытий при растяжении

Механические испытания свободных пленок покрытий с различным содержанием термостабилизаторов и углерода показали, что обе добавки снижают эластичность покрытия, и, очевидно, его трещиностойкость.

Если для чистого полиэтилена относительное удлинение при растяжении, ε_{pp} , составляло (518 ± 9) %, то введение 2 % углерода и 0,8 % агидола-2 снижало эту величину более, чем в пять раз, до (91 ± 6) %; введение 2 % углерода и 0,5 % неозона Д – в 1,5 раза, до (377 ± 70) %.

Для установления оптимальной концентрации технического углерода в полимерной композиции с целью получения покрытия с высокой трещиностой-костью, было проведено сравнение механических характеристик пленок покрытий с различным содержанием технического углерода – от 0,5 до 2,0 масс %. При этом необходимое содержание термостабилизаторов в полимерной смеси было установлено на раннем этапе исследований и составило: для неозона Д – 0,5 % масс, для агидола-2 (0,5–0,8) % масс.

Результаты испытаний определения прочности при растяжении ПЭ покрытий с различным содержанием неозона Д, агидола-2 и углерода технического представлены в табл. 2.

Сравнительный анализ экспериментальных данных, приведенных в табл. 2, указывает на то, что с увеличением процентного содержания технического углерода с 0,5 % масс. до 2 % масс. прочность ПЭ покрытий с неозоном Д, агидолом-2 при растяжении и относительное удлинение при разрыве снижаются.

Таблица 2

	До испи	ытаний	После испытаний на морозостойкость			
Вид покрытия	Механические характеристики пленок покрытий*					
	σ _{pp} , ΜΠa	ε _{pp} , %	σ _{рр} , МПа	ε _{pp} , %		
ПЭ	11,3 ± 0,5	518 ± 9	_	-		
0,5 H _Д – 0,5 У	12,3 ± 0,6	548 ± 17	$9,8 \pm 0,6$	416 ± 84		
0,5 H _Д – 1 У	11,4 ± 0,3	496 ± 13	$10,1 \pm 0,4$	472 ± 69		
0,5 H _Д – 1,5 У	10,3 ± 0,4	476 ± 22	9,2 ± 0,1	324 ± 94		
0,5 H _Д – 2 У	9,6 ± 0,2	377 ± 70	9,3 ± 0,1	287 ± 82		
0,5 A2 – 0,5 Y	11,1 ± 0,6	498 ± 15	$10,4 \pm 0,5$	407 ± 93		
0,8 A2 – 1 V	9,4 ± 0,2	272 ± 87	$9,2 \pm 0,2$	204 ± 53		
0,8 A2 – 2 V	9,3 ± 0,2	91 ± 6	9,0 ± 0,2	66 ± 7		

Значения механических характеристик при растяжении свободных пленок исследуемых полиэтиленовых покрытий

На рис. 1 представлены графические зависимости прочности ПЭ покрытия с неозоном Д при растяжении и относительного удлинения при разрыве от содержания технического углерода в полимерной композиции. Очевидно, что для получения высокоэластичного покрытия, содержание углерода в композиции должно быть снижено до (0,5–1,0) % масс. Пленки такого покрытия оказываются также весьма прочными – разрушающее напряжение при их растяжении найдено равным (11–12) МПа.

По-видимому, наибольшая степень упорядоченности структуры ПЭ покрытия достигается при оптимальном содержании технического углерода. При увеличении дозировки углерода сверх оптимальной начинают образовываться крупные агрегаты частиц, которые становятся дефектами структуры. На них концентрируются напряжения, и разрывная прочность снижается. Степень усиливающего действия одной и той же марки технического углерода зависит от свойств термостабилизатора в композиции.



Рис. 1. Зависимость механических характеристик ПЭ покрытия с неозоном Д от содержания углерода в полимерной композиции в исходном состоянии

Необходимо отметить, что введение углерода в состав ПЭ-покрытия было обусловлено положительным эффектом на прочность связи покрытия с деталями и морозостойкость. В связи с возможной корректировкой нормативной документации в части, касающейся снижения содержания углерода в составе композиции, необходимо изучить влияние этой добавки в количествах менее 2 масс. % на такие свойства ПЭ-покрытия, как морозостойкость, паропроницаемость, а, впоследствии, адгезию к материалу деталей и сохранность свойств при длительной эксплуатации.

В ходе испытаний на морозостойкость дефектов покрытий на брикетах визуально обнаружено не было. Прочность и эластичность свободных пленок покрытий и с неозоном Д, и с агидолом-2 снижались после воздействия отрицательных температур во всем исследуемом интервале концентраций углерода. Причем, если прочность падала несущественно, то относительное удлинение – на 20–30 % и характеризовалось значительным разбросом экспериментальных данных (рис. 2). Исключение составило покрытие 0,5 $H_{\rm d}-1$ У, эластичность пленок которого после испытаний снизилась всего на 5 %.

Очевидно, что снижение содержания углерода в композициях и с неозоном Д, и с агидолом-2 не ухудшает морозостойкость покрытий, получаемых на деталях. С учетом того, что покрытия с (0,5– 1,0) % углерода демонстрируют высокую исходную эластичность и прочность, можно предположить, что их трещиностойкость под воздействием отрицательных температур будет даже выше, чем у покрытий с 2 % углерода.



Рис. 2. Зависимость механических характеристик ПЭ покрытия от содержания технического углерода в полимерной композиции с неозоном Д после испытаний на морозостойкость

2. Определение паропроницаемости

В рамках данного исследования предполагалось оценить влияние содержания углерода технического и замены термостабилизатора в составе полиэтиленового покрытия на его влагозащитные свойства.

При определении паропроницаемости брикеты с исследуемыми покрытиями находились в атмосфере с постоянной относительной влажностью 75 % в течение 15 суток. За это время герметичность ПЭ покрытий на брикетах не была нарушена. Визуально покрытия не имели дефектов, отслоений, налета, свидетельствующих о протекании подпленочной коррозии материала.

По изменению массы покрытых брикетов в ходе испытаний был произведен расчет паропроницаемости ПЭ покрытий исследуемых составов. Расчетные значения паропроницаемости исследуемых ПЭ покрытий представлены в табл. 3.

Таблица 3

Паропроницаемость исследуемых полиэтиленовых
покрытий при 75 %-ной относительной
влажности воздуха

Вид покрытия	Паропроницаемость, г·м ⁻² ·с ⁻¹
0,5 H _Д – 0,5 У	$1,77 \cdot 10^{-6}$
0,5 H _Д – 2 У	$2,13 \cdot 10^{-6}$
0,5 А2 – 0,5 У	$1,62 \cdot 10^{-6}$
0,8 A2 – 1 Y	$1,30 \cdot 10^{-6}$
0,8 A2 – 2 Y	$1,41 \cdot 10^{-6}$

Сравнительный анализ полученных данных показал, что с увеличением процентного содержания технического углерода с 0,5 % до 2 % в полимерной композиции с неозоном Д, паропроницаемость ПЭ покрытия увеличивается.

Найденное ранее значение паропроницаемости серийного покрытия на основе полиэтилена, агидола-1 (1,5 % масс.) и углерода технического (2,0 % масс.) составляло $(1,67-1,77)\cdot 10^{-6} \ r\cdot m^{-2} \cdot c^{-1}$.

Паропроницаемость ПЭ покрытия из композиции 0,5 $H_{\rm d}$ – 0,5 У, а также паропроницаемость ПЭ покрытия 0,5 A2 – 0,5 У находятся на одном уровне с паропроницаемостью серийного покрытия.

Паропроницаемость ПЭ покрытия из композиции 0,5 H_Д – 2 У выше паропроницаемости серийного покрытия.

Паропроницаемость ПЭ покрытий из композиций 0,8 A2 – 1 У и 0,8 A2 – 2 У ниже паропроницаемости серийного покрытия.

Таким образом, замена термостабилизатора агидол-1 в серийном покрытии для деталей из активных материалов на стабилизатор агидол-2 не оказывает существенного влияния на паропроницаемость пленки. Снижение содержания углерода в композициях и с неозоном Д, и с агидолом-2 в сравнении с серийным покрытием улучшает влагозащитные свойств ПЭ покрытий.

Выводы

1. Проведено исследование влияния процентного содержания углерода технического и замены термостабилизатора агидол-1 в составе полиэтиленового покрытия для деталей из химически активного материала на механические свойства покрытия, его морозостойкость и паропроницаемость.

2. Анализ результатов механических испытаний на растяжение пленок покрытий с различным содержанием технического углерода от 0,5 до 2,0 % масс. показал, что снижение его концентрации в составе полимерных композиций с термостабилизаторами агидол-2 или неозон Д положительно сказывается на механических свойствах покрытия. Наблюдается увеличение относительного удлинения пленок при разрыве, а для композиций с неозоном Д также увеличение прочности при растяжении.

3. В ходе испытаний на морозостойкость, которые заключались в термоциклировании покрытых брикетов и пленок от комнатной температуры до минус 40°С при первом цикле, а при последующих – от комнатной температуры до отрицательной на 5 °С ниже предыдущего цикла, и так до минус 70 °С, нарушения герметичности покрытий с агидолом-2 или неозоном \mathcal{A} и различным содержанием технического углерода от 0,5 до 2,0 % масс. на брикетах не наблюдалось.

4. Прочность и эластичность свободных пленок покрытий и с неозоном Д, и с агидолом-2 во всем исследуемом интервале концентраций углерода после воздействия отрицательных температур снижались на примерно одинаковую величину относительно исходных значений. С учетом того, что покрытия с (0,5–1,0) % углерода демонстрируют высокую исходную эластичность и прочность, можно предположить, что их трещиностойкость под воздействием отрицательных температур будет выше, чем у покрытий с 2 % углерода.

5. Сравнительный анализ данных по паропроницаемости ПЭ покрытий показал, что улучшенными влагозащитными характеристиками по сравнению с серийным покрытием обладают составы с (0,5– 0,8) %-ми агидола-2 и (0,5–2) %-ми углерода, а также состав с 0,5 % неозона Д и 0,5 % углерода.

6. По результатам комплексной оценки можно прогнозировать повышение трещиностойкости и влагозащитных характеристик при сохранении морозостойкости у ПЭ покрытия с 0,5 %-ным содержанием технического углерода и 0,5 %-ным содержанием термостабилизатора неозон Д, а также ПЭ покрытия с (0,5–1) %-ным содержанием технического углерода и (0,5–0,8) %-ным содержанием технического у
ВЛИЯНИЕ МОНОГЛИЦИДИЛОВЫХ ЭФИРОВ НА СВОЙСТВА ВЫСОКОНАПОЛНЕННОГО ЭПОКСИДНО-ФЕРРИТОВОГО КОМПАУНДА

<u>С. Н. Шацких</u>, О. Л. Лазарева, Е. И. Попова

ФГУП «ВНИИА им. Н. Л. Духова», Москва

При производстве изделий из высоконаполненных компаундов актуальными являются задачи:

 – равномерное распределение наполнителя в полимерном связующем,

снижение вязкости исходной композиции.

Примером такого изделия является магнитный кольцевой сердечник сложного профиля для блока высоковольтного трансформатора (см. рис. 1).



Рис. 1. Блок высоковольтного трансформатора с сердечником

Высокая напряженность электрического поля блока высоковольтного трансформатора в зоне установки сердечника предъявляет высокие требования к качеству компаунда, из которого он изготовлен. Необходимо обеспечить равномерность распределения наполнителя в полимерной матрице и отсутствие газовых включений в объеме отвержденного компаунда.

Данный сердечник вытачивается из полой цилиндрической заготовки, полученной по технологии ротационного формования из эпоксидно-ферритового компаунда. Компонентный состав компаунда приведен в табл. 1. Основой компаунда является высоковязкая смесь эпоксидной смолы и ферритового порошка в соотношении 1:5, отверждаемая полиамином непосредственно в установке ротационного формования при высокой температуре за короткий промежуток времени.

Таблица 1

	Состав	стандартного	компаунда
--	--------	--------------	-----------

Компонент	Кол-во, м.ч.	Функциональность
Эпоксидная смола	100	Полимерное связующее
Полиамин	20	Отвердитель
Олигоэфиракрилат	20	Разбавитель- пластификатор
Феррит	500	Наполнитель

Для снижения вязкости и увеличения пластичности полимерного связующего в составе нормативного компаунда присутствует пластификатор олигоэфиракрилат, химически не связанный с эпоксидной матрицей. Данный пластификатор обладает довольно высокой собственной вязкостью ~200 сПз при 20 С. что не обеспечивает его высокую эффективность как разбавителя вязкой эпоксидной смолы. Степень снижения вязкости эпоксидной смолы при этом не всегда бывает достаточной для полного смачивания поверхности частиц наполнителя, особенно если он представлен большим количеством мелкой фракции, что приводит к неравномерному распределению наполнителя в полимерном связующем. При ротационном формовании высокая вязкость смеси не обеспечивает ее высокую растекаемость, что в свою очередь не способствует формированию более гомогенной структуры компаунда.

Задача данной работы заключалась в создании более технологичного компаунда:

- с низкой вязкостью полимерного связующего,
- хорошей вмешиваемостью наполнителя,

– в отвержденном состоянии обладающего большей стабильностью (особенно при повышенной температуре) за счет химической связи между всеми компонентами полимерного связующего. При этом важным условием является сохранение приемлемой пластичности компаунда, т.к. после отверждения он подвергается токарной обработке и термоциклированию.

В настоящее время промышленностью производятся химически связываемые с эпоксидной матрицей реакционноспособные модификаторы, которые существенно снижают вязкость наполненных композиций и увеличивают смачиваемость наполнителя [1, 2]. Благодаря этим свойствам данные продукты получили название активных разбавителей. На рынке присутствует большое количество активных разбавителей, представляющих собой различные классы химических соединений и, соответственно, придающих эпоксидным компаундам различный комплекс эксплуатационных и технологических свойств.

Исходя из поставленных целей, был выбран класс моноглицидиловых эфиров, как сильно снижающих вязкость системы (за счет линейной структуры и относительно короткой длины молекул обладают очень низкой собственной вязкостью <5 сПз), а также способных обеспечить пластичность отвержденного компаунда (за счет наличия в структуре простой эфирной связи и только одной эпоксидной группы). В работе использовались моноглицидиловые эфиры производства отечественной компании «Макромер». Для испытания в составе компаунда были выбраны моноглицидиловые эфиры с одной (Лапроксид № 1) и двумя (Лапроксид № 2) эфирными связями (см. рис. 2).



Рис. 2. Структурная формула моноглицидиловых эфиров марки Лапроксид: а – Лапроксид № 1; б – Лапроксид № 2

При оценке технологической эффективности применения активного разбавителя в составе компаунда за функцию отклика принималась динамическая вязкость полимерного связующего без наполнителя и отвердителя при температурах переработки компаунда 25 и 60 °C.

За функцию отклика для высоконаполненного компаунда принималось значение растекаемости материала без отвердителя при температуре 20 °C.

Количественно данный параметр оценивался по методике, аналогичной применяемой для наполненных композитов [3]. Результаты измерения вязкости полимерного связующего и растекаемости наполненного компаунда представлены в табл. 2.

Вязкость композиций с Лапроксидами существенно ниже стандартного состава. Наибольшее снижение (при 60 °C) наблюдается в случае применения Лапроксида № 1 в количестве 20 м.ч. (снижение в 2,5 раза), для Лапроксида № 2 – в 1,5 раза. При снижении температуры до 25 °С различия в значениях вязкости со стандартным составом существенно возрастают (снижение в 6,5 раз для Лапроксида № 1, в 3 раза для Лапроксида № 2). Растекаемость наполненного компаунда относительно стандартного состава максимально увеличивается ~ на 20 % для Лапроксида № 1. Для Лапроксида № 2 рост составил ~15 %.

На следующем этапе работ следовало проконтролировать отверждение исследуемых композиций с Лапроксидами. Известно [4], что наполнитель может оказывать влияние на процесс отверждения полимерного связующего, ускоряя или замедляя его, исследование проводили на составах с наполнителем и без. Поскольку в структуре Лапроксидов присутствуют эпоксидные группы, общее количество отвердителя необходимо увеличить пропорционально эпоксидному числу конкретного разбавителя с учетом его количества.

Как правило, необходимое количество аминного отвердителя устанавливается расчетным путем, исходя из стехиометрического соотношения аминных водородов и эпоксидных групп [5], хотя некоторые авторы считают, что это не всегда является оптимальным [6].

В данной работе дополнительное количество отвердителя, необходимого для взаимодействия с эпоксидными группами в активных разбавителях, рассчитывалось исходя из того, что для нормативного компаунда (см. табл. 1) установлено соотношение в системе эпоксидная смола:отвердитель (100 м. ч.:20 м.ч.). Данное соотношение пересчитывалось исходя из эпоксидного числа конкретного разбавителя, как отмечено выше. Общее количество необходимого отвердителя считалось как сумма количества отвердителя необходимого для отверждения эпоксидной смолы и активного разбавителя (см. табл. 3).

Таблица 2

Тип разбавителя	Кол-во,	Вязкость полимерного связующего, сПз		Растекаемость наполненного компаунда, мм
	м. ч.	60 °C	25 °C	20 °C
Лапроксид № 1	20	38 ± 2	463 ± 20	$23,2\pm0,05$
	10	73 ± 5	1485 ± 87	$21,2\pm0,05$
Панроконд № 2	20	46 ± 3	1010 ± 82	$22,4\pm 0,05$
лапроксид № 2	10	87 ± 6	1627 ± 93	$20,3 \pm 0,05$
Олигоэфиракрилат	20	126 ± 9	3084±154	$19,0\pm 0,05$

Вязкость и растекаемость компаунда

Таблица 3

Количество отвердителя для компаунда

Компоненты, м. ч.			Номер обра	азца	
	Стандарт	1	2	3	4
Эпоксидная смола			100		
Лапроксид №1	-	10	-	20	-
Лапроксид №2	-	-	10	_	20
Олигоэфиракрилат	20	-	-	_	-
Полиамин	20	22	23	24	25
Феррит			500		

Таблица 4

	1	1	1 5	
Тип разбавителя	Кол-во, м.ч.	Наполни- тель	Температуры onset/ endset ¹ , °C	Пик отверждения, °С
Панистика №1	20	Нет	61/129	96
	20	Есть	63/126	96
лапроксид мет	10	Нет	60/128	96
		Есть	62/128	95
Лапроксид №2	20	Нет	61/129	96
		Есть	63/129	97
	10	Нет	62/128	95
		Есть	61/125	95
Олигоэфиракрилат	20	Нет	61/128	96
	20	Есть	59/132	97

Данные ДСК-анализа для реакции отверждения полимерного связующего компаунда с наполнителем и без

¹ Onset и endset – значения температур начала и конца процесса, определённых по методу пересечения касательных.

Производитель рекомендует [7] вводить активный разбавитель на уровне 10–25 м. ч., т. к. его эффективность снижается при введении больших количеств [8].

Характеристики процесса отверждения, определенные в результате динамических экспериментов ДСК на серии из 10 образцов со скоростью нагрева 10 °С/мин, представлены в табл. 4.

Анализ полученных данных позволяет заключить следующее:

– композиции с содержанием Лапроксидов на уровне 10 и 20 м. ч. отверждаются в том же температурном диапазоне (от 60 до 130 °С), что и стандартный состав с инертным пластификатором олигоэфиракрилатом, с максимальной скоростью при ~96 °С, т. е. необходимость корректировки текущего режима отверждения отсутствует;

 феррит не оказывает существенного влияния на кинетику отверждения полимерного связующего.

Пластичность полимерного связующего компаунда (см. табл. 3) без ферритового наполнителя оценивали по значениям температуры стеклования (T_{ст}) отвержденных композиций, определяемым методом ДСК. Данные приведены в табл. 5.

Таблица 5

Температуры стеклования полимерного связующего компаунда

Тип разбавителя	Кол-во, м.ч.	Значение Т _{ст} , °С
Папрокени № 1	20	87
лапроксид № 1	10	97
Панраканд № 2	20	85
лапроксид № 2	10	103
Олигоэфиракрилат	20	91

Видно, что композиции, содержащие 20 м. ч. Лапроксидов, характеризуются близкими значениями температуры стеклования, которые оказываются ниже аналогичного параметра стандартного состава, что свидетельствует о меньшей склонности данных материалов к хрупкому разрушению при н.к.у.

Таким образом показано, что для замены олигоэфиракрилата в составе компаунда целесообразно рекомендовать Лапроксид № 1 в количестве 20 м. ч., т.к. введение данного активного разбавителя обеспечивает существенное снижение вязкости полимерного связующего относительно стандартного состава при сохранении длительности и температуры режима отверждения. При этом сохраняется пластичность отвержденного компаунда и обеспечиваются более благоприятные условия для создания равномерно наполненной композиции ферритового порошка и полимерного связующего.

Литература

1. Крыжановский В. К. Технология полимерных материалов: уч. пособие / Николаев А. Ф., Крыжановский В. К., Бурлов В. В. и др.; под общ. ред. В. К. Крыжановского. – СПб.: Профессия, 2008. 544 с.

2. Антипова Е. А., Короткова Н. П., Лебедев В. С. Современные полиуретановые, эпоксидные, ПУакрилатные и эпоксиакрилатные связующие для индустриальных ЛКМ производства ООО «НПП «Макромер» // Лакокрасочные материалы и их применение. 2012. № 9. С. 14–21.

3. Новоселова С. Н. Влияние степени наполнения эпоксидных композиций микрокальцитом разной дисперсности на их реологические свойства / Новоселова С. Н., Татаринцева О. С., Углова Т. К. // Пласт, массы. 2013. № 6. С. 37–40.

4. Зарубина А. Ю. Реокинетика эпоксидированного олигомера при отверждении в присутствии твердой поверхности наполнителей / Зарубина А. Ю., Трофимов А. Н., Симонов–Емельянов И. Д. // Пласт. Массы. 2013. № 7. С. 32–34.

5. Чернин И. З., Смехов, Ф. М., Жердев, Ю. В. Эпоксидные полимеры и композиции. – М.: Химия, 1982. 230 с.

6. Мошинский Л. Эпоксидные смолы и отвердители. Аркадия пресс Лтд, Тель-Авив, 1995. 370 с.

7. Информационные материалы компании НПП «Макромер» [электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.macromer.ru.

8. Софьина С. Ю. Влияние типа модификатора на свойства эпоксиаминных композиций: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.06 / Софьина Светлана Юрьевна. – Казань, 2004. 126 с.

УСТРОЙСТВО ЦИФРОВОЙ РЕГИСТРАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ЗАМЕНЫ ФОТОПЛЕНКИ В ФОТОХРОНОГРАФЕ ТИПА СФР

В. Н. Туркин, А. С. Шубин

ФГУП «ВНИИА им. Н. Л. Духова», Москва

В настоящее время одним из основных инструментов для регистрации быстропротекающих газодинамических процессов являются фотохронографы типа СФР с записью информации на фотопленку. Для извлечения зарегистрированной информации требуется проявка фотопленки и последующая печать фотоснимков, что обуславливает длительность времени получения информации и значительную погрешность измерений.

К настоящему времени предпринято несколько попыток замены фотопленки на цифровой носитель информации, разработано несколько поколений приборных комплексов, в которых вместо фотопленки использовался цифровой регистратор. На рис. 1 приведена структурная схема приборного комплекса СКПФ254. Модернизация осуществлялась именно СФР, т. к. фотохронографы данного типа получили наиболее широкое распространение и такая модернизация позволила бы оснастить находящиеся в эксплуатации на десятках различных предприятиях и институтах, фотохронографы цифровыми регистраторами, сократив при этом затраты на модернизацию. К сожалению, сравнительно небольшой размер входного окна регистратора сделало затруднительным их использование в ряде проводимых экспериментов.

К другим недостаткам обусловленных конструкцией цифровых регистраторов можно отнести:

 наличие фоновой засветки рабочего кадра, возникающей из-за большого времени экспозиции, величина которой определяется конструкцией электромагнитного затвора в фотокамере СФР, который не успевает закрыться до того момента когда зеркало начинает делать второй оборот;

 в опытах с ярким свечением продуктов взрыва происходит потеря информации вследствие перетекания заряда между соседними ячейками ПЗСматрицы.

Таким образом, для решения данной задачи требовалось определить конструктивное решение, позволяющее непрерывно регистрировать изображение, перемещаемое по чувствительной к излучению поверхности имеющей длину не менее 150 мм и позволяющее отказаться от использования электромагнитного затвора в СФР.



Рис. 1. Структурная схема СКПФ254: 1 – исследуемый объект; 2 – фотокамера; 3 – входной объектив; 4 – плоскость промежуточных изображений источников излучения; 5 – электромагнитный затвор; 6 – выходной объектив; 7 – подвижное зеркало; 8 – электрический двигатель; 9 – датчик положения зеркала; 10 – устройство ввода излучения; 11 – генератор оптического излучения; 12 – фокальная поверхность; 13 – пульт управления; 14 – регистратор оптического излучения; 15 – компьютер; 16 – формирователь задержанного импульса

Конструктивно предыдущие модели устройств цифровой регистрации представляли собой фокон, входное окно, которого располагалось в месте расположения фотопленки СФР, а выходное окно оптически-контактно соединялось с ПЗС-матрицей. Фокон осуществлял передачу изображения, разворачиваемого с помощью вращающегося зеркала по его входному окну на ПЗС-матрицу. Длительность регистрации обуславливается длиной чувствительной области, т. е. диаметром фокона. Максимальный диаметр фокона может составлять 80 см, что обуславливается технологией изготовления.

Для увеличения длины области регистрации производилась шлифовка боковых поверхностей фоконов, по которым проводилась их склейка. Таким образом, данным способом, можно производить последовательное увеличение длины области регистрации, каждый раз добавляя еще один фокон.

Одной из задач при реализации данного способа является не допустить потери информации в зоне склейки. Согласно физической постановке задачи требуется регистрация разновременности срабатывания оптических датчиков, количество которых может достигать ~1 тыс. шт., размер датчика до момента срабатывания составляет ~70 мкм и в момент срабатывания ~200 мкм, соответственно зона склейки не должна превышать 100 мкм, в реальности достигнута величина ~50 мкм.

Фокон представляет собой спрессованный пучок оптических волокон. По принципу действия фокон аналогичен волоконно-оптической пластине (ВОП). Но в отличии от ВОП, фокон изменяет линейные размеры изображения. Этот эффект достигается за счет того, что диаметр волокон на его входе отличается от диаметра волокон на его входе отличается от диаметра волокон на выходе, благодаря их нагреву и растягиванию при изготовлении фокона. Однако особенности технологии производства и физика переноса изображения в волоконных системах накладывают ряд ограничений на качество передачи изображения и создают ряд технических проблем.

Одной из таких проблем является дисторсионные искажения, оказывающие существенное влияние на точность проведения измерений. Причем дисторсия фоконов существенно отличается от традиционных дисторсий, наблюдаемые в оптических системах с применением сферических линз, которые являются центрально-симметричными. Искажения, вносимые фоконом, могут быть какими угодно, внешне, лишь напоминающими оптическую «традиционную» дисторсию (рис. 2).



Рис. 2. Пример возможных искажений в фоконах

Проведенные исследования фокона показывают, что при регистрации через фокон сетчатой миры с прямоугольными ячейками размер ячеек миры на изображении не одинаков и может отличаться на величину до 30 %, что является недопустимым при проведении испытаний по измерению разновременности срабатывания оптических датчиков.

В связи с тем, что дисторсионные искажения оказывают существенное влияние на полученный результат, разработан программный алгоритм исправления дисторсии. Для программного исправления дисторсии вносимой фоконом необходимо аппаратно получить через него фотографию прозрачной миры, которая выполнена в форме ортогональной сетки (рис. 3). Для программного алгоритма, она будет служить ориентиром того, каким «неровным» стало обрабатываемое изображение.

В ПМО реализуется следующая последовательность этапов по восстановлению изображения:

 получение массива координат узлов сетки миры программно, или вручную;

 – расчет «восстановленных» координат узлов миры путем арифметического усреднения координат каждой строки и каждого столбца. Тем самым, мы восстанавливаем ортогональность изображения:

$$X_{\text{BOCCT}i j} = k_i \frac{1}{R} \sum_{j=1}^{R} X_{\text{HCX}i j},$$
$$Y_{\text{BOCCT}i j} = k_i \frac{1}{C} \sum_{i=1}^{C} Y_{\text{HCX}i j},$$

где R, C – количество строк и столбцов линий миры, k_i, k_i – коэффициенты линейности изображения.

 корректировка равномерности периода следования координат строк и столбцов через их арифметическое усреднение. Тем самым, устраняется горизонтальная и вертикальная нелинейность изображения.

Программный способ определения координат узлов сетки миры заключается в следующих этапах:

 высчитывание кросскорреляционной функции входящего изображения с искомым изображением крестика:

$$R(m,n) = \sum_{j=0}^{M} \sum_{j=0}^{N} f(i,j)g(i+m,j+n)$$

где *f* и *g* – интенсивности входящего и шаблонного изображений соответственно.



Рис. 3. Оригинал входящего изображения миры, выполненная как ортогональная сетка

В результате, в областях узлов (перекрестий) сетки миры в изображении находятся локальные максимумы (рис. 4).



Рис. 4. Фрагмент кросскорреляционной функции входящего изображения с изображением-образцом в 2-D и в 3-D вариантах отображения

Методом «яркостной сканирующей сегментации», обнаруживаются локальные максимумы. Далее, оператором производится контроль значений координат найденных максимумов. Устранение возможных ошибок в нахождении максимумов.

Применение программной сортировки массива координат узлов сетки миры для их распределения по строкам и столбцам.

Применение деформационно-перерисовывающей функции к изображению (результат на рис. 5).



Рис. 5. Восстановленное изображение миры

Проведено исследование влияния дисторсии на результат измерения интервалов времени. Проводилась обработка изображений до и после исправления дисторсии, установлено, что после исправления дисторсии уменьшается СКО в измеренных интервалах времени и повышается точность измерений на 15 %. После проведения исправления дисторсии фоконов происходит приведение всех изображений к одному масштабу. Также происходит математическирасчетное «продление» сетки калибровочной миры на период одного столбца в области светотеневой границы в изображении. Сшивка изображений между собой происходит по взаимным общим координатам калибровочной миры, появившимся благодаря их математически-расчетному продлению (рис. 6).

Для исключения фоновой засветки рабочего кадра, возникающей из-за недостаточно быстрого закрытия электромеханического затвора, который не успевает закрыться до того момента, когда зеркало начинает делать второй оборот, и исключения потери информации в опытах с ярким свечением продуктов взрыва, вследствие перетекания заряда между соседними ячейками ПЗС-матрицы, проведен анализ элементной базы в части ПЗС и КМОП-матриц. Выбор пал на КМОП-матрицы, в частности на матрицу CMV20000 фирмы CMOSIS, которая обладает функцией глобального электронного затвора, минимальное время открытия которого составляет не более 100 мкс, что существенно меньше времени полного оборота зеркала, и, следовательно, исключает возможность наложение послесвечения на полезный сигнал и позволяет исключить влияние скорости закрытия электромагнитный затвор. Кроме того, принцип работы КМОП-матриц исключает возможность перетекание заряда в соседние ячейки при ярком свечении регистрируемого объекта.

Таким образом, использование данного регистратора в СФР позволяет отказаться от фотопленки во всех проводимых экспериментах в видимом диапазоне излучения, т. к. длина чувствительной области регистратора будет соответствовать длине фотопленки. Разработанный программный алгоритм исправления дисторсии и сшивки изображений сводит к минимуму влияния данных факторов на погрешность измерений, а если в состав СФР дополнительно вводятся метки времени, то погрешность проведения измерений не будет превышать 50 нс, во всем диапазоне измерений. Решена задача с фоновой засветкой рабочего кадра, вызванная послесвечением, которое возникает за исследуемым процессом.



Рис. 6. Панорама изображений

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ, ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ СВОЙСТВ ОБРАЗЦОВ КАРБИДА БОРА

А. Ю. Постников, М. В. Царев, В. В. Мокрушин, О. Ю. Юнчина, К. В. Коршунов

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

Одним из направлений применения карбида бора в работах, проводимых в интересах РФЯЦ-ВНИИЭФ, является его использование в качестве исходного сырья в процессах плазмохимического синтеза. Для проведения таких процессов используется кусковой материал природного изотопного состава с плотностью не менее 1,6 г/см³. При этом при использовании предварительного обогащенного карбида бора, позволяющего получать продукты плазмохимического синтеза, обогащенные по изотопу бор-10, возникают трудности с зажиганием дуги и созданием плазмы, поскольку в исходном состоянии данный материал представляет собой мелкодисперсный порошок. Наиболее вероятной причиной этого является пыление порошка, частичное замыкание электродов по цепочкам частиц в пылевой взвеси и, как следствие, стягивание («шнурение») и погасание дуги, в связи с чем важным параметром является электрическое сопротивление используемого материала. Одним из вариантов решения данной проблемы является перевод исходного мелкодисперсного порошка в материал с плотностью 1.6 г/см³ путем его прессования, спекания и последующего дробления.

Целью данной работы являлось проведение материаловедческого исследования опытных образцов карбида бора, позволяющего собрать информацию, необходимую для реализации плазмохимического синтеза на изотопнообогащенном порошке. В работе исследовалась структура, химический состав и электропроводящие свойства пяти образцов карбида бора с помощью методов сканирующей электронной микроскопии, рентгеновского спектрального микроанализа и резистометрии.

Образец № 1 представляет собой черно-серые куски карбида бора размером 3–5 мм и применяется как «эталонный» материал, обладающий требуемыми свойствами с точки зрения целевого использования по существующей технологии получения бора высокой чистоты. Образец № 2 представляет собой порошок карбида бора с размером частиц менее 120 мкм. Образцы № 3 и № 4 отражают технологическую цепочку, целью которой является получение из образца № 2 материала, аналогичного по свойствам образцу № 1, и обладающего плотностью не менее ~1,6 г/см³. Образец № 5 в данной работе исследован для сравнения свойств порошков карбида бора (образцы № 1, № 2 и № 4), имеющих достаточно крупные частицы, со свойствами мелкодисперсного порошка с размером частиц порядка нескольких микрон.

Поскольку для изучения электропроводящих свойств в соответствии с методическими подходами, разработанными в РФЯЦ-ВНИИЭФ, исследуемые материалы должны находиться в порошкообразном состоянии, часть образцов № 1 и № 4 была вручную размолота в фарфоровой ступке. После этого для приближения фракционного состава образцов № 1 и № 4 к фракционному составу образца № 2 из каждого размолотого порошка с помощью ситового анализатора была отсеяна фракция с размером частиц 64–125 мкм, которая далее исследовалась в работе. Образцы № 2 и № 5 исследовались без предварительной подготовки.

Структура и элементный состав образцов исследовались с помощью комплекса электронной микроскопии (ЭМ) и рентгеновского спектрального микроанализа (РСМА) соответственно. ЭМ исследование проводилось в режиме высокого вакуума (остаточное давление в камере с образцом ~ $3 \cdot 10^{-6}$ Торр) с ускоряющим напряжением 20 kV и силой тока электронного пучка 8,6 pA.

ЭМ исследование образца № 1 показало (см. рис. 1), что его частицы в большинстве своем имеют откольный характер, и характеризуются наличием острых граней с относительно гладкой поверхностью, рис. 1,а. В то же время встречаются частицы, поверхность которых в значительной степени отличается от вышеуказанных, и характеризуется наличием трещин и каверн. Также при анализе данного образца были обнаружены отдельные частицы, вся поверхность которых пронизана порами (см. рис. 1,б), которые, судя по всему, находятся и в объеме частиц.

ЭМ изображения, полученные для образца № 2 (см. рис. 2), показывают, что его частицы также имеют откольную форму, характерную, в частности, для материалов, подвергавшихся измельчению с помощью специального оборудования. Следует отметить, что размер отдельных частиц порошка, измеренный с помощью ЭМ по наибольшему диаметру, превышает ~200 мкм. Отличительной особенностью данного материала является отсутствие пористых частиц, характерных для образца № 1, что может косвенно свидетельствовать о различном происхождении данных материалов, или о различном характере их обработки.



Рис. 1. Электронно-микроскопические изображения образца № 1 при увеличении 1600х: а – с гладкой поверхностью, б – с пористой поверхностью



б

Рис. 2. Электронно-микроскопические изображения образца № 2: а – при увеличении 800х, б – при увеличении 1600х



а



б

Рис. 3. Электронно-микроскопические изображения образца № 4 при увеличении 1600х: а – с гладкой поверхностью и множеством микродефектов, б – с пористой поверхностью и внутренней пористостью

Образец № 3, представляющий собой прессованную таблетку диаметром ~5 см, был получен путем горячего прессования и спекания навески образца № 2. Поскольку образец № 3 отражает собой промежуточную стадию технологической цепочки получения образца № 4 из образца № 2, то его химический состав аналогичен составу образца № 4, и до-

а

полнительный анализ данного образца в настоящей работе не проводился.

ЭМ исследование образца № 4 показало (см. рис. 3), что его частицы имеют преимущественно неправильную форму, и их поверхность обладает множественными микродефектами. В этом образце доля откольных частиц с острыми ребрами и углами и относительно гладкой поверхностью граней значительно меньше, чем доля подобных частиц в образцах \mathbb{N} 1 и \mathbb{N} 2. Важной отличительной особенностью, характерной для данного материала, является наличие большого количества частиц, обладающих поверхностной, а также, вероятно, внутренней пористостью.

ЭМ исследование образца №5 показало (см. рис. 4), что размер частиц данного порошка находится в интервале от нескольких микрон до ~20 мкм. Частицы данного образца проявляют склонность к агломерированию, и имеют разнообразную (случайную) форму, хотя она, преимущественно, близка к изодиаметричной. Частиц, обладающих внутренней пористостью, в образце № 5 обнаружено не было.

Результаты рентгеновского спектрального микроанализа, полученные для образцов под № 1, № 2, № 4 и № 5 сведены в табл. 1.

элементам B_{2,86}C. К тому же из табл. 1 видно, что для данного образца характерно наибольшее суммарное содержание примесей.

Соотношение бор-углерод для образца № 2 отражает его химический состав формулой В_{2.18}С.

Рассчитанная брутто-формула образца № 4 соответствует В_{4,90}С, указывая на то, что отношение боруглерод в данном образце больше в ~1,71 раз по сравнению с образцом № 1, и в ~2,25 раз по сравнению с образцом №2. Это свидетельствует о значимых изменениях, произошедших с материалом образца № 2, в процессе его перевода в образец № 4 путем горячего прессования и последующего спекания.

Брутто-формулу образца \mathbb{N} 5 можно выразить как $B_{5,59}$ С, что указывает на еще большее содержание бора в данном образце по сравнению даже с образцом \mathbb{N} 4.

Таблица 1

№ образца	Содержание В, ат.%	Содержание С, ат.%	Соотношение В:С	Суммарное содержа- ние примесей
1	72,97	25,48	2,86:1	1,55
2	67,88	31,16	2,18:1	0,96
4	82,37	16,82	4,90:1	0,81
5	84,38	15,08	5,59:1	0,54

Результаты рентгеновского спектрального микроанализа по поверхности исследуемых образцов





Рис. 4. Электронно-микроскопические изображения образца №5: а – при увеличении 1600х, б – при увеличении 3000х

Следует подчеркнуть, что данный метод не предназначен для количественного анализа примесей, содержание которых менее 0,01 масс.%. Кроме того, для точного количественного анализа легких элементов (В, С, О) требуется использование эталонов для корректировки расчета по спектрам. В безэталонном РСМ анализе гомогенного вещества в порошкообразном состоянии ошибка определения легких элементов может достигать ~10–15 %. Тем не менее, проведение сравнительного анализа в одинаковых условиях для всех образцов дает надежное представление о различиях в их химическом составе.

Брутто-формула образца №1 отличается от формул стехиометрических карбидов бора (B₂C и B₄C) и отражает следующий состав материала по основным Следующим этапом работы являлось проведение резистометрических измерений исследуемых образцов с помощью метода, разработанного в РФЯЦ-ВНИИЭФ (см., напр., [1–4]). В соответствии с данными методиками были получены экспериментальные зависимости удельного электрического сопротивления образцов № 1, № 2, № 4 и № 5 от плотности, приведенные на рис. 5. Для каждого образца приведены по две экспериментальные кривые, соответствующие двум параллельным измерениям.

Полученные экспериментальные кривые обрабатывались с использованием подходов, изложенных, например, в работах [1–3]. В результате обработки были установлены искомые в настоящей работе значения удельного сопротивления исследуемых образцов при плотности ~1,6 г/см³ (см. табл. 2), полученные экстраполяцией экспериментальных кривых, приведенных на рис. 5, на указанную плотность с помощью известного уравнения (1) [1–3]:

$$\gamma = \gamma_{\tilde{O}n} \vartheta^2 \left(1 - \frac{\Theta}{\Theta_c} \right)^b \tag{1}$$

где γ – удельная электропроводность порошкового материала, $Om^{-1} \cdot cm^{-1}$; $\gamma_{\delta n}$ – удельная электропроводность порошкового материала в беспористом состоянии, $Om^{-1} \cdot cm^{-1}$; ϑ – относительная плотность порошка, отн. ед; Θ – относительная пористость порошка, отн. ед; Θ_c – критическая пористость порошка, при стремлении Θ к которой удельная электропроводность порошкового материала γ стремится к нулю, отн. ед; b – критический индекс (показатель степени) относительного проводящего сечения или электропроводности, безразмерный.



Рис. 5. Результаты резистометрических измерений исследуемых порошкообразных образцов карбида бора

Также в табл. 2 приведены значения критической плотности ($\vartheta_c = 1 - \Theta_c$), соответствующей достижению порошком электропроводного состояния, и значения относительного порога перехода в электропроводное состояние τ_c , рассчитанные по уравнению (2) из работ [2, 3]:

$$\tau_c = \frac{\vartheta_c - \vartheta_{ymp}}{1 - \vartheta_{ymp}} \tag{2}$$

Значения плотности после утряски 9_{ymp} определялись путем засыпания порошка в матрицу калиброванного объема с последующим виброуплотнением до достижения постоянного объема [2, 3].

По данным табл. 2 можно заключить, что все образцы начинают проводить ток только при приложении внешнего уплотняющего усилия, поскольку для всех образцов значения параметра τ_c положительны [2, 3].

Согласно результатам измерений, образец № 5 имеет наибольшее удельное сопротивление при плотности 1,6 г/см³, и наибольшее значение критической плотности из всех исследованных образцов. Это факт вполне закономерен, поскольку данный порошок

является значительно более мелким по сравнению с остальными порошками. Вследствие этого, содержание межчастичных контактов в единице объема для данного порошка гораздо выше, и его сопротивление, пропорциональное количеству этих контактов [4], также существенно выше.

Таблица 2

Результаты	резистомет	рического	исследования
1	0.001101101101	p	neede a bannin

№ образца	Образец №1	Образец №2	Образец №4	Образец №5
Удельное со- противление при плотности ~ $1,6 \ \Gamma/cm^3$, Ом × см, σ	1,6×10 ³	6,0×10 ²	$3,3 \times 10^{3}$	3,6×10 ⁴
Критическая плотность, г/см ³ , 9 _с	1,04	0,96	1,09	1,12
Плотность после утряски, г/см ³ , 9 _{утр}	1,29	1,40	1,43	1,21
Относительный порог перехода в электропро- водное состоя- ние, отн.ед. <i>т</i> _с	0,86	1,10	0,79	0,43

Анализ резистометрических параметров, приведенных в табл. 2 для образцов № 1, № 2 и № 4, свидетельствует о том, что все эти порошки достаточно близки друг другу по электропроводящим свойствам. Меньшее удельное сопротивление образца № 2 обусловлено, в данном случае, отличиями в его фракционном составе от образцов № 1 и № 4. Образец № 2 является полидисперсным. По данным ЭМ, содержит некоторое количество мелкой (менее ~60 мкм) и крупной (~120-200 мкм) фракций. В данной работе этот порошок исследовался без предварительного рассева. В то же время, в образцах № 1 и № 4, подвергавшихся предварительному измельчению в фарфоровой ступке, как мелкая, так и крупная фракции, содержащиеся в порошке после измельчения в достаточно большом количестве, перед измерениями были отсеяны. В результате образцы №1 и №4 фактически представляли собой фракцию с размером частиц 64-125 мкм. Поскольку, как уже было отмечено выше, наличие более крупных частиц в образце способствует уменьшению его удельного сопротивления, данный фактор является первой причиной наблюдаемого различия. Во-вторых, как показано в работе [2], эффективность проводящей системы в полидисперсных порошках при прочих равных условиях выше по сравнению с аналогичными монодисперсными порошками из-за более плотной упаковки частиц. По этой причине сопротивление полидисперсного порошка при одной и той же плотности, как правило, ниже, по сравнению с сопротивлением монодисперсного порошка, что является второй причиной, объясняющей наблюдаемое различие (см. табл.2).

По совокупным результатам проведенного исследования был сделан вывод, что реализация предложенной технологической цепочки перевода исходного мелкодисперсного порошка в материал с плотностью ~1,6 г/см³ позволит реализовать процесс плазмохимического синтеза на изотопнообогащенном карбиде бора, что впоследствии было подтверждено на практике.

Выводы

1. Проведены сравнительные исследования структуры, элементного состава и электропроводящих свойств пяти образцов карбида бора, отражающих отдельные стадии технологической цепочки перевода исходного мелкодисперсного порошка, обогащенного по изотопу бор-10, в материал с плотностью ~1,6 г/см³.

2. Показано, что частицы всех сравниваемых порошков имеют преимущественно откольную форму и ровные грани, однако, в некоторых образцах содержатся частицы, отличающиеся от остальных наличием многочисленных пор. Также установлено, что соотношение углерод-бор для исследованных порошкообразных образцов, определенное с помощью РСМА, варьируется в широких пределах от 1:2,18 до 1:5,59.

3. Установлено, что значения удельного электрического сопротивления при плотности ~1,6 г/см³, требуемой для зажигания дуги в процессе плазмохимического синтеза, для всех исследованных образцов достаточно близки. Небольшие расхождения в величине данного параметра вызваны имеющимися различиями во фракционном составе сравниваемых материалов, обусловленными их предысторией.

Литература

1. Mokrushin V. V., Tsarev M. V. Resistivity Measurements for Characterization of SHS Powders // International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis. 2007. Vol. 16. No 2, P. 96–104.

2. 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.

3. 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.

4. Царев М. В., Лошкарев В. Н., Постников А. Ю. и др. Исследование химической активности и проводящих свойств нанодисперсных и микронных порошков титана и алюминия // Материаловедение. 2008. № 10. С. 24–28.

СЕКЦИЯ 4

Информационные системы и технологии

Председатели секции:

д-р техн. наук А. Н. Гетманец канд. техн. наук Н. Н. Вовк О. В. Кривошеев

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ SCADA «ЛАБОРАТОРНЫЕ СИСТЕМЫ» ДЛЯ РЕШЕНИЙ ПО АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ УРОВНЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

<u>Т. В. Байкова</u>, Д. М. Ларин, А. В. Емельянов, А. А. Митенов, А. А. Стеньгач

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

В РФЯЦ-ВНИИЭФ развивается целый ряд направлений исследований, имеющих фундаментальное и прикладное значение. Для проведения этих исследований используется существующая экспериментальная и испытательная база ВНИИЭФ, а также создаются новые экспериментальные установки. Технические комплексы (ТК) установок работают под управлением специального программного обеспечения (ПО).

Существуют различные подходы к автоматизации ТК – это использование коммерческих пакетов, создание собственных узкоспециализированных программ, создание собственного многоцелевого программного пакета, ориентированного на определенный круг задач измерений и управления. Оценивая технические требования к создаваемым программнотехническим комплексам (ПТК), и руководствуясь требованиями нормативных документов к ПО средств измерений, был выбран путь создания собственного многоцелевого пакета.

В данной работе описывается разработка комплекса ПО SCADA «Лабораторные системы», позволяющего в сжатые сроки создавать ПТК уровня экспериментальной установки.

Описание типовой задачи по автоматизации

Сформулируем технические требования (ТТ), предъявляемые к ПО ПТК типовой экспериментальной установки, обеспечивающей измерение параметров специзделий и управление элементами установки.

ПО должно выполнять регистрацию аналоговых и дискретных параметров, а также временных параметров технологического процесса.

Соответственно аналоговый параметр является величиной, изменяющейся непрерывно (температура, давление в частях установки), а дискретный может принимать только фиксированные значения (насос включен/выключен, вентиль открыт/закрыт).

Управление элементами установки должно выполняться по команде оператора и/или в автоматическом режиме.

По технологическим требованиям процесс измерения должен быть непрерывным, продолжительностью до 72 часов. Частота сбора данных с оборудования до 500 КГц.

Измерение давления газовой смеси в экспериментальной установке должно осуществляться в диапазоне от 1 до 2000 кгс/см². Измерение температуры должно осуществляться в пределах от минус 100 °С до плюс 1000 °С.

Для отображения текущего состояния регистрируемых параметров ПО должно реализовывать функцию человек – машина интерфейс (ЧМИ).

Применяемое, в качестве средств измерений, оборудование должно быть сертифицировано, внесено в государственный реестр средств измерений и допущено к применению в Российской федерации.

Разрабатываемое ПО должно быть аттестовано в соответствие с требованием ГОСТ Р 8.654-2015. Стандарт устанавливает обязательные требования к ПО средств измерений (СИ), применяемых в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, обусловленных необходимостью защиты ПО и измерительной информации от непреднамеренных и преднамеренных изменений, его идентификации и оценки влияния на метрологические характеристики СИ [1].

Обоснование разработки

Обобщая TT разрабатываемых экспериментальных установок, видно что несмотря на различное назначение этих установок, их системы измерения, управления и визуализации имеют много общего по структуре, выполняемым функциям, аппаратному и программному обеспечению.

Основные функции ПО, позволяющие выполнить полноценный проект автоматизации:

- сбор данных от оборудования;

– первичная обработка данных;

- ведение архивов данных (баз данных);

– представление динамических мнемосхем объекта;

представление трендов измеряемых величин;

- выдача сообщений о неисправностях и авариях;

– обработка команд управления;

- печать протоколов и отчетов.

Данный набор функций реализует ПО, определяемое, как SCADA-система, что дает основание воспользоваться коммерческим ПО.

С другой стороны, использование коммерческого пакета общего назначения оправдано для достаточно крупных дорогостоящих промышленных проектов, когда можно позволить покупку и ориентированного на него оборудование, обучение персонала, создание службы технической поддержки. Такие пакеты характеризуются большим объемом и высокими аппаратными требованиями. Способность адаптации стандартных пакетов к меняющимся условиям, которые характерны для исследовательских задач, достаточно низка. Большинство этих пакетов являются средой разработки, а освоение сложного коммерческого пакета общего характера и адаптация его для интересующего круга задач может оказаться ничуть не проще написания собственного, узкоцелевого пакета.

Разработка узкоспециализированных программ оправдана для небольших систем измерения и управления. Однако слабым местом этого подхода является техническая поддержка установки, так как программу, как правило, никто кроме автора поддерживать не может. Поэтому время жизни таких программ, с учетом быстрого прогресса вычислительной и измерительной техники, невелико.

Учитывая сказанное и принимая во внимание такой важный фактор как независимость от импортных разработок, был выбран путь создания собственного многоцелевого пакета, ориентированного на решение определенного круга задач измерений и управления.

Назначение ПО SCADA «Лабораторные системы»

ПО SCADA «Лабораторные системы» предназначено для создания программно-аппаратных комплексов, выполняющих сбор данных с аппаратуры комплекса, их отображение, обработку и управление элементами комплекса. ПО SCADA «Лабораторные системы» обеспечивает:

 непрерывный дистанционный мониторинг основных физических параметров комплекса, в том числе давления, температуры, текущего состояния оборудования;

 отображение результатов измерений на экране монитора управляющего компьютера в виде мнемосхем и визуальных объектов;

 – управление удаленными объектами (автоматическое и/или инициируемое оператором);

 непрерывное сохранение данных измерений в файлы на жестком диске персонального компьютера;

 пост-обработку данных измерений, в том числе графическое отображение в едином временном диапазоне, применение расчетных алгоритмов обработки.

Архитектура ПО SCADA «Лабораторные системы»

Архитектура ПО SCADA «Лабораторные системы» приведена на рис. 1.

В структуру ПО SCADA «Лабораторные системы» входят:

- автоматизированное рабочее место (АРМ);

 – модуль сбора данных (для каждого типа оборудования);

- модуль обработки данных;

– модуль идентификации ПО.



Рис. 1. Архитектура ПО SCADA «Лабораторные системы»

Модуль АРМ

Модуль АРМ предназначен для визуализации текущего состояния ПТК. АРМ обеспечивает выполнение функций:

 обмен данными с модулями сбора, в т. ч. прием, обработку, передачу управляющих команд;

 визуализацию данных СИ, в т. ч. результатов измерений и/или результатов обработки измерительной информации;

 вывод аварийных или предупредительных сообщений;

конфигурирование визуального представления
 СИ посредством элементов графического интерфейса;

 обеспечение защиты подлинности и целостности файлов с данными;

 автоматическое выполнение пользовательских программ (алгоритмов) логического управления.

В структуре АРМ выделены подсистемы:

- подсистема визуализации;

- подсистема графического конфигурирования;

- подсистема логического управления.

Подсистема визуализации

Общий вид графического интерфейса подсистемы визуализации изображен на рис. 2.

Для вывода аварийных и предупредительных сообщений, упорядоченных по времени их возникновения, предназначено окно тревог, позволяющее контролировать тревоги, не вызывая конкретную экранную форму. Пример окна тревог приведен на рис. 3.

Для визуального представления текущего состояния элементов ПТК используются визуальные компоненты:

- мнемосхема;
- тренд;
- аналоговый датчик;
- дискретный датчик;
- клапан;
- кнопка.



Рис. 2. Графический интерфейс подсистемы визуализации

-	6 0					-
Дата	Tieri	Параметр	Эначение	Kowwertapel	Kevitr.	14
05/01/2015 (3.15.12	X	HOK_I	29 100000	Command Macadamers Sought that we will patricipal supplied of two		
05/21/2015 13:19:00	nc .	N/1K_4	28.000000	Превышение менимального допустичного значения диапазона предупредительной уставки	×	
05/21/2015 13 18:09	n¢.	IDK S	28,200001	Превышные манимального допустиного эначения диапазона придпредотельной уставои	~	
05/21/2015 13 18:08	40	MDK.2	37 600000	Отказ устройства	×	
05/21/2015 10 10:00	140	nnk_1	33.000000	Отказ устролотва	1	
						-

Рис. З.Окно тревог

Мнемосхема

Для представления телеметрической схемы объекта автоматизации предназначен визуальный компонент – мнемосхема, на котором могут быть размещены другие визуальные компоненты. Переход по экранам осуществляется при выборе соответствующего элемента списка экранов. В качестве подложки мнемосхемы может быть использован файл графического формата (bmp, jpeg). Список экранов и фрагмент мнемосхемы приведены на рис. 4.



Рис. 4. Визуальный компонент – Мнемосхема

Тренд

Визуальный компонент – тренд предназначен для отображения зависимости привязанных параметров в исторической перспективе. Пример тренда приведен на рис. 5.

Область настройки тренда позволяет осуществить:

 привязку параметра системы к соответствующему графику тренда;

 вкл./выкл. отображения соответствующего графика параметра;

 выбрать активную ось ОУ (левую/правую) для соответствующего графика параметра;

 изменить цвет отображения соответствующего параметра.

Дискретный датчик

Для отображения текущего значения дискретного параметра предназначен визуальный компонент -Дискретный датчик. Пример Дискретного датчика приведен на рис. 7.



Рис. 7. Визуальный компонент – Дискретный датчик: а – состояние по умолчанию; б – состояние на заданное значение

Клапан

Для отображения текущего состояния и выполнения функции управления электрическим/пневматическим клапаном предназначен визуальный компонент – Клапан. Пример клапана приведен на рис. 8.



Рис. 8. Визуальный компонент – Клапан: а – состояние не определено; б – клапан открыт; в – клапан закрыт

Пример окна управления телемеханизированным клапаном приведен на рис. 9.

oo boitti.	кл. электрический
Наименование клапана:	B3
Текущее состояние:	НЕОПРЕД.
Команда управления:	ЗАКРЫТЬ

Рис. 9. Окно управления клапаном



Рис. 5. Визуальный компонент – Тренд

Аналоговый датчик

Для отображения текущего значения аналогового параметра предназначен визуальный компонент – Аналоговый датчик. Пример Аналогового датчика приведен на рис. 6.



Рис. 6. Визуальный компонент – Аналоговый датчик: а – достоверное значение; б – недостоверное значение

Кнопка

Визуальный компонент- Кнопка предназначен для запуска пользовательской подпрограммы логического управления (алгоритма или стороннего исполняемого модуля *.exe, *.bat).Пример визуального компонента Кнопка приведен на рис. 10.



Рис. 10. Визуальный компонент – Кнопка: а – состояние по умолчанию; б – состояние на заданное значение

Подсистема графического конфигурирования

Подсистема графического конфигурирования предназначена для создания визуальных компонентов системы и настройки свойств отображения. Создание/удаление визуальных компонентов выполняется при помощипанели инструментов, представленной на рис. 11.



Рис. 11. Панель создания визуальных компонентов

Подсистема графического конфигурирования позволяет производить настройку свойств визуальных компонентов, на примере аналогового датчика, при помощи диалогового окна изображенного на рис. 12.





Подсистема логического управления

Подсистема логического управления обеспечивает, независимое от основных программных потоков, исполнение пользовательских программ (алгоритмов) логического управления в ПТК.

Для описания логики автоматического управления оборудованием используется внутренний язык программирования.

Модуль сбора данных

Модуль сбора данных предназначен обмена данными с соответствующим оборудованием экспериментальной установки. В настоящее время разработаны модули сбора, список которых приведен в табл. 1.

Структура всех модулей сбора данных унифицирована. На рис. 13 приведена структура модуля сбора La2USB.



Рис. 13. Модуль сбора данных LA2USB

Модуль сбора данных выполняет следующие функции:

- обмен данными с оборудованием;

 первичное преобразование принятых данных к значениям физической величины для каждого канала;

 – запись метрологически значимых данных в файл специального формата (.d15);

 обеспечение защиты подлинности и целостности файла с данными;

 – обмен данными с модулем АРМ, в т. ч. передача данных для визуализации и прием управляющих команд.

Таблица 1

Наименование модуля	Оборудование, производитель
Модуль сбора La2USB	Преобразователь измерительный аналого-цифровой ЛА-2USB-12, ЗАО «Руднев – Шиляев»
Модуль сбора Термодат	Прибор для измерения и регулирования температуры «ТЕРМО- ДАТ», ООО «Техноавтоматика»
Модуль сбора ОРС	Оборудование, поддерживающее обмен по стандарту ОРС, в т. ч. контроллеры и модули серий 7000, 8000, ICPDAS
Модуль сбора Sartorius5200	Весы «Sartorius 5200»
Модуль сбора AdvantechUSB4711A	Плата высокоскоростного сбора данных AdvantechUSB-4711A, Advantech
Модуль сбора WikaD11	Преобразователь давления измерительный WIKAD-11, WIKA

Список разработанных модулей сбора

Описание хранимых или передаваемых наборов данных

Сбор, хранение и передача наборов данных выполняется в виде файлов специального формата (.d15). Формат и размеры полей файла приведены в табл. 2.

Таблица 2

Поле	Размер, байт	Назначение
begin_time	8	Временная метка начала сбора
data_crc32	4	Защита подлинности и целостности данных
drv_crc32	4	Идентификационный признак модуля сбора данных
cfg_crc32	4	Идентификационный при- знак конфигурации
data	до 2 Гб	Данные измерений

Формат и размеры полей файла .d15

Модуль обработки данных

Модуль обработки данных предназначен для постобработки собранных и сохраненных в файлы программными модулями сбора массивов информации.

Модуль обработки данных выполняет следующие функции: – загрузку ранее сохраненных модулями сбора массивов информации;

 обеспечение защиты подлинности и целостности файла с данными;

– графическое отображение загруженных данных в едином масштабе и временном диапазоне;

 применение к исходным массивам информации фильтров обработки данных;

 просмотр критически важных диапазонов информации с выводом текущих значений;

 – экспорт полученных после обработки массивов информации в приложение MS Excel;

копирование области отображения в буфер обмена (Clipboard);

- вывод области отображения на печать.

Пример главного окна модуля с загруженными данными показан на рис. 14.

Интерфейс модуля обработки данных содержит рабочие области:

– главное меню – содержит вкладки Файл, Вид,
 Обработка с необходимым набором инструментов;

область инструментов – содержит набор инструментов (зависит от выбранной вкладки) для загрузки ранее сохраненных массивов информации, вывода информации об эксперименте, настройки каналов для отображения, обработки данных;

– область отображения данных – отображает данные в графическом виде.



Рис. 14. Главное окно модуля обработки данных

Модуль идентификации

Модуль идентификации предназначен для выполнения функции защиты ПО. Функция защиты ПО реализована на основе алгоритма хеширования, который сжимает содержимое блока данных в число определенной длины (хеш-сумма), такое, что изменение любого бита блока данных приводит к другой хеш-сумме.

Выполнение требований нормативной документации

Как уже было сказано ранее, разработанное ПО должно быть аттестовано в соответствие с требованием ГОСТ Р 8.654 – 2015, который распространяется на ПО автоматизируемых систем, функционирующих с использованием СИ или компонентов измерительных систем. Рассмотрим требования, которые были учтены при разработке комплекса ПО.

В соответствие требованию к разделению программного обеспечения в разрабатываемом ПО функционально выделены метрологически значимые и не значимые части (рис. 1). При таком разделении только метрологически значимые части ПО подлежат оценке соответствия – сертификации.

Для защиты сертифицируемого ПО и данных от случайных или непреднамеренных изменений реализовано:

 в сертифицируемом ПО отсутствуют функции удаления и изменения данных; в файлы, содержащие метрологически значимые данные, введены дополнительные поля для записи идентификационных признаков (см. табл. 2);

 контроль идентификационных признаков и целостности на этапе обработки данных;

 – событие обнаружения сбоев случайного или непреднамеренного характера фиксируется в журнале событий.

Для защиты сертифицируемого ПО и данных от преднамеренных изменений предусмотрена:

 защита метрологически значимой части ПО СИ от несанкционированной модификации выполняется методом идентификации;

 – защита данных обеспечивается путем использования дополнительных полей для записи идентификационных признаков (см. табл. 2).

Заключение

В ходе выполненных работ было разработано ПО SCADA«Лабораторные системы», позволяющее в кратчайшие сроки создавать ПТК уровня экспериментальной установки. Эксплуатация нескольких ПТК, созданных на базе разработанного ПО, показала хорошие эксплуатационные характеристики, высокую надежность и возможность быстрой адаптации для решения новых задач.

Литература

1. ГОСТ Р 8.654-2015. Государственная система обеспечения единства измерений. Требования к программному обеспечению средств измерений.

ПРАКТИКА РЕАЛИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПЛАНИРОВАНИЯ В РАМКАХ ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВОМ ТИС

<u>Е. И. Борисова</u>, Т. Н. Офицерова, О. Н. Занькова

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

Внедрение на предприятиях страны современных автоматизированных систем управления – один из важнейших показателей, определяющих конкурентоспособность предприятий, способность производить продукцию для внутреннего потребителя и на экспорт с лучшими качествами и меньшими затратами на производство.

Для того чтобы удовлетворять современным международным требованиям, автоматизированные системы для производств различных типов должны не только обеспечивать оптимальное планирование и учет затрат, управление основными производственными процессами, но и создавать интегрированную информационную среду, в которой обеспечивается поддержка жизненного цикла продукции.

Во-первых, успешная реализация производственной программы предприятия определяется не только качеством ее подготовки и наличием детального плана выполнения, но и эффективной организацией мониторинга ее осуществления. Во-вторых, процесс организации производственной деятельности на предприятиях основан, в том числе и на различных видах информации, используемой для принятия управленческих решений. Поэтому своевременность и достоверность информации становятся одними из ключевых факторов, обеспечивающих возможность повышения эффективности производства. В-третьих, для обеспечения управления производственными процессами в полном объеме, необходима интеграция различных классов информационных систем (ИС) в единое информационное пространство.

Опыт создания и внедрения ИС и информационных технологий (ИТ) показывает, что эффективность функционирования организации зависит не только от уровня автоматизации процессов, но и от организационной составляющей: целенаправленности, аналитичности, регламентированности процедур самой управленческой деятельности, а также и от информационной обоснованности принимаемых специалистами решений.

Поэтому с целью достижения эффективности предприятия с использованием ИТ, в первую очередь, необходима разработка методики создания регламентированной технологии решения функциональных задач, анализа информации, требований и подготовки к принятию решений, внедрение целенаправленных, научно обоснованных процедур управления производством на предприятиях, а затем – внедрение информационных систем управления производством (ИС УП). В рамках реализации Программы «Создание типовой информационной системы» (ТИС) в 2011– 2014 гг. была создана интегрированная система автоматизации деятельности предприятия.

Результатом работ одного из проектных направлений Программы «Системы промышленной автоматизации – сквозные циклы, 3D-проектирование» стала реализация проекта «Внедрение MES-системы в структурных подразделениях».

Цель проекта – разработка и внедрение ИС «Управление производством».

В отличие от принятых правил разработки и внедрения ИС, при создании ИС УП особое внимание было уделено описанию и моделированию процессов управления производством с последующей их оптимизацией и реализацией в ИС. Основная задача проекта – регламентация и реализация в логике ИС оптимизированных процессов планирования и диспетчирования производства.

ИС УП предназначена для управления производством на уровнях объемно-календарного, оперативного, внутрицехового планирования и диспетчирования.

ИС УП обеспечивает следующую функциональность:

 планирование и управление экспериментальным, опытным и серийным производством;

 диспетчирование экспериментального, опытного и серийного производства;

 управление планированием потребности в МТР, учетом и распределением материальных ресурсов при изготовлении экспериментального образца изделия, при опытном и серийном производстве изделий;

 управление ТПП при изготовлении экспериментального образца изделия, при опытном и серийном производстве изделий;

 управление качеством в экспериментальном, опытном и серийном производстве;

– поддержку производственного документо-оборота.

Этапы реализации проекта «Внедрение MES-системы в структурных подразделениях»

Первым этапом реализации проекта стало концептуальное проектирование, в завершении которого были разработаны концептуальный проект и технические требования на подсистемы ИС.

Концептуальный проект содержит:

модель автоматизированной системы управления, охватывающую все процессы, входящие в рамки проекта;

 описание бизнес-процессов в виде взаимосвязанных и взаимодополняющих графических диаграмм;

 предварительный состав данных и видов документов, управляемых с применением системы;

 описание применяемых методик, список используемых регламентирующих и нормативных документов.

Технические требования включают функциональные требования к ИС, целевую техническую архитектуру и архитектуру приложений, экранные формы пользовательских интерфейсов, спецификации интеграции с другими системами.

Второй этап реализации проекта – разработка *технического проекта*, включающего в себя:

 решения по структуре системы, подсистем, средствам и способам связи для информационного обмена между компонентами системы, подсистем;

 решения по взаимосвязям ИС со смежными системами, обеспечению ее совместимости;

 решения по режимам функционирования, диагностированию работы системы;

 решения по численности, квалификации и функциям персонала АС, режимам его работы, порядку взаимодействия;

 состав функций, комплексов задач реализуемых системой;

- решения по комплексу технических средств;

 решения по составу информации, объему, способам ее организации, видам машинных носителей, входным и выходным документам и сообщениям, последовательности обработки информации и другим компонентам;

 решения по составу программных средств, языкам программирования.

На данном этапе были разработаны технические решения для создания ИС.

Результатом третьего этапа «Рабочая документация» стала разработка и настройка функций ИС, выпуск руководств пользователей и регламентов, описывающих порядок выполнения каждой функции, исполнителей, последовательность, сроки и ограничения выполнения функций.

Параллельно с разработкой рабочей документации проводилось обучение ключевых пользователей по каждой роли ИС.

Этап «Ввод в эксплуатацию» начался с автономных, а затем комплексных испытаний системы. Комиссия проверяла соответствие действий пользователя разработанным Регламентам, а полученных результатов в процессе выполнения функций – требованиям ТЗ. Все недостатки записывались в протоколы тестирования. По результатам автономных испытаний было зафиксировано 500 замечаний и 150 предложений. После устранения недостатков процедура тестирования повторялась. Следующий шаг – комплексные испытания, по результатам которых было зафиксировано 280 замечаний и 150 предложений. После повторного тестирования и реализации предоставленных замечаний ИС была введена в опытную эксплуатацию.

Опытная эксплуатация проводилась с целью:

– определения фактических значений количественных и качественных характеристик ИС;

 готовности персонала к работе в условиях ее функционирования;

 проверки комплектности и качества рабочей и эксплуатационной документации, а также ее корректировки;

 проверки средств и методов восстановления работоспособности ИС.

Опытную эксплуатацию проводили обученные ключевые пользователи подразделений, используя эксплуатационную документацию, на реальных производственных данных и в реальном масштабе времени. Они выполняли задачи по своей должности в рамках назначенных ролей с дополнительным выполнением контрольных функций за работой ИС.

Опытная эксплуатация системы проводилась на базе 10 цехов и 6 отделов. Ошибки работы системы, замечания и предложения фиксировались в системе в специальном журнале ИС. По результатам опытной эксплуатации было выявлено 103 замечания и 12 предложений. Устранение замечаний и предложений осуществлялось как разработчиком системы, так и специалистами отдела информационных технологий производства.

Опытная эксплуатация завершилась оформлением акта о допуске ИС к приемочным испытаниям.

Приемочные испытания ИС проводят для определения соответствия требованиям ТЗ, оценки качества опытной эксплуатации и решения вопроса о возможности приемки ИС в постоянную эксплуатацию. После завершения приемочных испытаний с 01.01.2015 г. ИС УП введена в постоянную эксплуатацию.

В постоянной эксплуатации техническая поддержка пользователей ИС УП осуществляется непосредственно сотрудниками отдела информационных технологий производства.

Линия технической поддержки представляет собой группу сотрудников отдела информационных технологий производства, являющихся кураторами, за которыми закреплены структурные звенья. Кураторы обладают соответствующими компетенциями во внедряемой системе и выполняют следующие обязанности:

 регистрация обращений пользователей по использованию системы управления производством;

 организация и техническая поддержка пользователей по обращениям;

 прием и систематизация предложений по развитию функциональности системы управления производством;

 разработка, актуализация эксплуатационной документации, методических материалов; принятие и согласование решений о необходимости развития функциональности системы управления производством;

 взаимодействие с центрами компетенций по 3D и ERP в части интеграции ИС УП и обеспечения функционирования ИС УП в сквозной 3D-технологии;

 проектирование, адаптация и настройка новой функциональности;

 организация обучения и участие в обучении персонала пользованию комплексом систем управления производством в процессе управления производством, при управлении жизненным циклом изделия (ЖЦИ) и сквозной технологии создания изделий;

 подготовка предложений о необходимости взаимодействия с разработчиками ПО, при невозможности реализации своими силами;

 анализ и систематизация получаемой в рамках работы информации, подготовка отчетов и предложений по оптимизации и дальнейшему повышению качества работ.

Практика реализации производственного планирования в рамках внедрения системы управления производством

При эксплуатации ИС УП в отделах и цехах была определена необходимость организационных изменений процессов управления производством, рис. 1, в части реализации производственного планирования и мониторинга исполнения плана на уровне завода и цеха.

Специалистами ОИТП совместно с заинтересованными сотрудниками функциональных отделов, служб, цехов была проведена большая работа по выстраиванию работы в логике ИС, а также адаптации и настройки ИС под согласованный организационный порядок. Уточненный порядок работы пользователей в системе отражен в разработанном документе «Временный регламент работы в системе управления производством структурных звеньев завода». Регламент также определяет правила, последовательность, результаты и сроки выполнения специалистами структурных звеньев завода функций в ИС УП.

Изменение порядка работы в системе связано в основном с современными возможностями ИС, которые позволили оптимизировать производственное планирование на уровне завода.

1. На этапе планирования уровня завода система в режиме реального времени позволяет рассчитать производственный заказ, а точнее сформировать состав изделия на основе ВСИ, с подбором КТП и расцеховочных маршрутов.

2. Автоматически определяется дефицит конструкторско-технической документации (КТД).

3. Жизненный цикл производственного заказа в системе поддерживается механизмом смены состояний заказа, что позволяет отслеживать прохождение заказа по этапам производственного планирования и управлять корректностью планов цехов (например, заказ, необеспеченный КТД не включается в план цеха на изготовление). Что в свою очередь накладывает определенные требования к планированию уровня завода – формирование, материальное и трудовое нормирование КТП.

4. Автоматизированный механизм уточнения состава изделий по инструктивным письмам и указаниям путем создания экземплярной ВСИ.

5. После расчета производственных заказов система автоматически определяет возможность исполнения заказа в указанные сроки по технологическому циклу.

6. ИС предоставляет выбор варианта расчета сроков запуска-выпуска изделия по методу «стартфиниш» и «финиш-старт», таким образом, предоставляя планировщику первоначальный инструмент оптимизации сроков запуска в производство изделий, исходя из директивного срока изготовления.

7. В актуальной потребности предоставляется информация по обеспеченности материалами и ИВП и работает механизм автоматического бронирования материалов со складов.



Рис. 1. Процесс управления производством

8. Существует возможность использования второго этапа оптимизации производственного плана – расчет наличной и требуемой мощностей на плановый период. Требуемая мощность учитывает приоритетность позиций изготовления и наличие обеспеченности МТР. На основе полученных данных автоматически рассчитывается распределенная мощность, определяются сроки изготовления с возможностью автоматизированного переноса в производственную программу.

9. По имеющимся в плане заказам на определенный период автоматически рассчитывается загрузка производственных мощностей в разрезе цехов, видов работ, оборудования с учетом ресурсов, с представлением информации по «перегрузу», и данных для корректировки планировщиком данной ситуации (перепланирование в другие цеха).

На цеховом уровне также проведены организационные изменения и настройка системы. Для каждой из пяти типовых ролей ответственных за внутрицеховое планирование были разработаны Стандартные операционные процедуры, в которых подробно описана последовательность действий в системе и представлены экранные формы.

Оптимизация процесса планирования на уровне цеха в ИС УП обеспечивается реализацией механизма, позволяющего выстроить логичную и прозрачную цепочку управления от уровня руководства цеха до конкретных исполнителей.

Подсистема «Внутрицехового планирования и диспетчирования уровня цеха» ИС УП позволяет работать с производственным планом цеха и в режиме реального времени контролировать его выполнение в специальном интерфейсе – «Диспетчерская доска».

У руководства цеха, ПДБ цеха появляется возможность оперативно получать представление о возникающих отставаниях от требуемого процесса, состоянии комплектации, ходе изготовления и дает возможность принимать и осуществлять требуемые управленческие воздействия.

Вести планирование и учет исполнения операций на уровне участка и рабочего центра позволяет интерфейс ИС – «Операционный план».

Начальник участка, мастер, начальник БТК цеха имеют возможность в режиме реального времени планировать и отслеживать выполнение технологических операций, планировать и отслеживать контрольные операции, результаты операционного контроля и в случае возникновения брака, отклонений от запланированных сроков выполнения незамедлительно принимать решения и перепланирование операций.

Оптимизация процесса планирования на уровне цеха в ИС УП представлена так же следующими возможностями:

1. автоматическое определение позиций, готовых к запуску в цехе;

2. анализ обеспеченности материалами и инструментом возможен при непосредственном просмотре плана цеха;

 автоматическое формирование планов участка, сменных заданий мастера и исполнителя, нарядов на выполнение работ;

4. выстроен процесс планирования, диспетчирования и учета факта изготовления и факта возникновения затрат, охватывающий все ключевые роли начальник цеха – заместитель начальница цеха – ПДБ – начальник участка – мастер нормировщик – кладовщик – рабочий – БТК;

5. реализованная логика автоматического формирования накладных в Производственных листах «Запуск/Выпуск», межцеховое перемещение полуфабрикатов по маршруту изготовления;

6. формирование оптимальных производственных расписаний запуска ДСЕ на оборудование цеха, реализованное с использованием сложного математического алгоритма, позволяющее автоматически определить станки, на которых в течение смены нужно выдать задания на выполнение технологических операций;

7. использование штрих-кодирования на складе при выдаче материалов, при приеме заданий на оборудовании с ЧПУ;

8. автоматизированная передача заданий на оборудование с ЧПУ с указанием последовательности выполнения операций ДСЕ;

9. загрузка и выгрузка УП на оборудование с ЧПУ с использованием штрих-кодирования;

10. отчетность по выполнению производственных заданий с использованием штрих-кодирования.

11. мониторинг работы станков: сбор данных по режимам работы оборудования и формирование отчетов по эффективности загрузки станков, простоям и их причинам.

Система позволяет ускорить процессы управления и диспетчирования производства на уровне цеха, сделать их более управляемыми, прозрачными и точно определять на каком этапе изготовления находится заказ для своевременного принятия решений.

Практические показатели результатов оптимизации производственных процессов на примере монтажно-гальванический цеха

В рамках работ по внедрению ИС УП было проведено детальное обследование и описание основных производственных процессов деятельности цеха. Широкая номенклатура и разнообразие выпускаемой продукции цеха, а также многооперационность технологических процессов и большое разнообразие используемого оборудования в производстве, определяют требования к функциям подсистемы ИС. ИС позволяет оперативно и наглядно получать представление о ходе изготовления, возникающих отклонениях от запланированного процесса, оперативно реагировать на характерное для опытного производства многократное изменение производственного плана, конструкторской и технологической документации и предоставить возможность оперативно принимать требуемые управленческие решения.

Построение модели действующих процессов в цехе позволило выстроить фактическую последовательность выполняемых операций производственных процессов, выявить отклонения реальных процессов от действующих положений, понять причины этих отклонений, создать модели процессов, позволившие выявить недостаток или дублирование действий участников рабочего процесса, провести анализ эффективности рабочих процессов и спроектировать модели процессов «как должно быть».

В процессе работ по внедрению ИС УП в части применения организационных воздействий было проведено измерение времени (картирование) выполнения процесса управления производством в цехе «как есть» и «как должно быть» с использованием ИС. На рис. 2 и рис. 3 представлены результаты, показывающие, как благодаря оптимизации процессов производства, удалось значительно сократить время выполнения производственных процессов.



Рис. 2. Время выполнения процесса «как есть»

На рис. 2 представлен график выполнения процесса «как есть»:

1. анализ плана производственных заказов в части сроков и обеспеченности позиций плана ресурсами (ИВП, материалы, комплектующие);

2. установка приоритетов изготовления изделий;

 формирование, согласование и отправка заявки дефицита ресурсов в МТО;

4. выдача заданий инженерам ПДБ для запуска изделий в производство;

5. формирование сопроводительного паспорта для ДСЕ, формирование наряда на изготовление ДСЕ, сбор КД, комплектующих;

6. формирование сменно-суточного задания и наряда рабочему;

7. нормирование операций рабочего;

8. запуск операции в работу;

9. предъявление продукции и документов в ОТК;

10. регистрация факта контроля, анализ и описание выявленных дефектов для передачи ДСЕ на доработку;

11. оформление ДСЕ после прохождения ОТК (дефектная), Оформление ДСЕ после прохождения ОТК (бездефектная);

12. регистрация перемещения готовой продукции на склад цеха;

13. формирование отчета по исполнению задания.



Рис. 3. Время выполнения процесса «как должно быть»

На рис. 3 представлен график выполнения процесса «как должно быть»:

1. анализ позиций производственного плана на текущий период;

 определение возможности запуска в производство. Формирование отчета сводной обеспеченности материалами, комплектующими;

3. запуск ДСЕ в производство: определение перечня позиций, формирование накладной на получение и списание ТМЦ, формирование сопроводительного паспорта;

4. формирование сменного задания мастеру, контроль выполнения сменного задания, выданного ранее;

5. формирование сменно-суточного задания и наряда рабочему;

6. нормирование операций рабочего;

 запуск операции в работу, закрытие выполненной операции, передача в ОТК;

 формирование сменно-суточного задания контролеру, регистрация факта контроля, анализ и регистрация выявленных дефектов ДСЕ для передачи на доработку;

9. оформление ДСЕ после прохождения ОТК (дефектная), оформление ДСЕ после прохождения ОТК (бездефектная);

10. регистрация выпуска партии ДСЕ;

11. мониторинг перемещения ДСЕ на склад;

12. формирование отчета по исполнению.

В результате оптимизации процессов управления производством и внедрения ИС УП на цеховом уровне значительно сократилось время выполнения производственного процесса, достигнуто своевременное представление полной и точной информации о состоянии производства, обеспечения ресурсами, сокращены операции ручного ввода данных в ИС УП, что позволило значительно улучшить их точность и структурированность, а также сократить на создание отчетов по исполнению производственных заданий и плана цеха в целом.

Результаты внедрения ИС УП

Основными результатами внедрения ИС УП на уровне завода и цехов является организация и функционирование ИС в едином информационном пространстве, позволяющее предоставить всем пользователям актуальную информацию по состоянию производства в режиме реального времени, а также вовлечение в работу в ИС всех структурных звеньев от директора до кладовщика и рабочего.

Количественные показатели внедрения ИС УП представлены в таблице.

Количественные показатели внедрения ИС УП

Показатель	Значения
Обучено пользователей	82 человек
Отделы и цеха, участвующие в эксплуатации ИС	5 отделов, 17 цехов
Количество заказов в электронном плане 2015-2016 годов	1984
Количество закаченных МК	525584
Количество закаченных СП	120515
Количество сопроводительных паспортов	3884
Количество нарядов	1428

Проблемы, выявленные в ходе внедрения:

1. сжатые сроки проведения организационных изменений на основании оптимизации процессов и необходимостью внедрения ИС, что определяет параллельность упорядочивания процессов и реализации этих процессов ИС. Что в свою очередь приводит к многократной настройке и доработке функций ИС;

2. параллельность внедрения смежных ИС ТИС (PDM и ERP), что приводит к проблемам с обеспечением исходными данными и необходимостью миграции данных из исторических систем, что снижает их полноту из-за ограниченности информации в действующих системах;

 сопротивление сотрудников внедрению ИС, что связано с достаточно низкой квалификацией персонала для работы в ИС (особенно в цехах), увеличением нагрузки, отсутствием мотивации для внедрения;

4. недостаточная оптимизация работы пользователей с ИС УП в контурах разной степени конфиденциальности информации, что связано с реализованными односторонней интеграцией и организационными решениями.

Внедрение ИС УП является сложным и болезненным процессом. Но эффект успешного внедрения оправдывает ресурсы и усилия, направленные на его достижение.

Процесс внедрения ИС на любом предприятии не имеет окончательного вида, потому как система постоянно совершенствуется, ввиду изменений требований к показателям результативности деятельности предприятия, требований нормативно-законодательных актов, прогресса информационных технологий и методологий управления деятельностью предприятия.

ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ СХЕМ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММ ТЕСТИРОВАНИЯ НА ЯЗЫКЕ C++

<u>Д. Е. Боркивец</u>, А. И. Егоров, А. Г. Кузякин

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

Введение

Рост сложности задач, решаемых аппаратурой автоматики, неизбежно ведет к увеличению ее функциональной сложности, обуславливающей усложнение схемно-конструкторских решений. Это, в свою очередь, прямо отражается на габаритно-массовых характеристиках (ГМХ) приборов автоматики, порой определяющих применимость их на том или ином типе изделий.

Другой, не менее важной проблемой является обеспечение требуемого уровня стойкости аппаратуры автоматики, определяемого условиями ее применения. Реализация этого требования также приводит к усложнению функционала и, как правило, – к применению аппаратно избыточных схемотехнических решений. Более того, требование стойкости аппаратуры к воздействию внешних дестабилизирующих факторов резко ограничивает номенклатуру пригодных к применению в ней электронных компонентов.

Создание элементной базы нового поколения (высокой степени интеграции с субмикронными проектными нормами) становится основным и критически важным условием для конкурентоспособности электронной аппаратуры.

Разработка полупроводниковой элементной базы, в том числе сверх больших интегральных схем (СБИС) на основе базового матричного кристалла (БМК), для современной электронной аппаратуры является сложным и наукоемким процессом, требующим применения самых современных средств и методов проектирования.

Современные методы проектирования основываются на логическом синтезе структурной схемы из функциональных описаний, разработанных на специализированных языках программирования.

В процессе разработки функционального описания требуется разработка программы тестирования, которая позволяет проверить функционал описания схемы и отслеживать правильность вносимых поправок. Процесс верификации занимает одно из ключевых этапов разработке схемы.

Стандартный маршрут проектирования

Стандартный маршрут проектирования (рис. 1) начинается с предоставления технического задания, которое является исходными данными для разработки функционального описания и тестовой программы. В процессе и после разработки, производится моделирование, которое необходимо для проверки наличия требуемой функции в описании, после чего проверенную модель синтезируют и проверяют снова, чтобы убедиться, что синтез прошел правильно. После этого структурную электрическую схему передают изготовителю [1].

Стоит различать первый этап тестирования от второго. Моделирование на этапе проверки структурной схемы проводится один раз и дает информацию только о соответствии логики до синтеза и после. Моделирование на этапе отладки функционала дает информацию о соответствии результатов функции исходным данным, дает возможность наблюдать изменения, внесенные в описание, проверку влияния внесенного изменения на схему в целом. Оно выполняется итерационно, т. к. с увеличением функционального описания приходится дополнять тест для него и проверять снова, что влечет за собой большие временные затраты на проверку.

Функциональное описание и тестовая программа разрабатываются на языках описания цифровой аппаратуры.



Рис. 1. Стандартный маршрут проектирования

Цели и задачи

Целью данной работы является оптимизация этапа отладки функционального описания разрабатываемой схемы.

Для этого поставлены задачи сокращения времени моделирования и получения доступа к программным средствам на языке C++.

В докладе рассмотрены возможности программного средства, позволяющего проводить функциональное моделирование цифровых схем на языке описания аппаратуры с использованием программ тестирования на языке C++, который позволил упростить процесс и сократить время разработки теста.

Языки описания цифровой аппаратуры hardware description language (HDL)

Развитие современной элементной базы тесно связано с развитием методик проектирования сложных цифровых устройств. Разработка современных устройств невозможна без применения систем автоматизированного проектирования (САПР), которые выполняют значительную часть рутинной работы. Современные САПР обладают достаточным «интеллектом» для того, чтобы вместе с человеком участвовать в разработке схемы. Однако реализация открывающихся возможностей требует использования новых, современных методов проектирования.

На сегодняшний день наиболее эффективными считаются методы, использующие текстовые описания проектов вместо традиционных графических редакторов схем. В этом случае проект представляет собой текст, сохраняемый в файле или нескольких файлах, которые в совокупности определяют представления разработчика об устройстве и используются на всех этапах проектирования, в том числе при моделировании устройства и синтезе его принципиальной схемы. Проектирование цифровых схем с использованием языков описания аппаратуры позволяет полностью отказаться от графических редакторов принципиальных схем, при этом повысить скорость работы, надежность и удобство отладки. Тексты описания в большинстве языков проектирования дискретных устройств по составу синтаксических конструкций очень схожи с традиционными языками программирования. Поэтому часто такое текстовое описание называют программой на языке проектирования, или, коротко, HDL-программой, а конструкции, описывающие формирование принципиальной электрической схемы, называют операторами [2].

Другими словами, HDL-программа – это знаковая модель дискретного устройства. Такая модель может быть описана с различной степенью конкретизации. Давая возможность достаточно детально описывать структуру проекта, часто, вплоть до отдельных вентилей, языковое описание также позволяет описывать устройство на уровне алгоритмов его работы, возлагая при этом синтез самой структуры на систему автоматизированного проектирования (САПР). В этом заключается мощное превосходство языков описания аппаратуры перед графическими редакторами схем, где проектировщик вынужден полностью рисовать структуру устройства с максимальной степенью детализации [3].

Существует два наиболее распространенных универсальных языка описания аппаратуры: VHDL, который по своим синтаксическим конструкциям напоминает Паскаль, и Verilog, имеющий некоторое сходство с языком Си. Это сходство весьма условно, поскольку и VHDL, и Verilog являются языками структурного описания электрических схем, а не языками программирования.

Программа тестирования Verilator

Есть множество программ, позволяющих моделировать алгоритмы на языке Verilog. Одной из таких программ является Verilator. Программа существует уже более десяти лет и активно поддерживается.

В отличие от большинства подобных программ, Verilator не является интерпретатором языка Verilog. Это конвертор из Verilog в C++. Полученный файл затем компилируется компилятором gcc и исполняется, как обычная компьютерная программа.

Особенности Verilator:

• позволяет транслировать код на языке verilog в C++-модель;

• имеет открытий исходный код;

 откомпилированный код сравним по скорости моделирования с коммерческими пакетами (рис. 2);

• позволяет генерировать временные диаграммы сигналов и измерять покрытие RTL-кода.



Рис. 2. Моделирование 32-битного SPARC процессора LEON 3

В результате Verilator поддерживает не все возможности Verilog. Поддерживаются синтезируемые конструкции, а также некоторые системные функции, например \$display(). Впрочем, поддержка Verilog (а также System Verilog и System C) достаточно хорошая [4].

Недостатки:

• неполная поддержка стандарта Verilog, не синтезируемые конструкции не поддерживаются;

• Verilator игнорирует секции описания временных задержек;

• не моделирует ячейки с тремя состояниями. Преимущества:

- высокая скорость моделирования;
- возможность написания теста на языке С++.

Тестируемая модель

Отработка маршрута проектирования с использованием Verilator производилась на основе проекта, который представляет собой арифметико-логическое устройство с интерфейсом передачи данных Serial Peripheral Interface (SPI) (рис. 3). Арифметико-логическое устройство разработано в качестве оконечного устройства для отработки реализации SPI и выполняет 4 функции: логическое и, логическое или, исключающее или, отправка 0. Данные на устройство принимаются последовательно. Первым на вход поступает код команды, вторым и третьим операнды, а во время отправки 0 на выход устройства поступает результат.



Рис. 3. Графическое представление тестируемой модели: mclk_i, mosi, miso используются для передачи данных по SPI; clk_i – тактовый сигнал; rst_i – сброс

Интерфейс передачи данных SPI

SPI представляет собой четырехпроводную синхронную шину, предназначенную для последовательного обмена данными между микросхемами. Интерфейс в настоящий момент используется всеми производителями. Данный интерфейс отличают простота использования и реализации, высокая скорость обмена и малая дальность действия.

При любом обмене данными по SPI одно из устройств является ведущим (Master´ом), а другое ведомым (Slave´ом). Ведущий переводит периферийное устройство в активное состояние и формирует тактовый сигнал и данные. В ответ ведомое устройство передает ведущему свои данные. Передача данных в обе стороны происходит синхронно с тактовым сигналом (рис. 4) [4].

Физически SPI реализуется на основе сдвигового регистра, который выполняет и функцию передатчика, и функцию приемника.



Рис. 4. Принцип обмена данными по SPI

Сигналы, используемые данным интерфейсом, имеют следующее назначение:

 MOSI – Master Output/Slave Input (выход ведущего / вход ведомого) служит для передачи данных от ведущего устройства к ведомому;

 MISO – Master Input/Slave Output (вход ведущего/выход ведомого)служит для передачи данных от ведомого устройства к ведущему; SLK – Serial Clock (сигнал синхронизации)
 служит для передачи тактового сигнала всем ведомым устройствам;

 SS – Slave Select (выбор ведомого) служит для выбора ведомого устройства (если ведомых несколько).

Тестовое окружение

Представленное логическое устройство включает в себя блок spi-slave(ведомый). Для тестирования требуется возможность правильной передачи данных по стандарту spi. Для этого был разработан и подключен к логическому устройству блок spi-master (рис. 5).

Интерфейс LU имеет:

- тактовый сигнал (clk_i);
- сброс (rst_i);
- разрешение передачи (tr_i);
- разрешение записи (we_i);
- шину входных данных (di_i);
- флаг завершения передачи (re_o);
- шину выходных данный (do_o);

• специализированные выводы для общения с ведомым устройством (mklk_i, mosi, miso).



Рис. 5. Схема соединения master SPI с логическим устройством

Тестовая программа

Алгоритм теста, написанного на языке C++, должен соответствовать алгоритму теста, написанного на HDL.

В нашем случае функциональное тестирование реализовывалось прямым перебором всех возможных операндов при всех возможных командах устройства, с последующим сравнением результатов с аналогичными операциями, реализованными средствами языка С++. Способ отображения результатов также программируется в тестовой программе, в нашем случае производится вывод на экран результатов сравнения выходов схемы с эталонными значениями и формирование файла результатов моделирования в виде срезов временной диаграммы.

Тестирование

Входными данными для работы программы являются функциональное описание, написанное на языке Verilog и тестовая программа, написанная на языке C++. Следующей командой запускается Verilator, который выполняет транслирование описания на язык C++ и подключение теста к модели:

Verilator -cc <функциональное описание>-v <verilog библиотека> -exe <программа тестирования> -trace

Следующей командой выполняется компилирование полученного проекта с помощью программы gcc: make -j-Cobj_dir -f V <название функционального описания>.mk V <название функционального описания>

Запуск полученного исполняемого файла запускает тест, результат которого отображается способом, описанном в тесте. Маршрут выполнения тестирования с использованием Verilator представлен на рис. 6. Файлы результата моделирования можно просмотреть в программе gtkwave, входящей в стандартный набор пакетов UNIX-систем.



Рис. 6. Маршрут верификации с использованием Verilator

Сравнительный анализ

Для проведения сравнительного анализа необходимо определить время моделирования теста на языке C++ и языке Verilog. Время выполнения тестирования на языке C++ составило 19 сек, на языке Verilog составило 85 сек. Таким образом скорость моделирования тестовой программы на языке C++ в 4,5 раза выше чем у аналогичной программы на языке Verilog.

Преимущества и недостатки использования Verilator

В процессе изучения и работы с использованием Verilator были выявлены следующие плюсы:

 – более высокая скорость моделирования, что значительно экономит время тестирования, т. к. оно выполняется итерационно;

- написание теста на C++ позволяет расширить возможности тестирования, в отличиеот более v3конаправленного Verilog. Например, C++ допускает передачу параметром в функцию по ссылке и дальнейшее объединение всех подпрограмм в библиотеку. Для написания теста на HDL требуется специализированное программное обеспечение, лицензии для которого стоит приличных денег, требуется подготовленный программист, изучивший HDL язык программирования. Verilator входит в стандартный набор пакетов в операционных системах UNIX. Программисту для написания теста достаточно обладать базовыми навыками программирования на С++, а также изучить некоторые нюансы, связанные с программированием с использованием Verilator и моделированием в целом.

Существующие минусы Verilator не отразились на работе.

Отсутствие поддержки не синтезируемого Verilog не повлияло, т. к., разрабатывая HDL описания, мы не используем не синтезируемые конструкции. Игноририрование секции описания временных задержек не критично, т. к. мы используем Veritator на этапе отладки функционала,

Заключение

В ходе выполнения работы достигнуты поставленные цели, а именно:

 – разработано функциональное описание арифметически логического устройства:

 – реализована модель интерфейса передачи данных SPI;

 – разработана тестирующая программа на языке HDL и C++;

– отработан процесс моделирования на Verilator.

По результатам проделанной работы принято решение включить данное программное средство в маршрут проектирования СБИС на основе БМК. Ожидается, что это приведет к повышению эффективности работы в следующих проектах.

Литература

1. Режим доступа: http://www.compitech.ru/ [Электронный ресурс].

2. Режим доступа: http://window.edu.ru/ [Электронный ресурс].

3. Режим доступа: http://citforum.ru/ [Электронный ресурс].

4. Режим доступа: http://www.veripool.org/ [Электронный ресурс].

Режим доступа: http://chipenable.ru/ [Электронный ресурс].

ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМА ГЕНЕРАЦИИ ПОБОЧНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, СОЗДАВАЕМОГО ТЕХНИЧЕСКИМИ СРЕДСТВАМИ

А. А. Евстифеев, В. И. Ерошев, А. А. Казаков, Д. Б. Николаев

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

При обработке техническими средствами закрытой информации возможна её утечка по каналу побочного электромагнитного излучения (ПЭМИ). ПЭМИ представляет собой паразитное электромагнитное излучение радиодиапазона, генерируемое устройствами, специальным образом для этого непредназначенными. Для предотвращения несанкционированного перехвата информации по каналу ПЭМИ возможно применение следующих основных мер: снижение уровня побочного излучения за счёт экранирования и оптимизации конструкции технического средства, маскировка информативного сигнала помехой, создание вокруг средства охраняемой зоны. Оптимальные меры защиты и обоснование их эффективности определяются по результатам специальных исследований устройства, которые проводятся с целью измерения уровня и эффективной ширины спектра информативного сигнала ПЭМИ. Для разработки методических подходов к проведению подобных исследований в данной работе рассмотрены особенности механизма генерации ПЭМИ, определяющие его временные и спектральные характеристики.

Временные и спектральные характеристики ПЭМИ определяются параметрами возбуждающего тока. Экспериментальные исследования показывают, что при передаче информации потенциальным двоичным кодом ток возбуждения имеет сложную форму: помимо импульсов, соответствующих передаче информационных нулей и единиц он содержит хаотическую последовательность импульсов, амплитуда которых различна при низком и высоком уровне напряжения, возбуждающего линию передачи.

Ток возбуждения представляет собой суперпозицию двух компонент (рис. 1) и определяется выражением

$$i(t) = i_1(t) + i_2(t),$$
 (1)

где $i_1(t)$ – квазидетерминированная компонента импульсов с амплитудой *A*, соответствующая передаваемой двоичной информации с тактовым периодом *T*; $i_2(t)$ – хаотическая последовательность коротких импульсов с длительностью $\theta \Box T$.

Случайная последовательность $i_2(t)$ нестационарна, при передаче информационного нуля средняя амплитуда равна a_0 , при передаче информационной единицы a_1 . Соответственно электрическое поле ПЭМИ также состоит из двух компонент и определяется выражением

$$E(t) = E_1(t) + E_2(t),$$
 (2)

где $E_1(t)$ – компонента электрического поля, создаваемая квазидетерминированной компонентой тока $i_1(t)$; $E_2(t)$ – компонента электрического поля, создаваемая случайной компонентой тока $i_2(t)$.

Корреляционная функция импульсов ПЭМИ с учетом статистической независимости слагаемых $E_1(t)$ и $E_2(t)$ также состоит из двух составляющих и определяется выражением

$$R(\tau) = R_1(\tau) + R_2(\tau),$$
 (3)

где $R_1(\tau) = \int E_1(t) \cdot E_1(t+\tau)$ – корреляционная функция, соответствующая детерминированной компоненте $E_1(t)$; $R_2(\tau) = \int E_2(t) \cdot E_2(t+\tau)$ – корреляционная функция, соответствующая случайной компоненте $E_2(t)$.



Рис. 1. Осциллограммы токов возбуждения: 1 – суперпозиция компонент возбуждающего тока; 2 – квазидетерминированная компонента возбуждающего тока; 3 – случайная компонента возбуждающего тока

Компонента $E_2(t)$ в общем случае нестационарна, однако с учетом малой длительности случайных импульсов $\theta \square T$ (рис. 1) импульсный процесс на интервал длительностью T можно считать стационарным, а на интервале времени, соответствующем передаче информационного нуля, корреляционную функцию представить в виде выражения [1]

$$R_0(\tau, t) = n \cdot a_0^2 \int_0^T \xi(t) \cdot \xi(t+\tau) dt , \qquad (4)$$

где n – среднее число импульсов в 1 сек; $\xi(t)$ – нормированная условием $\xi_{\text{max}} = 1$ форма единичного случайного импульса; a_0 – среднее значение амплитуд импульсов на этом интервале.

На интервале времени, соответствующем передаче информационной единице представить в виде выражения

$$R_{1}(\tau,t) = n \cdot a_{1}^{2} \int_{0}^{T} \xi(t) \cdot \xi(t+\tau) dt, \qquad (5)$$

где *a*₁ – среднее значение амплитуд импульсов на этом интервале.

Энергетический спектр ПЭМИ, создаваемого стохастической компонентой тока, можно представить в виде выражения

$$S(\omega, t) = F[R_1(\tau, t) + R_2(\tau, t)] = S_1(\omega, t) + S_2(\omega, t), \quad (6)$$

где $S_1(\omega,t) = F[R_1(\tau,t)];$ $S_2(\omega,t) = F[R_2(\tau,t)];$ *F* – оператор Фурье преобразования.

Спектральная плотность мощности, детерминированной составляющей ПЭМИ при равновероятном появлении информационных символов «0» и «1» определяется выражением [2]

$$S_{1}(\omega) = \frac{1}{T} |g_{1}(\omega)|^{2} \cdot [\sigma^{2} + \frac{m^{2}}{T} \sum_{-\infty}^{\infty} \delta(f - \frac{k}{T})], \quad (7)$$

где T – тактовый период; $m = \frac{A}{2}$ – среднее значение амплитуд импульсов; $\sigma^2 = \frac{A^2}{4}$ – дисперсия амплитудного распределения; A – амплитуда единичного импульса ПЭМИ; $g_1(\omega) = F[s_1(t)]$ – Фурье-преобразование единичного импульса; $s_1(t)$ – форма нормированного импульса (пиковое значение импульса полагается равным единице); F – оператор Фурьепреобразования.

Сомножитель $|g_1(\omega)|^2$ определяет огибающую квазидетерминированной части энергетического спектра.

Учитывая, что прием детерминированной части ПЭМИ происходит в ближней зоне ($r < c \cdot \tau_1 \approx 3$ км), форма импульсов электрического поля ПЭМИ совпадает с формой импульсов тока возбуждения (рис. 2), при этом $g_1(\omega)$ определяется выражением

$$g_1(\omega) = A\left(\theta_1 + \tau_1\right) \sin c \left(\frac{\omega \tau_1}{2}\right) \sin c \left[\frac{\omega(\theta_1 + \tau_1)}{2}\right], \quad (8)$$

где θ_1 – длительность импульсов детерминированной компоненты (рис. 2); τ_1 – длительность фронтов импульсов детерминированной компоненты (рис. 2), $\sin c(x) = \frac{\sin(x)}{x}$.

Прием стохастической компоненты происходит в волновой зоне $(r > c \cdot \tau_2 \approx 1 \text{ м})$, форма импульсов ПЭМИ совпадает с производной тока возбуждения (рис. 2).



Рис. 2. Характерная форма импульсов ПЭМИ, создаваемого детерминированной и стохастической компонентами тока

Спектральная плотность мощности стохастической компоненты выражается соотношением [1]

$$S_2(\omega) = n \cdot \sigma^2 \cdot |g_2(\omega)|^2, \qquad (9)$$

где n – число импульсов в 1 сек; $g_2(\omega) = F[s_2(t)]$ – Фурье-спектр, $s_2(t)$ – нормированная форма импульса стохастической компоненты, σ^2 – дисперсия стохастической компоненты.

Прием стохастической компоненты происходит в волновой зоне $(r > c \cdot \tau_2 \approx 1 \text{ м})$, следовательно, форма импульсов ПЭМИ пропорциональна производной тока возбуждения (рис. 2), в этом случае $g_2(\omega)$ определяется выражением

$$g_2(\omega) = 2\tau_2 \cdot \sin c \left(\frac{\omega \tau_2}{2}\right) \cdot \sin c \left[\frac{\omega (\theta_2 + \tau_2)}{2}\right], \quad (10)$$

где θ_2 – длительность единичного импульса стохастической компоненты, τ_2 – длительность фронтов импульса.

Амплитуда напряжения на выходе приемника ПЭМИ, соответствующего детерминированной компоненте, определяется выражением

$$V_1 = \sqrt{S_1(\omega_0) \cdot \Pi} , \qquad (11)$$

где ω_0 – частота приёма; Π – ширина полосы радиоприемного устройства (РПУ). Амплитуда напряжения на выходе приемника ПЭМИ, соответствующего случайной компоненте, определяется выражением

$$V_2 = \sqrt{S_2(\omega_0) \cdot \Pi},\tag{12}$$

Учитывая только непрерывную часть спектра (7), находим отношение

$$\frac{V_2}{V_1} = 2\sqrt{T \cdot n} \cdot \frac{\sigma}{A} \cdot \frac{|g_2(\omega_0)|}{|g_1(\omega_0)|},\tag{13}$$

На рис. 3 показаны спектр $g_2(\omega)$ и огибающая спектра $\tilde{g}_1(\omega)$, причем величина $\tilde{g}_1(\omega)$ нормирована относительно частоты f = 0,1 МГц. Параметры импульсов выбраны следующими:

 $-\theta_1 = T = 100$ мкс, $\tau_1 = 10$ мкс – для детерминированной составляющей;

 $-\theta_2 = 10$ нс, $\tau_2 = 3$ нс – для стохастической составляющей.

Поскольку согласно экспериментальным данным дисперсия стохастической компоненты различна при передаче информационных «0» и «1» (рис. 1), то относительное приращение выходного напряжения РПУ ΔV , соответствующее интервалам времени, когда передается «0» или «1», определяется выражением

$$\frac{\Delta V}{V_1} = K \frac{g_2(\omega)}{g_1(\omega)},\tag{14}$$

где $K = 2\sqrt{Tn} \frac{\sqrt{\left|\delta_1^2 - \delta_0^2\right|}}{A_1}; \quad \delta_0^2$ – дисперсия стохастиче-

ской компоненты при передаче информационного

нуля; δ₁² – дисперсия стохастической компоненты при передаче информационной единицы.

На основе проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

 выходное напряжение интерфейсов ТС помимо информационного сигнала содержит случайную квазишумовую компоненту. Эта компонента является следствием переходных процессов в цифровых интегральных микросхемах, формирующих сигнал;

– в диапазоне частот f > 0,1 МГц спектр ПЭМИ детерминированной компоненты быстро спадает со скоростью порядка 40 дБ/декада;

 – максимум спектра случайной компоненты расположен на частотах порядка десятков мегагерц;

 на частотах f>10 МГц интенсивность ПЭМИ определяется стохастической компонентой тока в информационной линии.

Разработано программное обеспечение (ПО), позволяющее моделировать сигналы различных интерфейсов передачи данных, а также рассчитывать спектральные характеристики ПЭМИ, возникающих при их функционировании. На рис. 4,а представлена осциллограмма напряжения на выходе интерфейса RS-232 (одно информативное слово из 12 битов данных), смоделированного с помощью разработанного ПО. На рис. 4,б представлены спектры детерминированной и квазишумовой составляющей данного напряжения.

ПО позволяет проводить предварительные теоретические исследования спектральных и временных характеристик ПЭМИ, создаваемых интерфейсами передачи данных, перед проведением практических специальных исследований.



Рис. 3. Сравнение огибающей спектра детерминированной составляющей и спектра квазишумовой компоненты ПЭМИ: 1 – модуль спектра единичного импульса детерминированной составляющей; 2 – огибающая спектра единичного импульса регулярной составляющей; 3 – модуль спектра единичного импульса стохастической составляющей



Рис. 4. Результаты моделирования: а – осциллограмма напряжения на выходе интерфейса RS-232; б – спектры ПЭМИ: 1 – ПЭМИ, создаваемые детерминированной составляющей; 2 – ПЭМИ, создаваемые квазишумовой составляющей

Литература

1. Рытов С. М. Введение в статистическую радиофизику. Ч. 1. Случайные процессы. – М.: Наука, 1976. 2. Горяинов В. Т., Журавлев А. Г., Тихонов В. И. Статистическая радиотехника: Примеры и задачи. – М.: Сов. радио, 1980.

АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛНЫМ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ИЗДЕЛИЙ. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

<u>К. Ю. Землянухин</u>, А. Ю. Безусяк

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

Введение

Согласно ГОСТ 34.003-90, автоматизированной системой (AC) называется система, состоящая из персонала и комплекса средств автоматизации его деятельности, реализующая информационную технологию выполнения установленных функций. Согласно ГОСТ 34.601-90 этапами создания автоматизированной системы являются: «Формирование требований к AC» и «Разработка концепции AC»¹. Сами технологии формирования требований и разработки концепции в системе ГОСТов не определены, хотя их необходимость для проектирования интегрированных AC (ИАС), разрабатываемых в кооперации на протяжении нескольких лет, является крайне высокой.

Проект «Создание системы управления полным жизненным циклом изделий «Цифровое предприятие» (СУ ПЖЦ ЦП) является основным ИТпроектом ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» коммерческой направленности. Проект реализуется с учетом изменяющихся требований государственного заказчика к продукции военного назначения (ПВН), а так же программ пересмотра гражданских и военных стандартов в части управления жизненным циклом изделий различных типов и видов. Для успешной реализации проектов подобного масштаба требуется проведение всестороннего бизнес-анализа и прохождение этапов формирования требований и создания концепции ИАС.

В докладе рассматривается реализация процессов системной инженерии (согласно ISO/IEC/IEEE 15288:2015 в редакции British Standards Institution) «Анализ бизнеса и миссии» и «Определение потребностей стейкхолдеров» применительно к СУ ПЖЦ ЦП с целью анализа внешней среды и создания концепции СУ ПЖЦ ЦП. По результатам реализации данных процессов представляется концепция СУ ПЖЦ ЦП, которая легла в основу архитектуры требований к системе и непосредственным ТЗ на создание системы в целом и ее составных частей (СЧ).

Теоретическая часть

Содержание ГОСТ 34.601-90 в части прохождения этапов формирования требований и определения концепции представлено в табл. 1.

Таблица 1

Этапы и содержание работ по ГОСТ 34.601-90 «Автоматизированные системы. Стадии создания» (до стадии разработки технического задания)

Стадия	Этап работ	Содержание работ
 Формирование требований к АС 	1.1. Обследование объекта и обоснование необ- ходимости создания AC	 сбор данных об объекте автоматизации оценка качества функционирования объекта и осу- ществляемых видов деятельности оценка целесообразности создания АС
	1.2. Формирование требований пользователя к AC	 подготовка исходных данных для формирования требований к АС формулировка и оформление требований пользова- теля к АС
	1.3. Оформление отчета о выполненной работе и заявке на разработку АС (тактико- технического задания)	 оформление отчета о выполненных работах оформление заявки на разработку АС
2. Разработка концепции АС	2.1. Изучение объекта	 детальное изучение объектов автоматизации необходимые научно-исследовательские работы, связанные с поиском путей и оценки возможности реализации требований пользователя
	2.2. Проведение необходимых научно- исследовательских работ	
	2.3. Разработка вариантов концепции АС и выбор варианта концепции АС, удовлетво- ряющего требованиям пользователя	 разработка альтернативных концепций АС и планов их реализации оценка необходимых ресурсов оценка преимуществ и недостатков
	2.4. Оформление отчета о выполненной работе	 оформление и утверждение отчетов о НИР

¹ Порядок и логика реализации данных этапов в контексте системной инженерии в докладе не рассматриваются.

Было определено, что СУ ПЖЦ ЦП имеет несколько категорий пользователей (инженеры научноисследовательских организаций, руководители проектов НИОКР, сотрудники и руководители серийных предприятий, обеспечивающий и управленческий персонал). Кроме того, бенефициарами² создания системы являются не только сами предприятия, осуществляющие деятельность в рамках реализации создания ПВН, но и государственный заказчик (за счет унификации процессов и ряда других выгод, которые выходят за рамки данного доклада). Дополнительно, СУ ПЖЦ ЦП состоит из нескольких вложенных проектов (комплекс систем сквозного 3Dмоделирования, проектирования и производства; комплекс систем управления производством; комплекс систем управления предприятием; общесистемное и инфраструктурное ПО; нормативно-методическое обеспечение автоматизируемых процессов). Данные проекты пересекаются и взаимно влияют друг на друга как в ходе их реализации, так и в ожидаемой эксплуатации.

Таким образом, было принято решение об изменении подхода к прохождению начальных этапов создания СУ ПЖЦ ЦП. В качестве руководящей политики был выбран системно-инженерный подход. Системная инженерия – междисциплинарный подход и способы обеспечения воплощения успешной системы³. При этом под системой будем понимать «комбинацию взаимодействующих элементов, организованных для достижения одной или нескольких поставленных целей»⁴ (определение ГОСТ Р ИСО/МЭК 15288-2005). В контексте данного стандарта, под системами понимаются комбинации программного и аппаратного обеспечения, данных (информации), людей, процессов, процедур, обеспечивающих элементов⁵, материалов, внешних событий и проявлений; при этом для конечного пользователя, система является продуктом или услугой, предоставляющей ему определенную возможность.

За формальными и нечеткими определениями, однако, лежит суть системной инженерии: для реализации успешной системы, необходимо «протащить» ее по стадиям ее жизненного цикла, для чего необходимо реализовать некоторые (или все) процессы в некоторой последовательности. При этом, основные документы по системной инженерии предоставляют данный набор процессов.

Из 4 ключевых процессных областей (процессы соглашения, процессы организации, процессы технического управления и технические процессы), в докладе рассматриваются технические процессы. Технических процессов всего 14 (в британской редакции 15288-2015). В практической части будет продемонстрирована реализация первых двух процессов из упомянутых выше 14: процесс анализа бизнеса и миссии и процесс определения потребностей стейкхолдеров.

Практическая часть

Процесс анализа бизнеса и миссии

Процесс анализа бизнеса и миссии предназначен для создания операционной концепции организации, в том числе в части того, как целевая (разрабатываемая) система будет использоваться в операциях организации. Для того, чтобы определить назначение СУ ПЖЦ ЦП, необходимо проанализировать надсистему СУ ПЖЦ ЦП. Надсистемой в данном случае будет являться постепенный переход государственного заказчика (МО РФ) к контрактам жизненного цикла, использование электронных моделей изделий в процессах приемки, сдачи, передачи в войска и постановки на вооружение, а так же сама государственная система управления полным жизненным циклом вооружений, военной и специальной техники (далее СУ ПЖЦ ВВСТ). Введем определения СУ ПЖЦ ВВСТ, необходимые для понимания ее назначения.

СУ ПЖЦ ВВСТ – организационно-техническая система, включающая в себя:

участников ПЖЦ ВВСТ,

 нормативное правовое и нормативно-техническое обеспечение, определяющее деятельность в сфере управления ПЖЦ, и, устанавливающее обязательные требования к изделиям BBCT,

 информационно-коммуникационные технологии, обеспечивающие управление информацией об изделиях ВВСТ, связанных с ними процессах на протяжении ПЖЦ и поддержку принятия решений деятельности участников ПЖЦ по управлению ПЖЦ.

Управление полным ЖЦ ВВСТ – совокупность видов деятельности заказчиков, разработчиков, изготовителей, эксплуатирующих организаций и органов управления на всех стадиях ПЖЦ, направленных на:

 обоснование оптимальных характеристик ВВСТ, основными из которых являются боевая эффективность, надежность, техническая готовность в ходе эксплуатации, стоимость полного ЖЦ, сроки разработки и поставки ВВСТ,

 достижение и поддержание заданных значений характеристик BBCT.

Цитируя проект «Концепции создания СУ ПЖЦ ВВСТ» МО РФ: «Постоянное повышение требований к уровню тактико-технических характеристик наукоемких образцов ВВСТ связано с возрастанием сложности их разработки и производства, увеличением стоимости ПЖЦ ВВСТ, в особенности стадии эксплуатации, которая для некоторых видов ВВСТ может достигать десятков лет. В этих условиях возрастает актуальность специальных мер, направленных на обоснование, достижение и поддержание заданных значений характеристик ВВСТ, в том числе

² Здесь: прямыми и косвенными выгодоприобретателями.

лями. ³ Определение из «Системноинженерное мышление», TechInvestLab (А. И. Левенчук), 2015.

⁴ Системные принципы, такие как открытость, целеустремленность, эмерджентность в докладе не рассматриваются.

⁵ Ориг.: facilities.
боевой эффективности, надежности, технической готовности образцов BBCT, а также решения задач оптимизации характеристик BBCT, в частности систем их технического обслуживания, хранения, транспортирования, ремонта, утилизации, подготовки персонала и расходов на создание, изготовление, эксплуатацию, капитальный ремонт и утилизацию BBCT, сроков разработки и поставки изделий, что и составляет содержание управления ПЖЦ BBCT».

Таким образом, СУ ПЖЦ ЦП на предприятиях ОПК должна способствовать успешному решению задач создания и развития СУ ПЖЦ ВВСТ (со стороны государства). В государственных терминах, «оптимизация» как правило значит сокращение затрат, однако при этом необходимо учитывать операционное (поддерживающие окружение целевой системы и обеспечивающие системы), повышение требований к ее эксплуатационно-техническим характеристикам, сроков разработки и поставки. При этом, речь идет о системах с длительным сроком эксплуатации и высочайшими требованиями к качеству и надежности. Предприятиям ОПК, чтобы сохранить и увеличить портфель заказов, необходимо перестроить свою деятельность на соответствие заявленным принципам и требованиям СУ ПЖЦ ВВСТ. Кроме того, переход на контракты жизненного цикла по всем вилам ВВСТ. стоящих на вооружении МО РФ, будет осуществлен к концу действующей государственной программы вооружений (ГПВ). Дополнительно, необходимо учитывать программы разработки и актуализации национальных стандартов Минпромторга РФ и МО РФ, реализуемые в поддержку создания СУ ПЖЦ ВВСТ.

Возвращаясь к СУ ПЖЦ ЦП, назначение данной системы – обеспечить предприятия набором типовых процессов и ИАС (АС) их исполнения, чтобы учитывать возрастающие требования государственного заказчика.

Процесс анализа потребностей стейкхолдеров

Процесс анализа потребностей стейкхолдеровпредназачендля идентификации стейкхолдеров и их классов, их ожиданий и потребностей, реализованных в целевой системе. Потребности, определенные в процессе транслируются в технические требования к системе, требования к операционному окружению системы, которые затем используются для проектирования архитектуры системы.

Под стейкхолдерами в данном контексте понимаются «стороны, имеющие право, долю или претензии на систему или на владение ее характеристиками, удовлетворяющими потребности или ожидания данной стороны».

Стейкхолдерами являются конечные пользователи и их организации, лица, поддерживающие систему в эксплуатации, разработчики, изготовители, лица, организующие подготовку к эксплуатации системы, закупщики, поставщики, регуляторы, и т. д. При этомстейкхолдеры могут иметь интересы, противоположные друг другу и противоположные системе в целом.

Приблизительный перечень стейкхолдеров и их потребностей, представлен в табл. 2.

Таблица 2

№ п/п	Стейкхолдер или класс стейкхолдеров	Потребности стейкхолдера или класса к СУ ПЖЦ ЦП	
1	Государство	 минимальное финансирование военных разработок при под- держании обороноспособности страны 	
2	Государственный заказчик (МО РФ)	 обеспечение достижения целей и задач создания СУ ПЖЦ ВВСТ организациями ОПК (сокращение сроков, стоимости создания и повышение качества; реализация контрактов жизненного цикла) 	
3	Головной разработчик (напр. ГК «Росатом»)	 безусловное исполнение государственных заданий и ГОЗ «бесшовное» функционирование технологий управления жизненным циклом изделий в подведомственных организациях и их кооперации 	
4	Организация-участник кооперации	 исполнение контракта реализация требований других стейкхолдеров к целевой системе 	
5	Пользователи системы	 быстрый переход к использованию системы функциональная достаточность системы реализация всех процессов в системе 	
6	Заказчики системы	 низкая стоимость и быстрое внедрение возможность реализация специфических маршрутов проектирования в системе возможность адаптации типовых процессов в системе под процессы предприятия поддержка разных моделей жизненного цикла изделий 	

Перечень стейкхолдеров и их потребностей

Таким образом, задача создания системы сводится к обеспечению учета верхнеуровневых требований к системе со стороны государства и государственного заказчика и реализации специфических маршрутов проектирования и поддержки разных моделей жизненного цикла. Для определения требований стейкхолдеров, требуется сформировать концептуальный облик (заново пройти представленные процессы) технологий управления жизненным циклом: управления стоимостью, требованиями, конфигурацией, ЭТХ, проектами, устаревающими покупными компонентами изделий, информационной поддержки изделий. При этом, технология информационной поддержки изделий должна включать остальные технологии.

Дополнительно, требуется создать сводную типовую процессную модель, состоящую из основных, обеспечивающих и управленческих процессов. Данные процессы требуют создания нормативно-методического обеспечения, состоящего из порядков (регламентов) процессов, положений о субъектах и объектах управления в данных процессах, методических указаний по использованию ИС и АС в данных процессах.

Выводы

Системная инженерия как подход предоставляет инструменты для реализации сложных систем с большим количеством стейкхолдеров, составных частей и связей между ними. На самом базовом уровне, ее использование позволяет структурировать потребности и требования к системе, спланировать ее создание, а также эффективно управлять организацией как средой, создающей системы. Более глубоко, системная инженерия позволяет производить сложные системы большой кооперацией, сформировать предметную область управления организацией, процессами и проектами, понять, что значит управлять процессом и как конкретно это делать.

Литература

1. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15288-2005. Системная инженерия. Процессы жизненного цикла систем // Москва, 2006.

2. BS ISO/IEC/IEEE 15288:2015. Systems and software engineering – System life cycle processes // BSI, 2015.

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ АЭРОЗОЛЬНОЙ ПЕЧАТИ ПРИ НАНЕСЕНИИ ПРОВОДЯЩЕГО РИСУНКА НА ТРЕХМЕРНОЕ ОСНОВАНИЕ ИЗ МЕТАЛЛА

Ю. А. Анисимов, И. А. Головин, <u>Ю. В. Клевнов</u>, А. В. Овсов, А. В. Рыкин, Д. В. Сергеев, М. А. Царев

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

Введение

В настоящее время существует несколько технологий получения проводящего рисунка: субтрактивный, аддитивный, полуаддитивный и комбинированный. Данные технологии широко используются на предприятиях при изготовлении печатных плат: односторонних, двухсторонних, многослойных, гибких и гибко-жестких печатных платах. Указанные типы печатных плат и соответствующие им технологии изготовления идеально подходят для реализации поставленных задач, но при этом проводящий рисунок возможно нанести только на одномерное плоское основание печатной платы. Нанесение проводящего рисунка на трехмерное основание позволило бы уменьшить габариты прибора, количество деталей, сделать процесс моделирования более свободным.

Нанести проводящий рисунок на трехмерное основание возможно используя технологию аэрозольной печати. Аэрозольная печать – метод аддитивного производства элементов и межсоединений, в котором мельчайшие капельки материала наносятся аэродинамически сфокусированной струей на трехмерное основание селективно, без использования масок.

Технология нанесения

Наносимый материал (чернила) заправляется в генератор: пневматический или ультразвуковой. Для заправки ультразвукового генератора достаточно небольшого объема чернил, поэтому он может применяться для нанесения дорогих материалов, например, золота, но диапазон вязкости чернил и максимальный диаметр твердых частиц существенно ограничены. Пневматический генератор позволяет наносить материалы с широким диапазоном вязкости и с диаметром твердых частиц на порядок выше, но для его заправки требуется большое количество чернил.

Для образования аэрозоля в пневматический генератор под давлением подается газ (азот или воздух), рост давления приводит к поднятию чернил по каналу, а при контакте газа с чернилами образуется аэрозоль. На выходе из генератора диаметр капель чернил в аэрозоли составляет 1-5 мкм, капли большого размера под действием силы тяжести осаждаются. Затем повышается концентрация капель чернил в аэрозоле: на коротком участке пути аэрозоля прикладывается пониженное давление, капли чернил по инерции минуют этот участок, но часть газа откачивается. На выходе из сопла аэрозоль фокусируется «покровным» (sheath) газом (рис. 1). Наличие газа между струей аэрозоля и соплом позволяет минимизировать риск засорения. Струя аэрозоля остается сфокусированной на расстоянии вплоть до 5-15 мм от сопла, что позволяет наносить чернила на трехмерные основания. Технически это реализовано перемещением печатающей головки по трем осям (х, у, z) и наклоном основания по двум осям.



Рис. 1. Упрощенная схема модуля образования и нанесения аэрозоля установки печати



Рис. 2. Классификация материалов, наносимых аэрозольной печатью

После нанесения чернил производится ультрафиолетовая (УФ), инфракрасная (ИК) или термическая сушка в зависимости от материалов чернил и основания.

Аэрозольная печать используется в процессе изготовления солнечных батарей (для печати токопроводящих шин), датчиков электромагнитных экранов, антенн, гибких дисплеев, транзисторов и схем на их основе, при этом классификация материалов наносимых технологией аэрозольной печати обширная (рис. 2).

Исследования

Для исследования эффективности технологии аэрозольной печати при нанесении печатного рисунка на трехмерное основание из металла выполнено:

 – разработка исходных данных для управляющей программы: 3D-модель основания макета, топология проводящего рисунка;

- изготовление макета основания;

 проецирование топологии проводящего рисунка на внешние поверхности3D-модели (совместно с ООО «НИИИТ»¹);

– разработка управляющей программы (ООО «НИИИТ»);

 нанесение проводящего рисунка аэрозольной печатью на внешние поверхности макета (ООО «НИИИТ»);

 исследование свойств проводящего рисунка: сопротивление проводников, адгезия проводников к поверхности макета и пайка электрорадиоэлементов (ЭРИ) к контактным площадкам. Разработка 3D-модели (рис. 3) велась в Котрая 3DV14 (ключ защиты KB3-S-FS-01 (10.184.144.15); HL Net50; 1365648503). В качестве основания для нанесения проводящего рисунка решено использовать деталь цилиндрической формы. Данная деталь изготовлена из сплава Д16 ГОСТ 4784-97, при этом для обеспечения электрической изоляции основания с проводящим рисунком на внешнюю поверхность цилиндра дополнительно нанесено покрытие Ан. окс. нхр.



Рис. 3. Трехмерная модель макета

Разработка топологии проводящего рисунка производилась в AltiumDesignerv.14.1.5, при этом для размещения проводящего рисунка использованы торцевая и верхняя поверхность цилиндра (рис. 4, 5).

Совместно со специалистами ООО «НИИИТ» произведено проецирование печатного рисунка на трехмерное основание. Проецирование осуществлялось с помощью программного комплекса Рго Епgeener (возможности Kompas3DV14 не позволяют выполнить данную операцию). По полученной модели специалистами ООО «НИИИТ» разработана управляющая программа.

¹ Компания ООО «НИИИТ» входит в состав ООО «Предприятие Остек». ООО «Предприятие Остек» является крупнейшим в России и странах СНГ инжиниринговым предприятием, предоставляющим комплексные инженерно-консультационные услуги для повышения эффективности работы предприятий и конкурентоспособности их продукции.



Рис. 4. Топология проводящего рисунка торцевой поверхности модели.



Рис. 5. Топология проводящего рисунка верхней поверхности модели.

Нанесение проводящего рисунка аэрозольной печатью производилось с помощью установки AerosolJet $15 X E^2 c$ использованием серебряных чернил марки Paru (диаметр частицы 80 ± 10 нм) и последующей сушкой в термокамере в течении 1 ч.

По результатам изготовления отмечено:

 возможность нанесения проводящего рисунка на трехмерные поверхности из металла с покрытием Ан. окс. нхр. (рис.6);

 высокая скорость нанесения проводящего рисунка – 10 мин;

- короткий технологический процесс (рис. 7);

в процессе изготовления достаточно одного оператора.

При исследовании проводящего рисунка установлено:

толщина проводящего рисунка – 2 мкм;

 – пайка ЭРИ к контактным площадкам возможна (при пайке использовался сплав Розе);

 низкая адгезия проводников и контактных площадок к поверхности основания (при незначительном механическом воздействии происходит отслаивание);

- высокое сопротивление проводников - 3-5 Ом.



Рис. 6. Готовая деталь с нанесенным проводящим рисунком

² Характеристики AerosolJet 15XE: скорость нанесения 100 мм/с, точность построения по осям X,Y,Z -20 мкм, диметр капли -1-5 мкм, объём камеры $650 \times 450 \times 250$ мм, минимальная ширина проводника 10 мкм.



Рис. 7. Структурная схема этапов изготовления с помощью технологии аэрозольной печати

Вывод

Технология аэрозольной печати абсолютно отличается от традиционных технологий получения проводящего рисунка. Благодаря данной технологии удалось нанести проводящий рисунок на трехмерное основание из сплава Д16 с покрытием Ан. окс. нхр. за короткий промежуток времени (10 мин.). Но из-за плохой адгезии проводников к покрытию Ан. окс. нхр. и их высокого сопротивления дальнейшее применение рассмотренной технологии в рамках проведенной работы не целесообразно. Использование данной технологии возможно для устройств, работающих при малых токах (10–80 мА) и использующих в качестве основания для нанесения проводящего рисунка материал с высокими адгезивными свойствами Технология аэрозольной печати делает процесс моделирования более свободным. Возможность нанесения проводящего рисунка на трехмерные поверхности и исключение из процесса моделирования печатной платы с необходимыми элементами крепления позволяет упростить конструкцию. Данная технология является очень перспективной технологией, требующей дальнейшего изучения и отработки.

Литература

1. Нисан А., Бонапартов С. Аэрозольная печать на трехмерные основания // Вектор высоких технологий. 2014. Вып. 6. С. 2–6.

ПРИМЕНЕНИЕ ПАКЕТА BOOKSIM ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТОПОЛОГИЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

В. Г. Басалов, <u>Д. О. Козлов</u>

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

Создание современных высокопроизводительных коммуникационных сетей (КС) ставит перед разработчиками много сложных технических проблем: производительность, расширяемость, надежность, стоимость и потребляемая мощность.

Эти проблемы имеют сильную взаимосвязь, и поэтому решение отдельных проблем не приведет к достижению приемлемого результата.

Топология коммуникационной сети в значительной степени определяет ее производительность и эффективность и, как следствие, всего мультипроцессорного вычислительного комплекса. Существует множество различных топологий, при этом возникает вопрос, какую топологию выбрать?

Практическое сравнение топологий является трудоемким и затратным процессом, поэтому появилась необходимость в таком программном средстве, которое могло бы моделировать работу различных сетевых топологий. Таким программным средством является пакет BOOKSIM [1].

Пакет BOOKSIM разработан в Стэндфордском технологическом университете и представляет собой консольное приложение для моделирования трафика вычислительных сетей. На основе входных параметров Booksim выводит информацию о средней коммуникационной задержке доставки пакета в сети и о среднем количестве транзитных участков. К входным параметрам моделирования относятся: параметры топологии, функция трафика, задающая распределение для генерации номера источника и приемника для пакетов, функция маршрутизации и интенсивность внедрения информационного потока. Средняя коммуникационная задержка измеряется циклами (итерациями) работы программного пакета. На одном цикле происходит: создание пакетов, внедрение их в сеть, продвижение пакетов через выходные каналы коммутаторов, и если пакеты были доставлены до адресата, то происходит их извлечение из сети. Коммуникационной задержкой одного пакета считается количество циклов работы программы, которое прибывал данный пакет в сети, с момента его создания по момент его извлечения. Средняя коммуникационная задержка получается путем вычисления среднего арифметического задержек всех сгенерированных пакетов. По аналогии рассчитывается величина среднего количества транзитных участков

BOOKSIM позволяет моделировать топологии Torus, Mesh, DragonFly, Fat Tree и др. В программном пакете предусмотрено добавление новых возможностей без изменения всего кода программного пакета. Booksim может применяться для моделирования топологий, разработанных на базе архитектуры InfiniBand и архитектуры отечественной системы межпроцессорных обменов СМПО (разработанной в РФЯЦ–ВНИИЭФ).

С применением данного программного пакета проведено моделирование топологий коммуникационных сетей, реализованных на базе архитектуры InfiniBand: 3D Torus, 3D Mesh, 4D Mesh и 5D Mesh. В ходе каждого эксперимента изменялась интенсивность внедрения пакетов от 5 % до 75 %. Интенсивность внедрения пакетов, это параметр, который влияет на количество пакетов, которое будет создаваться на одном цикле моделирования. Если данная величина ровна 50 %, то это обозначает, что на одном цикле моделирования пакетов будет создано ровно половина от количества вычислительных модулей в МВК (мультипроцессорном вычислительном комплексе). Неизменными оставались параметры масштабирования топологии, функции маршрутизации и трафика. Параметры масштабирования подобраны таким образом, что бы сети с данными топологиями объединяли примерно 256 BM (вычислительных модулей). Функция маршрутизации для топологий Mash и Torus представлена алгоритмом Dimension Order Routing [2]. Функция трафика представлена равномерным распределением для каждого генерируемого пакета.

На рис. 1 показаны результаты моделирования средней коммуникационной задержки для топологий 3D Torus, 3D Mesh, 4D Mesh и 5D Mesh в зависимости от загруженности КС MBK.

Исходя из данных представленных на рис. 1 видно, что наихудшую среднюю коммуникационную задержку имеет топология 3D Mesh. А при загруженности сети выше 40 % BOOKSIM вывел сообщение о том, что средняя коммуникационная задержка для этой топологии слишком большая. 3D-тор выигрывает у 3D Mesh, но проигрывает 4D Mesh, а наилучшую коммуникационную задержку показала топология 5D Mesh.

Иногда для удобного размещения MBK в машинном зале применяется топология Torus, в которой количество BM в одном измерении гораздо больше, чем в других измерениях, к примеру, размерность тора $16 \times 2 \times 2$. На рис. 2 показаны результаты моделирования средней коммуникационной задержки для топологий 3D Torus с разной размерностью и одинаковым количеством вычислительных модулей в зависимости от загруженности КС MBK.



Рис. 1. Гистограмма зависимости средней коммуникационной задержки от степени внедрения пакетов для топологий 3D Torus, 3D Mesh, 4D Mesh и 5D Mesh



Рис. 2. Гистограмма зависимости средней коммуникационной задержки от степени внедрения пакетов для топологий 3D Torus $4 \times 4 \times 4$ и 3D Torus $16 \times 2 \times 2$

Исходя из данных приведенных на рис. 2, можно сделать вывод, что данный подход организации расположения ВМ МВК, когда в одном измерении тора больше вычислительных узлов, чем в других, не эффективен, ввиду того что при высокоинтенсивном трафике в сети получаются очень большие коммуникационные задержки.

Оптимальное расположение BM MBK для топологии Torus является, когда в каждом измерении тора находится одинаковое количество BM, тогда система работает стабильнее и выдерживает более интенсивный трафик.

Еще BOOKSIM применяется для моделирования топологий коммуникационных сетей: 4D-тор (используемой при создании высокоскоростной сети «Ангара», разработанной в ОАО «НИЦЭВТ» [3]), Мульти-Тор и KNS (используемых при создании высокоскоростной сети на базе архитектуры СМПО). Для поддержки топологий МультиТор и KNS в программный пакет BOOKSIM были реализованы и добавлены новые модули топологий и алгоритмы маршрутизации к ним.

На рис. 3 приведены результаты моделирования этих топологий размером до 1300 вычислительных модулей, с одинаковым трафиком и с загруженностью сети 50 %.

До 500 узлов лидирует топология MultiTor. После 500 и до 1000 узлов лидирует топология KNS.

Особый интерес вызывает моделирование КС МВК с количеством узлов больше 1000. На рис. 4 приведены результаты моделирования для выше перечисленных топологий с количеством вычислительных модулей от 1300 до 10000, с одинаковым трафиком и с загруженностью сети 1 %.

Хорошо заметно, из данных приведенных на рис. 4, что на этом диапазоне по средней коммуникационной задержке безоговорочно лидирует топология KNS. При этом топология MultiTor начинает проигрывать топологии 4D-тор.



Рис. 3. Графики зависимости средней коммуникационной задержки от количества ВМ для топологий 4D-тор, МультиТор и KNS



Рис. 4. Графики зависимости средней коммуникационной задержки от количества ВМ для топологий 4D-тор, МультиТор и KNS

Литература

1. Главная страница разработчиков программного обеспечения стенфордского технологического университета, программный пакет Booksim [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://nocs.stanford.edu/cgibin/trac.cgi/wiki/Resources/ BookSim. 2. William James Dally, Brian Towles, Principles and Practices of Interconnection Networks, chapter 8.4.2 Dimension-Order Routing in Cube Networks – Morgan Raufmann, 2004.

3. Жабин И., Макагон Д., Симонов А., Сыромятников Е., Фролов А., Щербак А. Кристалл для «Ангары» // Суперкомпьютеры №4 (16) 2013. С. 46–49..

БИБЛИОТЕКА ЭРИ ДЛЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ Электронных приборов

<u>А. В. Комиссаров</u>, М. В. Лаптев, Б. В. Цыганков, М. Ю. Тагинцев, Д. А. Козлов

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

Введение

На сегодняшний день наиболее ярко прослеживаются два направления развития проектирования электронных приборов. Первое из них заключается в совершенствовании компонентной базы, а именно, в уменьшении размеров электрорадиоизделий (далее ЭРИ). Это позволяет уменьшить энергопотребление микросхем, материалоемкость производства, увеличить быстродействие функционал приборов при сохранении и уменьшении габаритов. Каждый шаг в направлении совершенствования компонентной базы связан со сложностями и дополнительными расходами, связанными с приближением к физическому пределу микроэлектроники.

Вторым направлением развития проектирования электронных приборов является применение современных достижений в сфере информационных технологий (далее ИТ), в частности комплексных систем автоматизированного проектирования. Применение таких решений позволяет сократить сроки проектирования, увеличить технологичность производства, снизить себестоимость. Развитие ИТ не скованно рамками физических законов, поэтому в ближайшем будущем электронная отрасль будет развиваться за счет применения ИТ.

Современные решения в области ИТ технически позволяют перейти на использование электронной модели как подлинника на всех стадиях проектирования прибора. Подавляющее большинство составных частей прибора являются стандартными изделиями, из которых наиболее сложными в плане моделирования и номенклатуры являются ЭРИ. Таким образом, разработка библиотеки ЭРИ, как хранилища моделей ЭРИ – важная задача длявнедрения комплексной системы автоматизированного проектирования электронных приборов.

Целью данного доклада является описать процесс разработки библиотеки ЭРИ в рамках типовой информационной системы РФЯЦ-ВНИИЭФ (далее ТИС). Практическая значимость доклада: проиллюстрировать достижения в области разработки библиотеки ЭРИ, обозначить перспективы развития.

Подходы к созданию и ведению библиотеки ЭРИ

Библиотека ЭРИ разрабатывается в рамках ТИС, базирующейся на комплексе программных продуктов компании АСКОН. Программное обеспечение (ПО), используемое в ТИС для автоматизированной разработки электронных приборов, приведено в табл. 1. В комплект поставки комплекса программных продуктов компании АСКОН входят справочники, в числе которых «Корпоративный справочник «Стандартные изделия» (далее справочник СИ).

Библиотека ЭРИ является связующим звеном между PDM-системой, ECAD и MCAD, она содержит составляющие, используемые на различных этапах проектирования. Типы составляющих библиотеки ЭРИ, средства их создания, этапы разработки прибора, на которых составляющие библиотеки ЭРИ используются, приведены в табл. 2.

Таблица 1

ПО, используемое в ТИС для автоматизированной разработки электронных приборов

Наименование ПО	Функционал в рамках ТИС
ЛОЦМАН:PLM	Система управления инженерными данными и жизненным циклом изделия (PDM- система) – предназначена для хранения электронного состава прибора, а также для выпол- нения работ по конструкторской и технологической подготовке производства прибора
КОСПАС 3D	САПР механических узлов (MCAD) – используется для проектирования деталей, создания трехмерной модели прибора, выпуска документации
AltiumDesigner	САПРэлектронныхузлов (ECAD) – используется для проектирования печатных плат электронных приборов
AltiumVault	Система управления данными ECAD – является источником информации об ЭРИ для ECAD
Справочник СИ	Корпоративный справочник «Стандартные изделия» - является источником информации об ЭРИ для PLM-системы и MCAD

Типы составляющих библиотеки ЭРИ, средства их создания, этапы разработки прибора

Тип составляющих/ средства создания	Наименование составляющих	Этап использования		
Составляющие ЕСАД – создаются	Библиотека условных графических обозначений (далее УГО) ЭРИ	Разработка схемы электронной принци- пиальной (ЭЗ) прибора		
средствами ПО Altium Designer	Библиотека посадочных мест (далее ПМ) ЭРИ	Разработка печатной платы (Д90) прибора		
Составляющие MCAD – создаются средствами ПО КОСПАС 3D	3D-модели ЭРИ	Создание 3D-модели прибора		
и справочника СИ	Описание ЭРИ в справочнике СИ	cosdanne 5D modern nphoopa		

Составляющие ECAD библиотеки ЭРИ, поставляемые с ПО Altium Designer, не могут использоваться для библиотеки ЭРИ по следующим причинам:

 УГО всех поставляемых компонентов не соответствуют ГОСТ,

 в поставляемых библиотеках отсутствует отечественная компонентная база, применяемая на российских предприятиях.

Составляющие MCAD для ЭРИ компанией АСКОН не поставляются. Таким образом, библиотека ЭРИ разрабатывается «с нуля» в отсутствии источников готовых составляющих.

Требованиям РФЯЦ-ВНИИЭФ как крупного предприятия отвечают два способа организации составляющих ЕСАD библиотеки ЭРИ. Первый способ заключается в организации составляющих ЕСАD на основе БД атрибутов ЭРИ, которая содержит атрибутивную информацию об ЭРИ, ссылки на библиотеки УГО и ПМ. Преимущества и недостатки такого способа организации составляющих ЕСАD приведены в табл. 3.

Таблица 3

Преимущества и недостатки первого способа организации составляющих ECAD

Преимущества	Недостатки		
Переносимость. Быстрая миграция дан- ных.	Отсутствие механизмов ог- раничения доступа и, как следствие, возможность утеч- ки информации.		
Возможность интегра- ции с PLMи другими системами.	Невозможность оценить применяемость или запретить применение компонента.		

На данный момент способ организации составляющих ECAD на основе БД атрибутов ЭРИ под управление СУБД MS Access является утвержденным для разработки библиотеки ЭРИ.

Второй способ организации составляющих ECAD заключается в использовании системы управления данными Altium Vault – программного продукта компании Altium Ltd. Система управления данными Altium Vault обеспечивает управление составляющими ECAD, многопользовательскую работу с проектом и управление инфраструктурой. Преимущества и недостатки такого способа организации составляющих ECAD приведены в табл. 4.

Гаолица 4

Преимущества и недостатки второго способа	а
организации составляющих ECAD	

Преимущества	Недостатки		
Наличие системы ограни- чения доступа	Затраты на внедрение дополнительной PDM- системы		
Наличие контроля версий проектов и библиотек	Необходимость решать вопрос интеграции с ос- новной PDM-системой		
Возможность оценить при- меняемость или запретить применение компонента	Увеличение количества работ по актуализации и синхронизации данных		
Удобство работы с ин- формацией о поставщиках			

На данный момент способ организации составляющих ECAD с использованием Altium Vault является экспериментальным для разработки библиотеки ЭРИ. Altium Vault является логическим продолжением организации составляющих ECAD на основе БД атрибутов ЭРИ. При необходимости, данные из библиотек УГО и ПМ, а также из БД атрибутов ЭРИ можно перенести в Altium Vault.В дальнейшем будет рассмотрен процесс создания составляющих ECAD на основе БД атрибутов ЭРИ.

Создание составляющих библиотеки ЭРИ

Схема процесса создания составляющих библиотеки ЭРИ приведена на рис. 1.

Наполнение библиотеки ЭРИ ведется в соответствии с планом, который составляется на основании заявок о внесение новых компонентов в библиотеку ЭРИ. Заявки составляются с целью определения (уточнения) данных о новых компонентах и содержат:

- наименование ЭРИ в соответствии с ТУ,

обозначение стандарта на формовку и установку ЭРИ,

особые требования к формовке и установке
 ЭРИ при наличии таковых.



Рис. 1. Схема процесса создания библиотеки ЭРИ

В целях упрощения верификации составляющих библиотеки ЭРИ предложено использовать паспорта компонентов библиотеки ЭРИ. Паспорта содержат информацию о количестве записей, количестве и наименовании УГО, ПМ, информацию о параметрической 3D-модели для нового наименования ЭРИ.

Существуют следующие особенности присвоения УГО и ПМ компоненту в библиотеке ЭРИ. Вопервых, одно и то же УГО и ПМ может использоваться для множества ЭРИ. Присваивать наименования УГО и ПМ по аналогии с наименованием ЭРИ нецелесообразно, это влечет за собой дублирование данных. С учетом этой особенности был предложен алгоритм присвоения наименований УГО и ПМ ЭРИ на основе стандарта IPC7351в зависимости от типа ЭРИ, геометрии корпуса, вариантов установки и формовки в соответствии с ГОСТ и ТУ.

Во-вторых, одно ЭРИ может иметь несколько УГО и ПМ. С целью уменьшения количества записей БД атрибутов ЭРИ было принято решение размещать информацию обо всех УГО и ПМ ЭРИ в одной записи. Такое решение поддерживается ПО Altium Designer и позволяет в разы сократить количество записей БД атрибутов ЭРИ.

Задача создания общей БД атрибутов ЭРИ сводится к созданию множества БД по каждой группе ЭРИ. Группы ЭРИ выбраны в соответствии с перечнем электронной компонентной базы, разрешенной для применения при разработке, модернизации, производстве и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники (ЭКБ-2015).Разработан метод автоматизированного наполнения БД атрибутов ЭРИ для СУБД MS Access с использованием скрипта на языке программирования «Visual Basic for Applications» (VBA), создано более 470000 записей.

Для каждой группы ЭРИ в ПО Altium Design создается библиотека УГО и МП. Всего создано более 1000 УГО, более 1500 ПМ.

Разработка описания ЭРИ в справочнике СИ проводится путем составления взаимосвязанных

таблиц, содержащих атрибутивную информацию об ЭРИ, наименование и переменные параметрической 3D-модели ЭРИ. Каждому экземпляру ЭРИ в справочнике СИ присваивается уникальный идентификатор, который в дальнейшем добавляется к соответствующей записи БД атрибутов ЭРИ для установления взаимно однозначного соответствия между экземпляром ЭРИ как частью ECAD-составляющих и экземпляром ЭРИ как частью MCAD-составляющих.

На данный момент создано более 350 параметризованных 3D-моделей для более чем 4 млн.записей об ЭРИ в справочнике СИ.

Интеграция систем автоматизированного проектирования и формирование электронных документов, содержащих данные библиотеки ЭРИ

Типовое решение компании АСКОН по интеграции справочника СИ с Altium Designer не отвечает требованиям разработки и применения библиотеки ЭРИ по следующим причинам:

1) проблемы с импортом данных из Altium Designer: время импорта сравнимо с временем разработки компонента, при импорте больших объемов данных приложение завершает работу с ошибкой;

 экземплярная база ЭРИ неудобна для верификации и редактирования, а также требует больше ресурсов для хранения и обработки, чем набор связанных таблиц;

 не параметризованные, подключаемые вручную 3D-моделиделают невозможным создание библиотеки ЭРИ в приемлемые сроки.

В целях устранения вышеописанных ограничений в РФЯЦ-ВНИИЭФ был предложен способ одновременной разработки ECAD и MCAD составляющих с последующим полуавтоматическим присвоением идентификатора экземпляра. Способ позволяет создавать описание ЭРИ в справочнике СИ путем составления взаимосвязанных таблиц и наполнять справочник параметризованными 3D-моделями ЭРИ. Для формирования 3D-модели печатной платы на основании топологии печатной платы, состава ЭРИ и 3D-моделей ЭРИ применяется конвертер ECAD-MCAD. Конвертер представляет собой плагин для ПО MCAD КОМПАС 3D. Конвертер, поставляемый компанией АСКОН, не отвечает требованиям работы с работы с библиотекой ЭРИ по следующим причинам:

1)проблемы в работе конвертера с составом ЭРИ печатной платы: отсутствие в 3D-модели прибора необходимых ЭРИ или появление лишних;

 проблемы в работе конвертера со справочником СИ: ошибки при поиске ЭРИ в справочнике СИ вынуждают вводить информацию об ЭРИ вручную;

3) отсутствие ассоциативной связи формируемых электронных конструкторских документов (таких как перечень элементов и спецификация) с 3Dмодельюпечатной платы.

В целях устранения вышеописанных ограничений в РФЯЦ-ВНИИЭФ был разработан собственный конвертер ECAD-MCAD. Разработанный конвертер позволяет формировать 3D-модель печатной платы, размещать на ней параметризованные 3D-модели ЭРИ из справочника СИ, формировать конструкторские документы, ассоциативно связанные с 3Dмоделью прибора.

Заключение

В результате работы:

1) предложен алгоритм присвоения наименований УГО и ПМ;

2) разработан метод автоматизированного наполнения БД атрибутов ЭРИ; предложен способ одновременной разработки ECAD и MCAD-составляющих библиотеки ЭРИ с последующей верификацией;

4) разработан конвертер ECAD-MCAD.

Предложенные решения позволяют в рамках ТИС разрабатывать и применять библиотеку ЭРИ для сквозного проектирования электронных приборов.

Цели для дальнейшей работы:

1) разработка документов, регламентирующих наполнение библиотеки ЭРИ;

 разработка метода автоматизированного добавления идентификатора экземпляра;

 разработка модуля формирования карт рабочих режимов.

Литература

1. Сабунин А. Е. Работа с пакетом автоматизированного проектирования Altium Designer. – М.: ЗАО «НПП РОДНИК», 2009, 284 стр.

2. Сабунин А. Е. Сквозное проектирование печатных плат в САПР Altium Designer // Печатный монтаж. Выпуск № 2–3, 2009.

3. Суходольский В. Ю. Сквозное проектирование функциональных узлов РЭС на печатных платах в САПР Altium Designer 6. – Санкт-Петербург: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2008.

4. ЛОЦМАН: PLM. Подготовка комплекса к работе с ЭРИ. Практическое руководство. ЛОЦМАН Практическое руководство.exe.

5. Усатенко С. Т. Коченюк Т. К., Терехова М. В. Выполнение электрических схем по ЕСКД. Справочник. – М.: Издательство стандартов, 1989.

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ПРОТОТИПИРОВАНИЯ ПОЛУЗАКАЗНЫХ БИС

<u>Т. И. Латыпов</u>, В. Л. Ведерников, З. Н. Биктимиров, С. М. Хлестков

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

Жесткие требования, предъявляемые к массогабаритным характеристикам перспективной радиоэлектронной аппаратуры и одновременное увеличение, и усложнение ее функциональности приводит к необходимости замены традиционной компоновки центральных функциональных узлов, построенных на базе микроконтроллеров. Решением данной проблемы является глубокая системная интеграция посредством монолитных решений на базе систем на кристалле(SoC) (рис. 1). В рамках единых проектных норм SoC имеют большую функциональность и производительность чем традиционные решения на базе микроконтроллеров (рис. 2).

SoC может быть построена на базе целого ряда решений (рис.3):

- ASSPs - Application Specific Standard Product;

- FPGA/PLD - Field Programmable Gate Array/Programmable Logic Device;

- ASICs - Application Specific Integrated Circuit;

- Structured ASIC (БМК).



Рис. 1. Реализация требований к массогабаритным характеристикам при одновременном расширении функционала перспективной радиоэлектронной аппаратуры



Рис. 2. Аппроксимация зависимости между массогабаритными характеристиками и функциональностью/производительностью аппаратуры, построенной на базе традиционных решений и SoC, для разных проектных норм



Производительность

Рис. 3. System On A Chip в диапазоне возможных реализаций

Оценочная стоимость разработки законченного проекта SoC и приведенная стоимость на одну микросхему в различных партиях для ПЛИС (FPGA/PLD), традиционных ASIC (включая ASSP) и структурных ASIC(БМК) представлена на рис. 4.

Стоимость разработки ПЛИС, традиционных и структурных ASIC в долларах США (проектные нормы 130 нм)					
ПЛИС Структурные Тради АSIC (БМК) А					
Общая стоимость разработки	$\sim 165 \mathrm{K}$	$\sim 500 \mathrm{K}$	~ 5,5M		
Освоение производства	нет	100K-200K	1M-3M		
Количество используемых САПР	2-3	2-3	6-10		
Стоимость САПР	~ 30K	$\sim 120 \mathrm{K} - 250 \mathrm{K}$	> 300K		
Количество разработчиков	1-2	2 - 3	5-7		
Стоимость чипа для партий 1К/5К/500К	~ 1000/220/40	~ 650 /150/21	~ 55000/1100/15		

Рис. 4. Стоимость разработки ПЛИС, традиционных и структурных ASIC в долларах США (проектные нормы 130 нм)

Учитывая нестабильность международной коньюнктуры и реальное положение дел в отечественной радиоэлектронной промышленности, в контексте специфики требований, предъявляемых к перспективной радиоэлектронной аппаратуре, выпуск которой, как правило, ограничен сравнительно небольшими партиями (сериями), использование заказных интегральных схем большой и сверхбольшой степени интеграции является экономически нецелесообразным.

В данном случае выходом может стать создание отраслевой специализированной электронной компонентной базы на базе полузаказных больших интегральных схем (БИС) на основе базовых матричных кристаллов (БМК), то есть стандартных заготовок, производимых по стандартной технологии массового производства БИС.

Для обеспечения непрерывного цикла проектирования перспективной радиоэлектронной аппаратуры с использованием функциональных узлов на основе БМК было предложено воспользоваться опытом таких флагманов радиоэлектронной промышленности, как корпорации Xilinx и Altera, которые в целях снижения потерь при позднем выявлении ошибок проектирования создают свои семейства ASIC на базе прототипов FPGA проектов. Данная методология проектирования устойчива к позднему обнаружению ошибок и позволяет снизить стоимость проектов ASIC на 25–80 % одновременно сократив сроки проектирования.

В рамках предложенной методологии проектирования ПЛИС-БМК, на начальном этапе проектирования системы, для сокращения сроков ведения разработки, осуществляется предварительное прототипирование проектов БМК на базе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС).

Основной целью процедуры прототипирования на базе ПЛИС является проверка и отладка разрабатываемых алгоритмов функционирования БМК, так как применение ПЛИС позволяет выполнять любую необходимую коррекцию проекта специализированной БИС непосредственно в аппаратуре. Таким образом, прежде чем проектировать функциональный узел на базе БМК, необходимо разработать его проект на базе ПЛИС и проверить его работоспособность в составе системы (рис. 5).

Авторами доклада были разработаны проектные процедуры, обеспечивающие непрерывность цикла разработки в рамках методологии проектирования ПЛИС–БМК (рис. 6).



Рис. 5. Проектный цикл реализации методологии разработки радиоэлектронной аппаратуры с применением технологии замещения ПЛИС на БМК



Рис. 6. Типовая последовательность проектных процедур обеспечения непрерывности цикла разработки ПЛИС-БМК

CPLD (Complex Programmable Logic Device)

Достоинства

- Пониженное энергопотребление.
- Упрощенный режим сохранения информации.

Недостатки

- Ограниченное число допустимых циклов репрограммирования
- Небольшие объемы логических средств и памяти
- Малое количество лицензионных оптимизированных решений стандартных применений

FPGA (Field Programmable Gate Array)

Достоинства

- Неограниченное количество допустимых циклов репрограммирования
- Высокая логическая емкость большие объемы логических средств и памяти
- Большое количество лицензионных оптимизированных решений стандартных применений

Недостатки

- Повышенное энергопотребление
- Необходимость использования конфигурационной микросхемы

Рис. 7. Выбор ПЛИС для прототипирования

Первоочередной задачей при проектировании устройств на базе БМК с использованием методологии проектирования ПЛИС-БМК является выбор типа ПЛИС для прототипирования.

Выбор типа ПЛИС в рамках данной методологии сводится к выбору между двумя основными семействами ПЛИС, достоинства и недостатки которых представлены на рис. 7.

На рынке ПЛИС представлено множество микросхем от различных производителей. Ввиду наличия большого количества программно-аппаратных средств проектирования и отладки логично воспользоваться продукцией ведущих производителей и поставщиков ПЛИС, на российском рынке – это фирмы Altera и Xilinx.

Методология проектирования ПЛИС–БМК подразумевает использование ПЛИС для прототипирования будущей системы на базе БМК, поэтому на этапе разработки схемы электрической принципиальной следует провести предварительную оценку сложности проекта:

 в логических вентилях для комбинационнонасыщенных проектов; по количеству используемых триггеров для регистрово-насыщенных проектов;

- по количеству внешних выводов проекта.

Задача определения соответствия логической емкости ПЛИС и логической емкости БМК является частной задачей в каждом конкретном случае, так как ее решение зависит от тех схемотехнических решений, которые предполагается реализовать на базе БМК. Качественный уровень технических решений, в свою очередь, зависит от квалификации разработчиков, применяющих те или иные технические решения. Следовательно, определение фиксированного коэффициента соответствия логической емкости ПЛИС логической емкости БМК не представляется возможным. Необходимую и достаточную логическую емкость ПЛИС для прототипирования можно определить в соответствии с инструкцией по проектированию микросхем на основе конкретной БМК.

По результатам предварительной оценки сложности проекта необходимо:

- выбрать ПЛИС для прототипирования;

 выбрать для реализации проекта БМК, подходящий по количеству вентилей и количеству выводов корпуса (рис. 8).



Рис. 8. Выбор базового элемента технологии (ПЛИС) и БМК для реализации проекта

Для решения задачи обеспечения трассируемости проводников на печатной плате и, как следствие, минимизации затрат на изменение печатной платы прототипа необходимо по типу выбранной ПЛИС уточнить корпус ПЛИС (в соответствие с логической моделью), а затем методом совмещения (наложения) определить соответствующий корпус БМК. Пример совмещения корпусов ПЛИС и БМК приведен на рис. 9.



Рис. 9. Пример совмещения корпусов ПЛИС и БМК

Необходимо отметить, что после замены импортной ПЛИС для прототипирования на отечественный БМК, ввиду невозможности точного совмещения контактов ПЛИС и БМК, на слоях платы остаются печатные проводники, не используемые в окончательном исполнении разрабатываемого устройства, которые при определенных условиях могут послужить источниками шумов или помех. Поэтому, на этапе конструирования печатной платы следует предусмотреть возможность подключения оставшихся неиспользуемыми печатных проводников к общей шине либо разработать два варианта исполнения печатной платы (для прототипирования и конечного устройства).

В целях обеспечения возможности технической реализации методологии проектирования ПЛИС-БМК авторами доклада был разработан аппаратнопрограммный комплекс прототипирования полузаказных БИС.

Оценка возможности создания информационнологистической компоненты данного комплекса базировалась на оценке возможностей систем автоматизированного проектирования (САПР), входящих в состав типовой информационной системы (ТИС) предприятия.

Целевая функция аппаратно-программного комплекса – разработка, моделирование и отработка прототипов БИС.

Целевая функция аппаратно-программного комплекса достигается посредством использования прикладного программного обеспечения (ППО), от выбора которого зависит выбор вспомогательного программного обеспечения (ВПО), операционной системы (ОС), аппаратной части и драйверов, обеспечивающих корректную работу аппаратной части комплекса.

Выбор конкретного ППО осуществлялся исходя из выбора базового элемента технологии, то есть ПЛИС на базе которой будет разрабатываться прототип БИС на основе БМК и необходимости интеграции ППО в ТИС предприятия.



Рис. 10. Состав аппаратно-программного комплекса



Рис. 11. Аппроксимация маршрута проектирования функционального узла

Аппаратно-программный комплекс ориентирован на технологию проектирования ПЛИС-БМК, и одновременно предусматривает различные варианты участия разработчика в разработке и моделировании БИС.

Состав аппаратно-программного комплекса представлен на рис. 10.

Аппроксимация маршрута проектирования представлена на рис. 11.

Маршрут проектирования разбит на три условных зоны:

- зона ТИС;
- зона ПО;
- зона аппаратных средств отладки.

Зона ТИС является системным интегратором информационно-логистических решений аппаратно-программного комплекса и существующей технологии проектирования.

Информационно-логистические решения зоны ТИС ориентированы на методологию проектирования с применением стандартных компонентов.

Ключевым САПР зоны ТИС является Altium Designer.

В зоне ПО:

 с использованием ППО Quartus и/или Altium Designer разрабатывается общая структурная схема и архитектура СБИС, при необходимости, выполняется разбиение ее на аппаратную и программные части;

- с использованием ППО Quartus и/или Altium Designer разрабатывается и проверяется высокоуровневая поведенческая модель СБИС;

 с использованием ППО Model Sim разрабатывается тестовый модуль, векторы тестовых воздействий для отладки высокоуровневой поведенческой модели, а также описание цифровых блоков на уровне RTL (синтезабельное логическое описание);

– с использованием ВПО Microsoft Office формируется проект карты заказа БИС на основе БМК.

ППО Quartus из зоны ПО обеспечивает интеграцию аппаратных средств проектирования и отладки в маршрут проектирования.

В зоне аппаратных средств проектирования обеспечивается запись и отладка электронной модели в ПЛИС с использованием отладочных плат прототипирования. Таким образом, аппаратно-программный комплекс позволяет получать законченные логические модели функционирования ПЛИС для прототипирования. Следовательно, на момент получения макетного образца в распоряжении разработчика уже имеется логическая модель функционального узла, выполненного на базе ПЛИС.

Граничным условием представленного маршрута проектирования с использованием аппаратнопрограммного комплекса является корректное функционирование макетного образца в соответствии с заданным алгоритмом функционирования.

После отработки макетного образца, формируется проект карты заказа БИС на основе БМК из электронной модели ПЛИС. Разработанная методология проектирования позволяет обеспечить выполнение требований по совершенствованию характеристик перспективной радиоэлектронной аппаратуры путем замены традиционной компоновки «радиоэлектронной начинки» системой на кристалле.

Методология разработки аппаратуры с применением ПЛИС обеспечивает сокращение проектнотехнологического цикла, позволяет снизить затраты на проектирование и обеспечивает гибкость при проектировании и модификации системы. При этом весь проектно-технологический цикл выполняется разработчиком РЭА на одном рабочем месте с использованием стандартных САПР для проектирования изделий на базе ПЛИС.

ТЕХНОЛОГИЯ ТЕСТИРОВАНИЯ КОМПЛЕКСА ПРОГРАММ «ЛОГОС»

<u>М. Г. Лашманова</u>, Н. С. Аверина, Т. Ю. Баканова, А. С. Косарева, Е. А. Савиных, Т. Н. Серова

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

В рамках работ по созданию и внедрению на предприятиях промышленности и ВУЗах отечественного базового программного обеспечения для комплексного имитационного моделирования на супер-ЭВМ в Институте Теоретической и Математической Физики (ИТМФ) ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» ведется разработка комплекса программ ЛОГОС. ЛОГОС включает в себя несколько компонентов: счетные коды инженерного анализа и, пре- и постпроцессоры для обеспечения данных счетных кодов интерактивным интерфейсом для подготовки расчетной модели, управления счетом и анализа результатов.

Разработка комплекса ЛОГОС ведется в соответствии с общепризнанными для коммерческих приложений стандартами разработки и обеспечения качества программного обеспечения [1, 2]. Все выпускаемые версии данного программного продукта проходят комплексное тестирование. Основная задача тестирования – выявить отклонения и сбои в работе тестируемого приложения, что позволит разработчикам вовремя исправить проблему и повысить качество продукта.

По мере возрастания сложности комплекса ЛОГОС увеличиваются трудности и затраты при его тестировании и подготовке версий к выпуску. Ограниченность ресурсов тестирования привела к необходимости тщательного подбора применяемых методов тестирования и тестовых данных с целью получения наибольшего покрытия и глубины проверок. Помимо этого, для обеспечения проведения своевременного и полного тестирования комплекса ЛОГОС и всех его компонентов необходимо придерживаться определенного плана-графика работ.

В целом все описанные далее шаги технологии тестирования могут быть применены в разработке любого схожего программного обеспечения.

1. Порядок подготовки версии комплекса программ ЛОГОС к выпуску

На рис. 1 приведен порядок подготовки версии комплекса программ ЛОГОС к выпуску. Подготовка к выпуску состоит из следующих этапов:

1. За 4 недели до официальной даты передачи версии комплекса программ производится фиксация поставляемой версии ЛОГОС, т. е. в данную версию разрешается вносить только исправления выявленных ошибок.

2. После фиксации версии ответственные исполнители передают пробные версии счетных кодов (так называемых решателей) и пре- и постпроцессоров ЛОГОС-ПреПост и Scientific View исполнителю, ответственному за подготовку общего дистрибутива комплекса программ ЛОГОС, вместе со списками новых возможностей и изменений в своих компонентах. Версии компонентов должны быть собраны на всех утвержденных программных и аппаратных платформах согласно техническому заданию на разрабатываемое программное обеспечение.

 Ответственный исполнитель подготавливает дистрибутив комплекса ЛОГОС, который содержит дистрибутивы как основных компонентов, так и вспомогательного программного обеспечения необходимого для работы всего комплекса.



Рис. 1. Процесс подготовки версии комплекса ЛОГОС к выпуску

4. Ответственный за подготовку дистрибутива исполнитель выкладывает подготовленный дистрибутив комплекса программ ЛОГОС на общедоступный ресурс и рассылает письма ответственным исполнителям и руководству проекта со ссылками на ресурс и информацией о готовности дистрибутива.

5. Затем происходит передача подготовленного дистрибутива ЛОГОС на тестирование. Проводятся различные виды тестирования для всех компонентов комплекса ЛОГОС, а также проверка единой документации комплекса ЛОГОС и тестирование пробного дистрибутива на предмет корректности установки всех его компонентов.

6. Найденные в ходе тестирования проблемы, подробно описываются в системе отслеживания ошибок Atlassian JIRA [3]. Контроль за распределением описаний ошибок и проблем (так называемых запросов) между разработчиками осуществляется руководителями направлений разработки компонентов ЛОГОС.

7. Разработчики исправляют, выявленные в их программном коде, ошибки.

8. За 3 дня до даты выпуска версии формируется документ со списком имеющихся в комплексе программ ЛОГОС ошибок, так называемый «History». Данный документ входит в дистрибутив комплекса программ ЛОГОС.

9. Тестирование может считаться завершенным при достижении согласованных критериев готовности программного продукта (описаны далее).

10. По результатам тестирования формируется отчет со статистикой по выявленным и исправленным ошибкам, «особо проблемным» модулям/компонентам тестируемого ПО. Отчет предоставляется руководителю проекта, руководителям разработки всех компонентов. Решение о возможности выпуска версии ПО принимается руководством проекта.

11. После того, как версия признана стабильной, производится ее окончательная сборка на всех утвержденных программных и аппаратных платформах.

12. Обновляется общий дистрибутив и передается на тестирование.

13. Производится тестирование собранного дистрибутива на предмет корректности установки всех его компонентов и еще раз проводится автоматизированное регрессионное тестирование пользовательского интерфейса.

14. Созданный дистрибутив комплекса программ ЛОГОС, а также все собранные счетные модули для всех возможных платформ выкладываются на FTP-сервер, доступный предприятиям, в день утвержденной планом даты передачи версии или ранее.

2. Особенности тестирования комплекса программ ЛОГОС

При подготовке версии ПО к поставке на предприятия все виды тестирования, кроме инсталляционного и автоматизированного, проводятся на установленном дистрибутиве комплекса ЛОГОС. При тестировании дополнительное внимание уделяется новым возможностям и доработанным функциональностям, которые описываются разработчиками ЛОГОС в списках об изменениях в компонентах.

Также при сценарном и функциональном тестировании используется документация комплекса программ ЛОГОС, где подробно описаны функциональные возможности входящих в его состав программ и примеры выполнения типовых задач и получаемые результаты, с которыми в процессе тестирования проводится сравнение как с эталонами.

В случае подготовки версии ЛОГОС с урезанными возможностями, тестирование отключения указанных возможностей и работоспособности остальных проводится согласно указаниям от разработчиков компонентов и на предоставленных ими данных.

Для проведения всех видов тестирования используется единая база согласованных исходных и эталонных тестовых данных, а также входящие в состав дистрибутива примеры.

Выявленные случаи конфликта настроек систем или установленных драйверов оборудования в обязательном порядке должны быть либо исправлены, либо описаны в пользовательской документации.

Ошибки, обнаруженные в ходе тестирования, и предложения по совершенствованию возможностей тестируемого ПО, оформляются в системе управления ошибками для исправления разработчиками.

Для ЛОГОС была выбрана используемая в РФЯЦ-ВНИИЭФ система управления ошибками JIRA [3]. После исправления ошибки или доработки соответствующая возможность снова проверяется.

3. Виды тестирования комплекса программ ЛОГОС

Для тестирования комплекса программ ЛОГОС и отдельных его компонентов в рамках подготовки версии к выпуску применяются следующие виды тестирования:

• инсталляционное тестирование;

 тестирование графического пользовательского интерфейса или функциональное тестирование (ручное и автоматизированное);

• сценарное тестирование (ручное и автоматизированное);

- регрессионное тестирование;
- интеграционное тестирование;
- верификационное тестирование;
- модульное тестирование;
- тестирование документации.

Основные виды тестирования (инсталляционное, функциональное, сценарное и интеграционное) комплекса программ ЛОГОС проводятся на всех утвержденных программных и аппаратных платформах.

Для проведения всех видов тестирования используется единая база согласованных исходных и эталонных тестовых данных. По результатам каждого запуска модульного и функционального тестирования ведется журнал (log-файл) прохождения тестов, а также проводится анализ выявленных ошибок, в том числе для определения «проблемных» модулей.

В инсталляционном тестировании проводится проверка работы инсталляционной системы для утвержденных программных и аппаратных платформ – ОС Windows, ОС Linux (список конкретных ОС и платформ формируется согласно техническому заданию на разрабатываемое программное обеспечение). Проверяется возможность самостоятельной установки программы пользователем и достаточность указаний по установке, настройке и запуску ПО. Также проверяется наличие и правильность установки всех компонентов программного комплекса ЛОГОС, успешность их запуска на выполнение.

Тестирование графического интерфейса пользователя или функциональное тестирование проводится на основе ранее определенных требований к возможностям разрабатываемого программного продукта и сценариям использования. Цель функциональных тестов состоит в том, чтобы проверить соответствие разработанных компонентов установленным требованиям. Для данного вида тестирования часть тестов комплекса ЛОГОС была автоматизирована. Автоматизированное тестирование применяется для проверки базовых возможностей в том случае, когда можно проверить выходную информацию. В остальных случаях используется ручное тестирование.

При проведении ручного и автоматизированного функционального тестирования выполняется как «позитивное» тестирование (использование верных значений и «правильных» последовательностей действий пользователя), так и «негативное» (использование ошибочных значений и данных, нештатной последовательности действий пользователя), для проверки устойчивости программного продукта к воздействиям различного рода и проверки обработки исключительных ситуаций.

Сценарное тестирование проводится согласно разработанным сценариям использования программы. В сценариях описываются как работа каждого диалога, так и последовательности действий пользователя для выполнения какой-либо задачи в тестируемой программе. При этом описываются допустимые и недопустимые входные и выходные данные. Сценарное тестирование автоматизируется по мере возможности. Сценарным тестированием комплекса ЛОГОС можно также считать проверку работы решателей посредством выполнения тестовых задач, описанных в руководствах пользователя.

Регрессионное тестирование – повторное выполнение тестов, выявивших ошибки или проблемы во время предыдущих раундах тестирования. Помимо проверки исправления ошибок при регрессионном тестировании проверяется, не внесло ли сделанное исправление ошибок в другие части программы. Для регрессионного тестирования графического пользовательского интерфейса (далее ГПИ) комплекса ЛОГОС используются разработанные проекты автоматизированного тестирования, сценарное тестирование, проекты верификационного тестирования решателей и ручная проверка часто выявляемых ошибок.

Интеграционное тестирование – тестирование взаимодействия и правильной работы всех подключаемых модулей, библиотек, решателей. Для комплекса программ ЛОГОС проводится с использованием тестовых примеров из пользовательской документации решателей комплекса программ ЛОГОС в рамках функционального и сценарного тестирования.

Верификационное тестирование позволяет гарантировать, что программная система реализована без непредусмотренного функционала и соответствует предъявляемым требованиям. Результатом является вывод о соответствии (или несоответствии) продукции. На текущий момент верификационное тестирование для комплекса ЛОГОС проводится командами разработчиков конкретных компонентов самостоятельно. В частности, для решателей ЛОГОС такой вид тестирования проводится посредством задания значений параметров и проведения расчетов типовых задач и сравнения полученных результатов с эталонными аналитическими решениями. Начата автоматизация этого вида тестирования.

Модульное тестирование – процесс в программировании, позволяющий проверить на корректность отдельные модули исходного кода программы.

Тестирование документации – проверяется документация комплекса программ ЛОГОС на полноту, точность, ясность и правильность оформления.

4. Автоматизированное тестирование комплекса программ ЛОГОС

Автоматизированное тестирование - это процесс верификации ПО, при котором основные функции и шаги ГПИ-теста, такие как запуск, инициализация, выполнение, анализ и выдача результата, выполняются автоматически при помощи инструментов для автоматизированного тестирования.

Для автоматизации тестирования ГПИ комплекса ЛОГОС применяется система тестирования Qtприложений Froglogic Squish [4]. Для управления автоматизированным тестированием, как модульным, так и функциональным, используется специализированная система Atlassian Bamboo [5].

Преимущества такого тестирования заключаются в том, что оно проходит автоматически, без участия пользователя по настроенному заранее сценарию (или плану в терминах Bamboo) и результаты тестирования, включая лог-информацию, отображаются в системе Bamboo.

Для автоматического тестирования ГПИ комплекса ЛОГОС разработан ряд скриптов, проверяющих правильность функционирования базовых возможностей комплекса ЛОГОС по работе с геометрией и сеточными данными, а также работу генераторов сеток. Начата автоматизация выполнения тестовых задач, описанных в руководствах пользователей решателей ЛОГОС-Аэрогидромеханика и ЛОГОС-Прочность. Разработанные скрипты объединены в наборы для запуска и хранятся в специализированном репозитории под управлением системы контроля версий Mercurial Hg [6]. Согласно этим наборам для комплекса ЛОГОС создано и используется следующие планы автоматизированного тестирования:

• «часовое» тестирование – используется набор ГПИ-скриптов, выполнение которых длится не больше часа;

• полное тестирование – используется набор ГПИ-скриптов, выполнение которых занимает достаточно длительное время (порядка 12 часов);

• выполнение набора ГПИ-скриптов по тестированию генераторов сеток;

• выполнение примеров из руководств пользователя решателей.

Планы выполняются с автоматическим обновлением ГПИ-скриптов до актуального состояния из ветки репозитория, соответствующей тестируемой версии ЛОГОС, и для самой «свежей» на момент запуска плана тестирования сборки дистрибутива ЛОГОС.

В системе Bamboo страница каждого из завершивших выполнение планов автоматизированного тестирования содержит расширенную информацию о процессе выполнения на вкладке «Branch summary» (рис. 2):

 дата и время запуска автоматизированного тестирования, продолжительность выполнения;

• последние изменения, внесенные в общий репозиторий ГПИ-скриптов;

 число тестов, впервые возвративших ошибку выполнения, и тестов, которые ранее уже возвращали ошибку выполнения.

Результатом выполнения плана автоматизированного тестирования в Bamboo является список ГПИ-скриптов, в которых были выявлены ошибки. Также выводится информация о новых ошибках выполнения тестирования и уже проявлявшихся в более раннем тестировании (рис. 3).

Также выводится информация о конкретных ошибках в каждом из неуспешно выполнившихся тестов, которая позволяет выявить причины их возникновения (рис. 4). Выводится также информация об ошибках работы тестируемой программы (ключевое слово в логе: Failure), и об ошибках выполнения скриптов (ключевое слово: Error), доступен список удачно завершенных тестов.

После завершения работы каждого плана автоматизированного тестирования, ответственный исполнитель анализирует полученную информацию об ошибках и описывает каждую выявленную проблему в системе отслеживания ошибок JIRA.

Аналогичным образом средствами Bamboo автоматизирован запуск модульного тестирования для отдельных компонентов ЛОГОС-ПреПост. Тесты модульного тестирования запускаются автоматически при каждой сборке проекта ЛОГОС-ПреПост. Разработка тестов проводится программистами, преимущественно авторами тестируемого модуля.

Build projects / Build #17	ЛОГОС.ПреПост 1/2 4.4 -	/ Тестиров	ание Гі	ПИ-скрипто	в (часовое			1 1 N Run •	Actions -
версия 4.4 репозитория	ГПИ-скриптов								
① #17 failed – Schedule	d with changes by	/ <u>Серова Т.I</u>	<u>H.</u>						
Branch summary	Fests Commits	Artifacts	Logs	Metadata	Issues				
Build result sur	nmary								
Details						Responsible			
Completed 06 Duration 116	Nov 2015, 6:57:02 i minutes ne 🖋	AM – 4 hours	s ago				This build has be No one has tal	een failing since #1 ken responsibility	
	Show	more					Assign responsibility	Claim full responsibility	
2	e	6		0					
New failures	Existing	failures		Fixed					
Write a comment.									1,
Code commits									
Author	Commit				Mess	age		Commi	t date
Серова Т.Н.	b8c83398	<u>}</u>			Восст	ановлен тест tst_view	_options	Yester	lay
Серова Т.Н.	14b0c479	2			Восст	ановлен тест tst_tool_	panels	Yester	lay

Рис. 2. Общие сведения о процессе выполнения плана автоматизированного тестирования в системе Bamboo

Code commits

Author	Commit	Message	Commit date
🔲 Попова Маргарита Юрьевна	61faf53c 🕑	tst_tutorial_pump Устранено задание дублирующего поля температуры	2 days ago
🔲 Попова Маргарита Юрьевна	385d1477 C	Перевод теста на новый вариант 1	2 days ago
🔲 Попова Маргарита Юрьевна	7a78e78f 🗅	tst_tutorial_pump Изменено задаваемое значение	2 days ago

Configuration changes

Plan configuration has changed since the last successful build. See the plan audit log for more details.

Tests

New test failures 2				× 0
Test		View job	Duration	
tst_cut_on_edge_and_hide_top_blocks .E:/Bamboo/bld/UNISYS-GUI1- JOB1/suite_1_hour_tests/tst_cut_on_edge_and_hide_top_blocks/test.py:319 ()		windowsx64	< 1 sec	¢ -
ERROR: Все упало! Прибиваем процесс в памяти Error in clickButton() invocation: Widget '{text='Восстановить центр врашения' type='QToolBut	tton' unnamed='1' visible='0'	window={name='mainwing	dow' type='uppMainWindow	' visible='1
 tst_cut_on_edge_and_hide_top_blocks. E:/Bamboo/bld/UNISYS-GUI1- JOB1/suite_1_hour_tests/tst_cut_on_edge_and_hide_top_blocks/test.py:320 		windowsx64	< 1 sec	¢ -
ERROR: Script Error NameError: global name 'failLog' is not defined)				
Existing test failures 1				× •
Test	Failing since	View job	Duration	
✓ tst_check_picking_on_geometry .E:/Bamboo/bid/UNISYS-GUI1- JOB1/suite_1_hour_tests/tst_check_picking_on_geometry/test.py:353 ④	#240 (Scheduled with changes by Лашманова М.Г. and Серова Т.Н)	windowsx64	< 1 sec	¢ -
FAILURE: Информация о 1й вершине выведена неправильно				





Рис. 4. Процесс работы с запросом в системе JIRA

5. Тестирование документации

Единая документация комплекса программ ЛОГОС представляет собой платформо-независимую интерактивную документацию и содержит описания всех компонентов и в общей сложности содержит около 10 тысяч страниц печатного текста.

Создание, дополнение и исправление статей документации производится в специально созданном проекте с использованием специализированной системы Adobe RoboHelp [7]. Там же для подключения вызова статей документации в пользовательский интерфейс программного продукта генерируется специализированный map-file, содержащий ссылки на статьи документации. Данный map-файл добавляется в исходные коды комплекса ЛОГОС. Затем средствами RoboHelp выполняется генерация готовой документации в нужном формате – html, doc или pdf.

При подготовке новой версии комплекса программ ЛОГОС к выпуску проводится проверка сгенерированной документации на полноту, точность, актуальность и правильность оформления статей, а также на правильность их подключения в графический пользовательский интерфейс комплекса.

Все выявленные в ходе тестирования документации неточности и несоответствия регистрируются в системе управления ошибками JIRA. После того, как все статьи отредактированы и недостающие добавлены в проект, проводится повторная проверка документации.

6. Учет и контроль ошибок

Как уже упоминалось, для учета ошибок и замечаний используется система отслеживания и учета ошибок Atlassian JIRA [3]. В системе используются различные типы запросов – ошибка, усовершенствование (существующей функции или задачи), новая функция, задача на выполнение.

Процесс работы с запросом в системе JIRA приведен на рис. 3.

Все найденные ошибки и замечания должны быть зарегистрированы с определенным приоритетом:

• наивысший (Blocker) – Блокирующая ошибка, приводящая приложение в нерабочее состояние, в результате которого дальнейшая работа с тестируемой системой или ее ключевыми функциями становится невозможна;

• высокий (Critical) – Крах операционной системы, аварийное завершение работы программы, общее нарушение защиты, зависание объекта испытания;

• средний (Major) – Неработоспособность основных функций программы, невозможность выполнения действий, предусмотренных сценариями использования системы;

• низкий (Minor) – Некорректная работа приложения при определенных действиях пользователя;

• незначительный (Trivial) – Приложение имеет незначительные ошибки или запрос на новую функциональность в будущих версиях.

7. Критерии завершения тестирования

Предлагается принять следующие критерии готовности продукта и, соответственно, завершения тестирования в рамках подготовки версии к выпуску:

 $-\ 80\ \%$ всех видов тестов должны проходить успешно.

 в системе учета ошибок, из всех зарегистрированных группой тестирования ошибок для этой версии, должно оставаться не более следующего процента открытых (нерешенных) ошибок/проблем, см. таблицу:

Допустимое количество нерешенных проблем

Приоритет ошибки	% открытых
Блокирующий (Blocker)	0
Критический (Critical)	0
Серьезный (Major)	10
Средний (Minor) + Низкий (Trivial)	25

Группа тестирования считает невозможной передачу версии ПО сторонним пользователям/заказчикам при невыполнении указанных критериев. В случае невыполнения данных критериев решение о возможности выпуска версии комплекса программ ЛОГОС принимает руководство проекта.

Заключение

Быстрое увеличение сложности и расширение функциональных возможностей разрабатываемого комплекса ЛОГОС усложняет его тестирование. Необходимость повышения качества выпускаемого программного обеспечения увеличивает требования к покрытию и глубине тестирования. Регулярное инсталляционное и сценарное тестирование, постоянное обновление и расширение базы тестовых данных и скриптов автоматизированного тестирования, другие используемые для оценки качества комплекса ЛОГОС виды тестирования позволяют своевременно выявлять ошибки, что несомненно влияет на повышение качества продукта.

В настоящее время выполняются работы по автоматизации тестирования решателей, что позволит значительно увеличить качество выдаваемого ими результата и повысить в целом качество комплекса ЛОГОС, а также повлияет на увеличение скорости тестирования при подготовке к выпуску версии.

Литература

1. ГОСТ Р ИСО/МЭК 12207-2010 Информационная технология. Системная и программная инженерия. Процессы жизненного цикла программных средств.

2. ГОСТ Р ИСО/МЭК 12119-2000 Информационная технология. Требования к качеству и тестирование.

3. Official site of Jira program [Electronic resource]. Mode of access: www.atlassian.com/software/ jira, 2015.

4. Official site of Froglogic Squish program [Electronic resource]. Mode of access: www.froglogic.com/ squish, 2015.

5. Official site of Bamboo program [Electronic resource]. Mode of access: www.atlassian.com/software/bamboo, 2015.

6. Official site of Mercurial program [Electronic resource]. Mode of access: www.mercurial.selenic.com, 2015.

Official site of RoboHelp program [Electronic resource]. Mode of access: www.adobe.com/ru/products/ robohelp/, 2015.

СОЗДАНИЕ ЕДИНОГО ИНФОРМАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА В ЧАСТИ КОММУНИКАЦИЙ

<u>О. А. Лыкина</u>, А. В. Хохлов, С. Н. Старовойтов, А. В. Донцова

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

В настоящее время большое значение имеет формирование коммуникативной среды, которая позволяет обмениваться информацией и выполнять совместную работу. Для более эффективного выполнения работниками предприятий, корпораций и т.д. своих должностных обязанностей необходимо обеспечить их актуальной информацией, требуемой при реализации поставленных задач, а также условиями, позволяющими осуществлять коллективную деятельность и синхронизировать выполняемые функции.

Актуальность формирования единого информационного пространства объясняется целесообразностью создания единой среды, позволяющей обмениваться информацией и обеспечивающей максимальную синхронизацию всех информационных ресурсов и субъектов предприятия, что позволяет повысить эффективность процессов деятельности предприятия.

Под единым информационным пространством предприятия ЯОК понимается совокупность программных, технических и организационных составляющих, реализующая единую среду для оперативного доступа к информации и проведению совместных работ с учетом распределения ответственностей и полномочий сотрудников.

Таким образом, можно сказать, что основными компонентами единого информационного пространства являются:

 информационные ресурсы, включающие в себя документы и массивы документов, файлы и базы данных, распоряжение доступом к которым осуществляется их обладателем путем установки соответствующих правил, и служащие для выполнения работ;

 средства автоматизации, включающая в себя программное и аппаратное обеспечение (АРМ, ИВС, телекоммуникация);

 методическое обеспечение, регламентирующее взаимодействие работников с техническими средствами, а также между собой в процессе эксплуатации информационной системы.

Основная цель формирования единого информационного пространства – реализовать единую среду для взаимодействия работников предприятия ЯОК и проведения совместных работ на удобной основе с учетом их интересов и должностных полномочий.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

 разработка и осуществление комплекса мер по созданию, поддержке, эксплуатации и сопровождению системы, формирующей единое информационное пространство; – создание единой информационной базы и поддержание ее в актуальном состоянии;

 разработка механизмов доступа сотрудников к информации в удобном для них виде, с учетом их должностных полномочий и требований ИБ;

 обеспечение оперативной передачи информации между сотрудниками в ходе проведения совместных работ и каждого сотрудника предприятия актуальной информацией, необходимой для выполнения своих должностных обязанностей;

 обеспечение оптимального маршрута потоков данных;

- обеспечение выполнения требований по ИБ.

После проведения предпроектного обследования, переходя к этапу проектирования, необходимо сформировать структуру системы. Предлагаемая структура единого информационного пространства представлена на рис. 1.

В настоящий момент на предприятиях ЯОК существует ряд проблем информатизации, негативно влияющих на качество и быстроту принятия решений, стоимость владения, время выполнения задач и т. д. К таким проблемам относятся:

 использование программных продуктов, дублирующих функционал друг друга;

 увеличение времени на принятие решений ввиду противоречивости поступаемой информации;

 недостаток средств и возможностей для коммуникации сотрудников;

 несвоевременное доведение до сотрудников актуальной информации;

– децентрализация информационных ресурсов и т. д.

Внедрение единого информационного пространства на предприятия ЯОК предполагает интеграцию всех информационных ресурсов и процессов и создание среды, обеспечивающей бесперебойный доступ к информации, необходимой для проведения совместных работ сотрудников предприятия. Иными словами сложнейший комплексный процесс автоматизации, включающий этапы исследования направлений деятельности предприятия, анализ информационных потоков, проходящих через внутренние каналы коммуникации предприятия, построение бизнес-процессов, их оптимизацию, подбор необходимого программного и аппаратного обеспечения, его настройку, создание программного и методического обеспечения, а также обучение сотрудников. Как следствие, внедрение единого информационного пространства решает описанные выше проблемы и недостатки, а эффективность процессов деятельности предприятия будет увеличена.



Рис. 1. Предлагаемая структура единого информационного пространства

Эффекты от внедрения единого информационного пространства:

 унификация номенклатуры программного и аппаратного обеспечения;

 повышение качества и обеспечение доступности информации;

 уменьшение временных затрат на выполнение поставленных задач;

 создание условий для оперативного доступа к информации, необходимой для выполнения должностных обязанностей;

– создание условий для доведения до сотрудников всегда актуальной информации и т. д.

Потребность в создании единого информационного пространства особенно чувствуется в сфере управленческих процессов, что обусловлено широким кругом решаемых задач, большим объемом необходимой для повседневной работы информации. Помимо этого на предприятиях ЯОК создание единого информационного пространства также актуально в опытно-конструкторских работах ввиду существующей необходимости поддержки изделия на всех этапах жизненного цикла. Многие предприятия осознали, что для получения большей эффективности от использования автоматизированных информационных систем необходимо интегрировать их в единое информационное пространство. Например, в ОАО «Росгосстрах» создали единое информационное пространство для обеспечения информационного взаимодействия различных подразделений системы ОАО «Росгосстрах» и различных прикладных систем между собой.

Пример зарубежного опыта создания единого информационного пространства – это создание единого информационного пространства НАТО, которое является составной частью глобальной информационной среды и одновременно одной из компонент боевого (оперативного) пространства. Предполагается, что по достижению полной оперативной готовности система должна обеспечивать комплексную обработку в реальном масштабе времени получаемых сообщений и способствовать эффективному применению всех компонентов стратегической пропаганды для поддержки проводимых блоком операций.

В данном докладе представлена модель единого информационного пространства в части коммуникаций – подсистемы единого информационного пространства, реализующей информационную среду по сбору, хранению и передаче информации между сотрудниками предприятия ЯОК.

Передающаяся по внутренним каналам предприятия информация может напрямую воздействовать на принятие решений, и, как следствие, на эффективность предприятия в целом. Единое информационное пространство – система, в которой задействованы и связаны на информационном уровне все участники коммуникационного процесса.

Основу единого информационного пространства любого уровня составляют разнонаправленные информационные потоки – совокупность информации, передающейся в информационном пространстве по каналам коммуникации. Поэтому для построения модели единого информационного пространства в части коммуникации предприятия ЯОК с учетом его особенностей необходимо провести анализ информационных потоков предприятия.

Основная доля производства предприятий ЯОК ориентирована на конечного потребителя в лице Российской армии. Для выполнения заказа предприятие получает техническое здание. В том числе, любое подразделение предприятия ежедневно выпускает различные формы документов, расходящиеся как внутри подразделения, так и адресованные вовне. Анализ движения полученного ТЗ и документации, выпущенной в ходе работы, необходим для описания бизнеспроцессов и информационных потоков. Сформированная в результате анализа модель представлена на рис. 2. Она отражает маршруты движения документов, взаимодействия подразделений, «состояния» изделия на каждом этапе его жизненного цикла. Понимание формирования и изменения потоков информации предприятия необходимо для того, чтобы создать сотрудникам, партнерам и заказчикам необходимые условия на удобной основе для осуществления обмена информацией в рамках бизнеспроцессов предприятия, сохраняя целостность, актуальность и безопасность данных.

Взаимодействие сотрудников предприятия можно автоматизировать средствами коллективной переписки, планирования, совместного доступа к календарям и задачам, поддержкой системы обмена мгновенными сообщениями, хранения взаимодействий, работы с результатами взаимодействия.

Предлагаемая автоматизация представлена на рис. 3.



Рис. 3. Автоматизация взаимодействия сотрудников

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ КОНТРОЛЛЕРА РСІ EXPRESS АДАПТЕРНОГО БЛОКА СИСТЕМЫ МЕЖПРОЦЕССОРНЫХ ОБМЕНОВ СМПО-10GA-AD

М. П. Авдеев, С. В. Дыдыкин, <u>Ю. А. Малых</u>, В. С. Попов

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

На протяжении нескольких лет, в отделе 0828 разрабатывается отечественная система межпроцессорного обмена (СМПО), предназначенная для построения вычислительных кластеров петафлопсного класса [1]. Прототип СМПО-10G разработан на базе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС). На основе отработанной в ПЛИС RTL модели разработан кристалл сверхбольшой интегральной схемы (СБИС).

Одним из ключевых элементов СМПО является адаптерный блок СМПО-10GA-AD, представляющий собой многослойную печатную плату, выполненную в конструктиве платы расширения для вычислительного узла. Интерфейсом взаимодействия между адаптерным блоком и вычислительным узлом является PCI Express2.0x8. Для связи со смежными вычислительными узлами адаптерный блок СМПО-10GA-AD имеет четыре высокопроизводительных последовательных канала.

На рис. 1 представлена упрощенная структурная схема адаптерного блока СМПО. Адаптерный блок имеет в своем составе:

 – 4 высокоскоростных канала производительностью 40 Гбит/с каждый;

 – блок коммуникационного управления, в котором реализованы сетевой и транспортный уровень;

 контроллер PCI Express – обеспечивающий взаимосвязь блока коммуникационного управления и ядра PCI Express.



Рис. 1. Структурная схема адаптерного блока

Эффективность работы контроллера PCI Express во многом определяет характеристики производительности системы. На рис. 2 представлены значения пиковой и теоретической производительности различных интерфейсов адаптерного блока.

Под пиковой производительностью будем понимать производительность интерфейса без учета применяемой кодировки (символьная производительность).

Под теоретической производительностью будем понимать максимальную производительность, которую может достичь интерфейс с учетом используемой кодировки.



Рис. 2. Прописная способность различных интерфейсов

Для применяемого высокопроизводительного канала пиковая производительность составляет 40 Гбит/с, а теоретическая 39 Гбит/с, соответственно 4 таких канала позволяют агрегировать пропускную способность 157 Гбит/с.

РСІ Express 2.0 ×8 имеет пиковую производительность 40 Гбит/с, а теоретическую 32 Гбит/с. Стандарт РСІ Express 2.0 несет большие накладные расходы, равные 20 % [2], применение нового стандарта РСІ Express 3.0 позволит повысить эффективность передачи данных.

Сравним теоретическую производительность 4-х высокоскоростных каналов, равную 160 Гбит/с, с теоретической производительностью PCI Express 2.0x8, равную 32 Гбит/с. PCI Express имеет в 5-ть раз меньшую пропускную способность, из чего можно сделать вывод, что дальнейшее увеличение скорости канала не приведет к существенному росту производительности СМПО.Для увеличения производительности СМПО необходимо либо применение стандарта PCI Express 3.0 или оптимизация существующего контроллера PCI Express 2.0. Недостатки реализации контроллера PCI Express:

 фиксированные значения размера кадра для запросов записи и чтения. Max_Payload_Size = 256, Max_Read_Request;

– поддержка прерываний типа INTA;

 поддержка 32/64 разрядных транзакций с регистрами BAR.

Предлагаемые пути оптимизации контроллера PCI Express:

– снижение накладных расходов при работе с DMA или регистрами BAR;

поддержка многовекторных прерываний.

Проведем оценку накладных расходов контроллера PCI Express. Накладные расходы представляют собой отношение количества полезных переданных данных к общему количеству переданных данных в одном кадре сообщения.

На рис. 3 представлен формат кадра PCI Express [2]. Кадр состоит из следующих полей:

- поле Start, размер 1 байт;

поле Sequence, размер 2 байта;

 поле Header, размер 12 или 16 байт в зависимости от типа кадра;

- поле Payload, размер 0-4096 байт;
- поле ECRC, размер 4 байта;
- поле LCRC, размер 4 байта;
- поле End, размер 1 байт.

При передаче «коротких сообщений» накладные расходы составляют 15–40 %. Таким образом, уменьшение накладных расходов возможно за счет увеличения полезной нагрузки кадра PCI Express.

При работе с DMA, или регистрами BAR формируются запросы на чтение/запись. Стандарт PCI Express ограничивает количество запрашиваемых/передаваемых данных параметрами Max_Read_ Request, Max_ Payload_Size соответственно. В свою очередь, значения указанных параметров зависят от конечного устройства и вычислительного сервера, с которым работает устройство. Максимальное значение параметров может достигать 4096 байт. Значения, с которыми может работать устройство и сервер, считываются из конфигурационного пространства на этапе инициализации драйвера устройства.

Использование фиксированных значений Max_Read_Request, Max_Payload_Size не является оптимальным с точки зрения достижения максимальной пропускной способности. ПриMax_Read_ Request = 512, накладные расходы составляют 4 %, а Max_Payload_Size = 256 составляют 7 %.

Снижение накладных расходов позволит эффективней использовать пропускную способность PCI Express, так как появится возможность формировать запросы на большее количество данных.

Стандарт PCI Express [2] ограничивает количество прерываний типа INTA. Согласно стандарту такое прерывание может быть только одно, что влечет за



Рис. 3. Формат кадраблока работы с DMA

Размер служебных полей кадра составляет 20– 28 байт, а возможный размер передаваемых полезных данных составляет 0–4096 байт. На рис. 4 приведен график накладных расходов в зависимости от размера передаваемых полезных данных.



Рис. 4. График зависимости накладных расходов от количества передаваемых данных

собой дополнительные расходы на установление источника прерываний путем считывания регистра статуса, в котором хранится информация об источнике прерывания.

Использование двух и более векторов прерываний позволит ускорить обработку прерываний, так как не будет необходимости считывать регистр статуса, и обработчики прерываний смогут работать одновременно. Использование двух и более векторов прерываний возможно при использовании прерываний типа MSI/MSIX.

Одним из основных достоинств MSI/MSIX прерываний является тот факт, что в много процессорных и многоядерных системах обработчики прерываний MSI/MSIX могут выполняться на разных ядрах одновременно и независимо.

Прерывания MSIX поддерживают до 2048 векторов. Предлагается использовать два вектора прерываний типа MSIX, один для передаваемого потока данных, другой для принимаемого потока данных. За счет разделения обработчиков прерываний можно ускорить их обработку и, как следствие, улучшить производительность контроллера PCI Express при работе в дуплексном режиме.

Используемое ядро PCI Express не предусматривает готового контроллера MSI-Х прерываний, поэтому данный блок реализован самостоятельно. Разработанный блок является универсальным и способен работать с ядрами PCI Express других производителей. Структурная схема модуля представлена на рис. 5.



Рис. 5. Структурная схема модуля генерации MSI-X прерываний

Блок генерации MSI-Х прерываний состоит из блока начальной инициализации, блока масок и блока генерации прерываний. Блок начальной инициализации работает при инициализации драйвера. Блок масок позволяет производить маскирование прерываний, блок генерации формирует запрос типа сообщение, при получении которого сервер формирует соответствующее прерывание.

Аппаратные затраты на оптимизацию, см. таблицу, составили единицы % от общего количества блоков ПЛИС, из чего можно сделать вывод, что проведенная оптимизация является не «дорогой» и может быть реализована в дальнейших проектах.

Аппаратны	е затраты	на оп	тимизацию
	• Sarparbi		

	Исходный вариант, шт./%	Оптимизиро- ванный вариант, шт.	Д, шт./%
Slice LUT	38305/24	39345/26	1040/2
Slice Register	40544/13	45047/14	4053/1
Block RAM	170/14	194/16	24/2

В процессе оптимизации контроллера PCI Express создан блок генерации MSIX прерываний, позволяющий драйверу отслеживать и обрабатывать одновременно до восьми независимых прерываний, что позволило увеличить пропускную способность в дуплексном режиме.

Добавлена возможность считывать и применять параметры Max_Read_Request_Size, Max_Payload_ Size из конфигурационного пространства, обеспечивающая гибкость настройки контроллера PCI Express.

Добавлена поддержка работы с 128 разрядными транзакциями на операциях с регистрами BAR, результатом чего стало увеличение производительности системы, за счет снижения числа затратных транзакций на операциях с BAR.

По итогам проведенной работы, с использованием оптимизированного контроллера PCI Express получены следующие результаты.

Ha tecte Ping Pong:

1. задержка передачи в одном направлении:

до оптимизации – 5,92 мкс;

– после оптимизации – 5,77 мкс.

2. максимальная пропускная способность в одном направлении:

до оптимизации – **1707** Мбайт/с;

после оптимизации – 1807 Мбайт/с.

На тесте Send Recv:

1. задержка передачи в двух направлениях:

до оптимизации – 6,2 мкс;

– после оптимизации – 5,93 мкс.

2. максимальная пропускная способность в двух направлениях:

до оптимизации – 2242 Мбайт/с;

после оптимизации – 2894 Мбайт/с.

При аппаратных затратах не более 2% оптимизация контроллера PCIExpress позволила увеличить производительность системы:

 – 6 % при передаче сообщений в одном направлении;

- 22 % при работе в дуплексном режиме.

Литература

1. Холостов А. А. Масштабируемая система межпроцессорных обменов 10 G // [Электронный ресурс] – Национальный суперкомпьютерный форум, 2013. Режим доступа: www.nscf.ru.

2. PCI Express Base Specification Rev. 2.0, 2006. [Электронный ресурс] режим доступа – http://pcisig.com.

ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ ИНТЕРАКТИВНЫХ МОДЕЛЕЙ ПУЛЬТОВОЙ АППАРАТУРЫ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В УЧЕБНО-ТРЕНИРОВОЧНЫХ ЦЕЛЯХ

А. Н. Мартынова, А. В. Клюшев, А. Н. Юдачев

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

В современном мире с каждым годом компьютеры и компьютерные технологии захватывают все больше пространства, и области их применения расширяются. Данная работа посвящена технологии создания интерактивной модели пультовой аппаратуры. Интерактивная модель пультовой аппаратуры предназначена для применения на персональной электронно-вычислительной машине и необходима для обучения оператора перед допуском к работе с реальным устройством или приобретения навыков работы с реальной пультовой аппаратурой.

Интерактивная модель разрабатывалась в Adobe Flash Professional CS5, которая является мощной средой разработки для создания и редактирования двухмерной и трехмерной анимации, звука, векторных и растровых изображений, текста и видео с широким набором функций. Для программирования использовался современный язык Adobe Action Script 3.0, полностью интегрированный во Flash CS5, позволяющий разрабатывать сложные интерактивные проекты. Сочетание инструментов для создания графики и анимации AdobeFlashProfessionalCS5и методов применения Adobe Action Script 3.0 позволяет создавать интерактивные образовательные приложения.

За основу работы взята пультовая аппаратура (ПУЛЬТ), разработанная во ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». Рассмотрим интерактивную модель одного из ПУЛЬТОВ.

При запуске исполняемого файла ПУЛЬТ выглядит как на рис. 1. При наведении стрелки мышки на крышку ПУЛЬТА и нажатии левой кнопки крышка открывается и приобретает вид как на рис. 2.



Рис. 2. Внешний вид ПУЛЬТА с открытой крышкой

Пульт имеет несколько режимов работы в соответствии с техническим заданием. Для примера показана реализация интерактивной модели режима самоконтроля. Данный режим выбран для демонстрации, так как не носит информации с ограниченным доступом.

После включения прибора с помощью переключателя «ПИТ» в положение «ВКЛ» загорается дисплей и на нем появляется меню выбора режима работы (рис. 3).



Рис. 1. Внешний вид ПУЛЬТА с закрытой крышкой



Рис. 3. Внешний вид ПУЛЬТА при выборе режима работы

Для выбора режима самоконтроля необходимо нажать и отпустить кнопку «4» на цифровой панели. На дисплее ПУЛЬТА должна появиться информация в соответствии с рис. 4.



Рис. 4. Внешний вид ПУЛЬТА при выборе режима самоконтроля

Для проверки работы клавиатуры ПУЛЬТА необходимо нажать и отпустить кнопку «1» на цифровой панели. Изображение дисплея поменяется в соответствии с рис. 5. При нажатии кнопок пульта в поле «КЛАВИША» будет выведено наименование нажатой кнопки. Для выхода из режима проверки клавиатуры необходимо нажать и отпустить кнопку «ОТМЕНА». На дисплее ПУЛЬТА появится меню выбора режима самоконтроля (рис. 4).



Рис. 5. Проверка клавиатуры в режиме самоконтроля

Для проверки дисплея необходимо выбрать пункт «ДИСПЛЕЙ» меню (рис. 4), нажав и отпустив кнопку «2» цифровой панели ПУЛЬТА. После чего произойдет засветка всех знакомест и всех пикселей в знакоместах (рис. 6), а затем появится информация в соответствии с рис. 4.

Для проверки интерфейса необходимо выбрать пункт «ИНТЕРФЕЙСЫ» меню (рис.4), нажав и отпустив кнопку «3». На дисплее появятся последовательно надписи в соответствии с рис.7 на время около 4 с, далее пульт уходит в основное меню самоконтроля (рис. 4).



Рис. 6. Проверка дисплея в режиме самоконтроля



Рис. 7. Проверка интерфейса в режиме самоконтроля

Для проверки кодовой информации необходимо выбрать пункт меню КИ. Для этого нажать и отпустить кнопку «4». На дисплее на время не более 5 с появится информация в соответствии с рис. 8.



Рис. 8. Проверка КИ в режиме самоконтроля

Далее ПУЛЬТ переходит в меню режима самоконтроля (рис. 4).

Для выхода из режима самоконтроля перевести тумблер «ПИТ» в положении «ОТКЛ». Другие режимы работы ПУЛЬТА визуализированы аналогичным образом.

Из выше представленного видно, что описанная программно представленная пультовая аппаратура необходима для обучения оператора перед допуском к работе с реальным устройством или приобретения навыков работы с реальной пультовой аппаратурой.

На данный момент созданы программные имитаторы двух ПУЛЬТОВ. В дальнейшем планируется создать тренировочно-обучающие пособия для другой пультовой аппаратуры.

Литература

1. Джонсон Стив FlashCS5 руководство разработчика. – Питер, 2012.

2. Специалисты компании Adobe System. Action Script 3.0 для ADOBE FLASH PROFESSIONAL CS5. – Эксмо, 2011.

РЕАЛИЗАЦИЯ СВЕРТОЧНЫХ КОДОВ НА БАЗЕ ПЛИС

А. А. Никитин

ПАО «Ракетно-космическая корпорация "Энергия" им. С. П. Королева», г. Королев Московской обл.

Введение

Большинство бортовых систем управления космическими аппаратами строятся по многоканальной схеме. Для разработки таких систем лучше всего подходят программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС). Они позволяют реализовать несколько идентичных по параметрам каналов на базе одной микросхемы. Схемы управления на безе ПЛИС позволяют добиться наиболее высокой точности синхронизации по сравнению с системами на микроконтроллерах и микропроцессорах.

На функциональность электрических схем систем управления космического аппарата влияет множество внешних факторов. Но самым непредсказуемым фактором, влияющим на все электронные схемы, является радиация.

Целью исследования является разработка алгоритмов и методов защиты ПЛИС от радиационных факторов космического пространства. В данной работе описана реализация одного из корректирующих кодов, а именно сверточного кода, на базе ПЛИС.

1. Отказы в ПЛИС

По типу последствий для радиоэлектронных компонентов радиационные факторы делятся на эффекты, вызванные накопленной дозой, и эффекты одиночных сбоев. Защита от накопленной дозы, влекущей за собой деградацию характеристик полупроводниковых элементов, лежит на плечах разработчика кристалла ПЛИС и соответственно находится вне нашего поля интересов. Поэтому в статье рассматриваются только эффекты одиночных сбоев.

Начнем с анализа физики процессов, протекающих в ПЛИС под действием радиации. Единичные сбои являются следствием попадания тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) и протонов в кристалл ПЛИС. Упомянутые типы частиц могут привести к кратковременным, потенциально катастрофическим или катастрофическим отказам электронных компонентов и систем, провоцируя ряд одиночных эффектов [1]:

– тиристорный эффект (радиационное защелкивание) – Single Event Latchup (SEL);

– переходная ионизационная реакция – Single Event Transients (SET);

– однократный восстанавливаемый сбой – Single Event Upsets (SEU);

– одиночный эффект пробоя подзатворного диэлектрика – Single Event Gate Rupture (SEGR); – одиночный эффект выгорания – Single Event Burnout (SEB);

– к кратковременным отказам относятся SEU и SET, к потенциально катастрофическим – SEL, а к катастрофическим - SEHE, SEB, SEGR и SES.

В работе учитываются кратковременные и потенциально катастрофические отказы, так как их суть сводится к возникновению одного или нескольких бит информации, сформированных на основе ошибочного переключения триггера.

2. Принцип работы и параметры сверточного кодера

Сверточное кодирование является одним из наиболее распространенных видов помехоустойчивого кодирования. Оно применяется в различных системах передачи информации. Но его также можно применять для защиты внутренних микропротоколов ПЛИС от единичных сбоев, вызванных попаданием ТЗЧ.

На рис. 1 представлена упрощенная структурная схема системы с применением сверточного кодирования. В ней источником информации является функциональный модуль, генерирующий входную последовательность $m = m_1, m_2, ..., m_i, ...,$ где m_i – двоичный бит. Задачей кодера является преобразование каждой последовательности т в последовательность кодовых слов U = G(m). Так как кодер обладает памятью, то каждое кодовое слово входной последовательности является зависимым от соседних бит. Под действием радиационных факторов космического пространства в последовательности входных слов могут происходить ошибки, в результате которых на входе декодера появляется последовательность Z. Задачей декодера в этом случае является определение исходной последовательности, исходя из априорных знаний о структуре кодера и ошибочной последовательности Z.

Для описания сверточного кодера достаточно задаться тремя целыми числами k, n и K. Число k показывает количество входных символов, поступающих за один такт на вход сверточного кодера. Число n характеризует общее количество разрядов в соответствующем кодовом слове на выходе кодера, а отношение k/n называется скоростью кода. Она показывает меру избыточности кода. Еще одним важным параметром является длина кодового ограничения K, которая показывает число информационных входных символов, влияющих на выходные символы кодера в каждый момент времени [2].



Рис. 1. Структурная схема системы с применением сверточного кодирования



Рис. 2. Сверточный кодер со степенью кодирования 1/2 и К = 3

Пример сверточного кодера со степенью кодирования 1/2 и K = 3 приведен на рис. 2. Все символы по очереди поступают на вход регистра сдвига. После поступления нового символа происходит *п*операций над словом, хранящемся в сдвиговом регистре. Далее вводится два нулевых входных бита для очистки регистра сдвига.

Для того, чтобы описать сверточный код, необходимо определить кодирующую функцию, то есть функцию, по которой можно по данной входной последовательности символов определить выходную последовательность. Самой наглядной и практичной является решетчатая диаграмма, представленная на рис. 3.

Решетчатая диаграмма показывает все возможные переходы кодера из предыдущего состояния в последующее. Решетка состоит из 2К-1 узлов, где К – длина кодового ограничения. Каждый узел характеризует состояние кодера, то есть состояние регистра сдвига.При этом одна ветвь соответствует входному нулевому биту, а другая – входной единице. Цифры над переходом обозначают кодовые слова на выходе кодера. Сплошная линия обозначает входной «О», а пунктирная – входную «1».



Рис. 3. Пример решетчатой диаграммы сверточного кода

3. Алгоритм сверточного декодирования Витерби

Главным достоинством алгоритма Витерби является то, что в нем не рассматриваются пути, которые согласно принципу максимального правдоподобия не могут быть оптимальными. Алгоритм включает в себя операции вычисления расстояния между принятым сигналом в момент времени t_1 , и всеми путями решетки, которые входят в каждое состояние в момент времени t_i . Если в одно состояние входят два пути, то выбирается выживающий путь с наименьшей
метрикой. В результате работы декодер постепенно проходит решетку и исключает наименее вероятные пути.

Рассмотрим работу алгоритма Витерби на конкретном примере. В качестве меры расстояния используем метрику Хэмминга. Воспользуемся кодером, изображенным на рис. 2. Предположим, что мы имеем входную информационную последовательность m = 1101. После кодирования ее сверточным кодером получаем последовательность U = 11010100, которая передается по каналу связи. В результате ошибки, вызванной попаданием ТЗЧ в кристалл ПЛИС, принятая последовательность будет иметь вид Z = 11011100, т. е. имеет место искажение одного символа, а именно пятого бита.

На рис. 4 представлена решетчатая диаграмма, в которой над каждой ветвью обозначено расстояние Хемминга между принятым кодовым символом и кодовым словом, соответствующим данной ветви. Рассмотрим решетку в момент времени t_1 . Переход между состояниями $00 \rightarrow 00$ приводит к появлению на выходе кодового слова 00, но получено 11, следовательно, Хэммингово расстояние равно 2. Переход между состояниями $00 \rightarrow 10$ приводит к появлению на выходе кодового слова 11, что полностью совпадает с полученной последовательностью, и, следовательно, Хэммингово расстояние равно 0. Таким образом помечается вся решетка в последующие моменты времени.



Рис. 4. Решетчатая диаграмма, соответствующая принятой последовательности Z = 11011100

В момент времени t_2 из каждого предыдущего состояния выходят еще 2 ветви. Стоит обратить внимание, что до момента t_2 из всего набора ветвей можно выделить ветвь, для которой Хеммингово расстояние равно 0, что говорит о том, что осуществлен переход к правильному значению. Как видно из рис. 5, к моменту времени t_3 мы имеем два перехода с одинаковым значением, что говорит об ошибке в принятом значении. Выбор правильного пути будет осуществлен по результатам следующей итерации определения метрики путей, обозначенных, соответственно, через Γ_{00} , Γ_{10} , Γ_{01} и Γ_{11} .



Рис. 5. Решетчатая диаграмма выбора пути при ошибке

4. Реализация декодера Витерби на ПЛИС

Из [3] можно выделить три основные Модели реализации декодера Витерби:

1) последовательна реализация;

2) параллельная реализация;

3) гибридная реализации.

Для реализации на ПЛИС наиболее выигрышной является параллельная реализация, так как она позволяет снизить тактовую частоту за счет параллельности процессов.

Структурная схема параллельной реализации декодера Витерби приведена на рис. 6.

В состав параллельного декодера можно выделить три основных блока:

- блок вычисления метрик путей;

- блок обновления метрик путей;

- блок обратной трассировки путей.



Рис. 6. Структурная схема параллельного декодера Витерби

На первом этапе происходи вычисление метрик ребер. Блок обновления метрик путей в соответствии с полученными метриками ребер вычисляет две или четыре метрики путей. Количество метрик путей зависит от того, получили в момент прихода предыдущего кодового слова несколько путей одинаковые метрики.

В работе реализованы две версии параллельного декодера. Первая версия [4] реализует декодер, вычисляющий все возможные метрики путей, то есть соответствует решетчатой диаграмме, представленной на рис. 4. Вторая версия реализует декодер, определяющий один путь с наименьшей метрикой, называемый выживающим [5, 6]. Вторая версия реализации действует в соответствии с решетчатой диаграммой, представленной на рис. 5.

Первая версия использовалась для отработки блока вычисления метрики ребер и блока обновления метрики путей. Поэтому она реализовывалась на нерадиационно-стойкой Actel A3PE1500.

Вторая версия реализовывались на радиационно-стойкой ПЛИС 5576ХС7Т производства ОАО «ВЗПП-С», имеющеей 1728 логических элементов. Оптимизированная версия заняла 465 логических элементов, что равно 27 процентам. Выбранный кристалл является первым в линейке ПЛИС российского производства, следующие модели радиационностойких ПЛИС будет обладать большей емкостью, что позволит использовать разработанный декодер более эффективно.

5. Стенд для тестирования сверточных кодов

Для проверки реализации и получения статистики исправления ошибок был реализован стенд, структурная схема которого представлена на рис. 8 и включает в себя:

отладочную платуна базе ПЛИС 5576ХС7Т;

– отладочную плату на базе ПЛИС Actel A3PE1500-PQ208;

персональный компьютер.

Персональный компьютер по COM-порту пересылает в отладочную плату для ПЛИС Actel ProASIC3 исходные данные, представляющие из себя 5-битовую последовательность. Как показано на рис. 7, на ПЛИС Actel3PE1500 исходные данные кодируются сверточным кодом со степенью кодирования 1/2 и K = 3.



Рис. 7. Формат исходных и закодированных данных

Симулятор ошибок моделирует единичный сбой, вызванный попаданием ТЗЧ. Исходя из возможных сценариев, были выбраны единичные ошибки и двойные ошибки: 11, 101, 1001, 10001, 100001, где 0 – достоверный бит, а 1 – скомпрометированный бит. Выбор двойных ошибок объясняется тем, что один входной бит влияет на три следующих двухбитных кодовых слова. Анализ ошибок производился исходя из расположения скомпрометированных бит по кодовым словам.

Результатом реализации стенда, представленного на рис. 8, стал массив, содержащий все реально возможные варианты ошибок, вызванных радиационными эффектами космического пространства, для всех возможных исходных данных.

Результаты реализации сверточных кодов представлены в таблице, где количество вариантов отказов равно произведению числа возможных вариантов ошибки одного типа на число возможных исходных слов (в условиях тестирования оно равно $2^5 = 32$).

Стоит пояснить, что ошибки четвертого типа исправляются с вероятностью 100 %, если скомпрометированные символы находятся не в соседних кодовых словах.



Рис. 8. Структурная схема реализованного стенда

№	Тип ошибки	Кол-во вариантов отказов	Исправленных ошибок, шт.	Исправленных ошибок, %
1	1	384	384	100
2	11	352	0	0
3	101	320	0	0
4	1001	288	144	50
5	10001	256	256	100
6	1000001	224	224	100

Результаты реализации сверточных кодов

Выводы

В работе был рассмотрен один из методов борьбы с единичными отказами в ПЛИС, вызванными попаданием ТЗЧ.

Реализованный декодер занял в единственной радиационно-стойкой ПЛИС российского производства 27 % емкости, что непозволительно много для схемы защиты локального протокола. Но перспективные разработки радиационно-стойких ПЛИС повышенной емкости позволят применять рассмотренный в работе метод.

Чтобы произошли ошибки типов 11, 101, или 1001, ТЗЧ должна попасть в определенную часть кристалла ПЛИС, имеющего площадь 12,96 мм², два раза за время, кратное одной, двум или трем периодам. Данное стечение обстоятельств является крайне маловероятным. Анализируя результаты тестов (см. таблицу), можно сделать вывод, что вероятность исправления ошибок, вызванных попаданием ТЗЧ в кристалл ПЛИС равно 100 %. Но чтобы попадание одной ТЗЧ вызывало возникновение только одной ошибки, приемопередатчик и декодер должны строиться на принципе независимости выходной информации логических элементов одного такта от другого. Данная задача является отдельной и будет рассмотрена в следующих работах.

Литература

1. Таперо К. И. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения : [монография] / В. Н. Улимов, А. М. Членов, К. И. Таперо. 2-е изд. (эл.)– М.: Лаборатория знаний, 2014. С. 297.

2. Синицин Д. В. Повышение помехоустойчивости радиотехнических систем передачи информации с использованием сверточных алгоритмов обработки сигналов [Текст]: дис. канд. тех. наук: 05.12.04: защищена 22.01.14: утв. 15.07.14 / Дмитрий Вячеславович Синицин. – Владимир, 2014. С. 127.

3. Воробьев А.А., Воробьев К.А., Негрозов Е.А. Сравнение разлиных вариантов реализации декодера Витерби на ПЛИС [Текст]: А.А. Воробьев // Технологи информационного общества. – 2012. № 11. С. 13–16.

4. Кларк Дж., сл. Кейн Дж. Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи [Текст] / С. И. Гельфанда; пер. с англ. Б. С. Цыбакова. – М.: Радио и связь, 1987. С. 392.

5. Блейхут Р. Теория и практика кодов, контролирующих ошибки [Текст] / Блейхут Р.; пер. с англ. И. И. Грушко, В. М. Блиновский. – М.: Мир, 1986. С. 576.

6. Морелос – Сарагоса Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применения: пер. с англ. / Р. Морелос – Сарагоса. – М.: Техносфера, 2005. С. 320.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СКВОЗНОЙ ТЕХНОЛОГИИ 3D-ПРОЕКТРОВАНИЯ (СТ 3D)

И. В. Селюндяев, Е. Д. Печенкин

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

Введение

Развитие информационных технологий привнесло много изменений в технологии проектирования, начиная с использования ЭВМ для автоматизации инженерных расчетов и вплоть до разработки технологии сквозного проектирования, позволившей упростить разработку и сократить сроки изготовления изделий.

Возникновение сквозной технологии 3D-проектирования

Создание изделия любого уровня сложности проходит несколько основных этапов:

- исследование и обоснование разработки,
- разработка,
- производство,
- эксплуатация,
- капитальный ремонт,
- ликвидация.

Для решения задач, возникающих на каждом из этих этапов, созданы специализированные инструменты, помогающие минимизировать временные затраты и уменьшить количество ошибок. Однако при переходе от одного этапа к другому возникает проблема преемственности и интеграции специализированных средств, используемых при создании изделий: конструкторскую документацию необходимо передать технологам, после получения замечаний заказчика к прототипу сделать корректировку конструкторской и технологической документации. При этом необходимо избежать тотальной переделки изделия.

Для решения проблем, связанных с производством изделий, была поставлена задача разработки технологии проектирования, которая бы обеспечивала автоматический перенос данных при переходе от одного этапа разработки к другому, позволяя создавать изделия в сжатые сроки, и поддерживала бы полный жизненный цикл изделия.

РФЯЦ-ВНИИЭФ совместно с компанией АСКОН совместно разработали такую технологию, которая получила название *технология сквозного 3D-проектирования*. Она позволяет связать воедино все этапы проектирования, начиная от постановки задания и заканчивая созданием электронных документов. Использование этой технологии дает возможность вносить изменения на любом уровне реализации, и, в результате, не только упрощает разработку изделия, но и дает средства для его дальнейшего развития и сопровождения.

Типовая информационная система РФЯЦ-ВНИИЭФ

В 2011 году было принято решение о разработке комплекса сквозного 3D-проектирования, моделирования, производства, эксплуатации с использованием программного обеспечения отечественной разработки.

Для реализации данного проекта было предложено разработать отечественную типовую информационную систему (ТИС) управления жизненным циклом, эта система получила название PLM:ТИС 2014.

Целью создания PLM:ТИС 2014 было внедрение единой стратегии развития информационных технологий, обеспечивающих достижение показателей «Облика предприятий 2020» при создании научнопроизводственной базы мирового уровня, оптимизацию структуры и повышение эффективности деятельности комплекса по разработке изделий Госкорпорации «Росатом».

Были поставлены следующие задачи:

 обеспечение предприятий и организаций типовыми информационными технологиями и техническими средствами мирового уровня, реализующими сквозную информационную поддержку жизненного цикла изделий;

 поддержание мирового уровня качества изделий и технико-экономических показателей процессов проектирования, изготовления, испытаний, отработки, серийного производства, эксплуатации и ликвидации изделий за счет использования современных технологий управления жизненным циклом изделия, экспериментальной, вычислительной и производственной базы;

 повышение эффективности выполнения задач, конверсионного направления и гражданских проектов за счет использования методов и средств типовой информационной системы, обеспечивающей интеграцию предприятий в единый научно-производственный комплекс Госкорпорации «Росатом»;

 расширение области применения методов имитационного моделирования с одновременным сокращением дорогостоящей экспериментальной отработки изделий.

Итогом разработки ТИС стал «Комплекс сквозного 3D-проектирования, моделирования, производства, эксплуатации», рис. 1.



Рис. 1. Комплекс сквозного 3D-проектирования, моделирования, производства, эксплуатации

Таблица 1

Импортозамещение и импортонезависимость, текущий задел для развития СТЗD

В 2015 году отраслями промышленности и разработчиками изделий в РФ был взят курс на импортозамешение и импортонезависимость в области информационных технологий.

На данный момент РФЯЦ-ВНИИЭФ имеет задел в виде разработанного проекта **PLM:TUC 2014**, покрывающего 50 % к требованиям функционала средне-тяжелых систем (табл. 1), относительно одного из лидеров рынка - фирмы«РТС», что является хорошим заделом для дальнейшего развития системы.

РФЯЦ-ВНИИЭФ вышел на уровень Правительства РФ с предложением о создании отечественной импортонезависимой системы управления полным жизненным циклом (СУПЖЦ), одним из основных компонентов которой является технология сквозного 3D-проектирования.

Текущий за	дел
Импортонезависимость	50%
Защита информации	Государственная тайна
Соответствие законам РФ	95%
Учет требований отраслей РФ	65%
Обеспечение сквозной технологии	70%
Функциональность (от РТС)	50%
Уровень интеграции	75%
Производительность	30 тыс. деталей в сборке
Количество пользователей	500 на 1 сервер
Масштабируемость	Предприятие
Класс систем	Средний

Перспективы развития СТ 3D

Одной из целей проекта СУПЖЦ является задача развить технологии сквозного 3D-проектирования к 2019 году и выпустить на рынок РФ импортозамещенное программное обеспечение (ПО). Цели проекта СУ ПЖЦ представлены в табл. 2.

Таблица 2

Цели проекта СУ ПЖЦ

Импортонезависимость	80%
Защита информации	Государственная тайна
Соответствие законам РФ	100%
Учет требований отраслей РФ	85%
Обеспечение сквозной технологии	85%
Функциональность (от РТС)	80%
Уровень интеграции	90%
Производительность	130 тыс. деталей в сборке
Количество пользователей	700 на 1 сервер
Масштабируемость	Холдинг, Корпорация
Класс систем	Средне-тяжелый

Конкурентная среда на рынке РФ

Во многих отраслях промышленности на данный момент востребованы импортные решения управления жизненным циклом изделия (ЖЦИ). Надо отметить, что зарубежные производители ПО ежегодно получают от российских потребителей около 285 млрд рублей лицензионных отчислений (45 % от общего объема российского ПО). 30 % этих отчислений приходится на государственный сектор.

По данным Минкомсвязи, доля импорта клиентских и мобильных операционных систем в целом по РФ составляет 95 %, серверных – 75 %.

70 % электронных компонентов в ОПК РФ – импортного производства.

На рынке информационных систем с реализованной технологией сквозного проектирования в большой степени представлены зарубежные компании, лидерами по занимаемому объему являются компании PTC, Siemens и Dassault.

Siemens PLM Software – один из ведущих поставщиков программных средств и услуг по управлению ЖЦИ (PLM). Компания инсталлировала 7,2 млн. лицензий ПО более чем в 71 000 компаний по всему миру.

Основные продукты компании:

• NX – набор программных модулей для решения CAD/CAM/CAE задач промышленных предприятий,

• Teamcenter – интегрированный набор PLM и PDM решений,

• Tecnomatix – многофункциональный набор решений для автоматизированной подготовки и автоматизации производства.

Продукты компании Siemens широко используется в машиностроении, особенно в отраслях выпускающих изделия с высокой плотностью компоновки и большим числом деталей (энергомашиностроение, газотурбинные двигатели, транспортное машиностроение и т. п.) и/или изготавливающих изделия со сложными формами (авиационная, автомобильная и т. п.).

В частности эту систему используют такие крупные компании, как «ОКБ им. Сухого», Boeing, NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL), ПАО «КАМАЗ», «ГКНПЦ им. Хруничева», и др.

Компания Siemens потратила миллиарды долларов на покупку перспективных компаний, ведущих разработки в области технологии сквозного 3Dпроектирования (покупка компании UGS Corp, компании Perfect Costing Solutions, Kineo CAM и др.).

Dassault Systèmes занимается разработкой PLM решений, которые обеспечивают эффективную работу производственных процессов, позволяют увидеть жизненный цикл изделия в 3D от этапа его создания до утилизации.

Продукты компании:

• САТІА для виртуального проектирования продукции,

• Solid Works для 3D-проектирования,

• DELMIA для виртуального производства,

• SIMULIA для виртуального тестирования,

• ENOVIA для взаимодействия и совместного управления бизнес-процессами и жизненным циклом изделий,

• 3DVIA для создания виртуального опыта потребления.

Продукты компании DassaultSystèmes используются в таких компаниях как: Tesla Motors, Jaguar Land Rover, ПАО «Компания Сухой» (Super Jet 100), Airbus Group и многие другие крупные компании.

РТС, Inc – международная компанияразработчик программного обеспечения для двухмерного и трехмерного проектирования (САD\САПР), управления жизненным циклом изделий (PLM), управления обслуживанием (SLM) и управления жизненным циклом приложений (ALM).

К основным линейкам продуктов компании относятся РТС Creo (CAD), РТС Windchill (PLM), РТС Mathcad (инженерные расчеты), РТС Integrity (ALM), РТС Servigistics (SLM) и РТС Arbortext (работа с технической документацией).

В компании работает около 6500 специалистов в 30 странах мира, которые занимаются обслуживанием более чем 28000 предприятий. Клиентская база РТС насчитывает также более 1,931 млн. активных коммерческих рабочих мест, а также более 1,456 млн. активных рабочих мест РТС Windchill.

Направления развития сквозной технологии управления ЖЦИ

В последние годы одним из приоритетных направлений развития зарубежных компаний стало использование облачных технологий.

По данным опроса RightScale, 93 % компаний, так или иначе, используют облака. Чем выше уровень развития облачной стратегии, тем лучше показатели эффективности: прирост выручки, сокращение сроков конфигурирования сервисов, уменьшение ИТ-издержек и т. п.

Компании, развивающие сквозную технологию 3D проектирования, не остаются в стороне и ведут разработки по использованию облачного пространства. В последние годы компании, предпринимающие усилия по повышению производительности и обеспечению работы систем в глобальных сетях, были сосредоточены на том, чтобы реализовать систему в частном облаке. Компания Siemens PLM Software анонсировала расширение стратегии Platformof Choice в направлении построения облачной модели, и первым шагом стала сертификация Teamcenter для работы на базе новой платформы IBM Pure Systems.

Одним из наиболее динамично развивающихся направлений являются аддитивные технологии (3Dпечать и 3D-сканирование), они позволяют на порядок ускорить НИОКР и решение задач подготовки производства, а в ряде случаев уже активно применяются и для производства готовой продукции. Технологии 3D-печати позволяют получить прототип изделия, минуя производственную цепочку ЖЦИ, что существенно экономит время.

В условиях предприятий ОПК, использование облачных технологий не является возможным из-за требований по информационной безопасности. Поэтому, одним из приоритетных направлений развития являются технологии защиты информации в совокупности с импортозамещением ПО, покрывающие все этапы ЖЦИ.

Заметной тенденцией в последние годы стало внедрение специализированных систем защиты информации. Примером могут служить биометрическая система «Рассвет», которая обеспечивает защиту личных данных, защиту данных на станках с ЧПУ и т. д.

Одним из главных направлений развития является создание единого информационного пространства для систем ОПК и исключение многочисленных негативных последствий лоскутной информатизации за счет единой отечественной сертифицированной информационной системы с интегрированными средствами защиты информации. Этот шаг меняет саму архитектуру информационных систем, приводит ко многим позитивным результатам.

Проблемы информационной безопасности

В ходе проектирования изделий по технологии сквозного 3D-проектирования между компонентами задействованных систем идет обмен данными, защита которых является одной из важнейших задач на предприятиях. Комплекс мер, принимаемых для решения этой задачи, можно разделить на две категории: аппаратная информационная безопасность и программная информационная безопасность.

Аппаратная информационная безопасность достигается за счет внедрения методов защиты информации на уровне аппаратного обеспечения, защиты каналов связи и т. д.

Программная информационная безопасность достигается за счет установки программных средств защиты, кодировки, разграничения доступа и т. д.

В настоящий момент полностью не решенной остается проблема разграничения доступа к информации разной степени конфиденциальности. Существуют два основных варианта разграничения доступа: *мандатное управление доступом* и *дискреционное (избирательное) управление доступом*.

Дискреционное разграничение доступом (англ. discretionary access control, DAC) – управление доступом субъектов к объектам на основе списков управления доступом или матрицы доступа. Также используются названия дискреционное управление доступом, контролируемое управление доступом или разграничительное управление доступом.

Мандатное разграничение доступом (англ. Mandatory access control, MAC) – разграничение доступа субъектов к объектам, основанное на назначении метки конфиденциальности для информации, содержащейся в объектах, и выдаче официальных разрешений (допуска) субъектам на обращение к информации такого уровня конфиденциальности. Также иногда переводится как принудительный контроль доступа. Это способ, сочетающий защиту и ограничение прав, применяемый по отношению к компьютерным процессам, данным и системным устройствам, и, предназначенный для предотвращения их нежелательного использования.

Согласно требованиям ФСТЭК мандатное управление доступом или метки доступа являются ключевым отличием систем защиты государственной тайны РФ старших классов 1В и 1Б от младших классов защитных систем на классическом разделении прав по матрице доступа.

Мандатное управление доступом является основой реализации разграничительной политики доступа к ресурсам при защите информации ограниченного доступа. При этом данная модель доступа практически не используется «в чистом виде», обычно на практике она дополняется элементами других моделей доступа.

Заключение

Созданный РФЯЦ-ВНИИЭФ задел в рамках реализации программы «Создание типовой информационной системы предприятий ...» позволяет существенно снизить затраты на создание импортонезависимого комплекса программ управления ЖЦИ.

Проект СУПЖЦ получил широкую поддержку среди предприятий разных отраслей РФ, см. табл. 3.

Таблица 3

Поддержка проекта предприятиями отрасли

Промыш- ленность, предприятия	«Цифровое предприятие»				
ГК «Ростех»	Проект поддержан по системам: PLM, управления процессами, предприятием, производством, аппаратно-программной платформы				
ГК «Роскосмос»	Проект поддержан по системам: PLM, управления процессами, предприятием, производством				
ПАО «ОАК»	Проект поддержан по системам: PLM, управления предприятием, производством				
ПАО «ОСК»	Проект поддержан по системам: PLM, управления производством				
«КамАЗ»	Проект поддержан по системам: PLM, управления процессами, предприятием, производством, аппаратно-программной платформы				
ГК «Росатом»	Проект поддержан по системам: PLM, управления процессами, предприятием, производством, аппаратно-программной платформы				
ОАО «РЖД»	Проект поддержан по системам: PLM, управления процессами				
НК «Роснефть»	Проект поддержан по системам: управ- ления процессами, предприятием, аппа- ратно-программной платформы				
ПАО «Газпром»	Заинтересованность не обозначена. От- каз в коммуникациях. Взаимодействие отсутствует				

Литература

1. Валетов В. А. Аддитивные технологии (состояние и перспективы). – С.-Петербург, 2015.

2. Пастухов В. А. Меры поддержки разработки отечественного инженерного программного обеспечения. – Российское технологическое агентство, 2016.

3. [Electronicresource] AO «ACKOH» www.askon.ru

4. [Electronicresource] ООО «Эремекс» www.eremex.ru.

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ И ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОСНОВНЫМИ СРЕДСТВАМИ ПРЕДПРИЯТИЯ

А. В. Симонов

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

Крупномасштабные задачи по созданию высокотехнологичной наукоемкой продукции, стоящие перед Госкорпорацией «Росатом» и ее предприятиями, требуют использования высокоэффективных инструментов автоматизации как управленческой, так и производственной деятельности. Для решения данных задач разработаны такие программы, как программа инновационного развития и технологической модернизации Госкорпорации «Росатом» на период до 2020 г. (в гражданской части) [1], программа трансформации информационных технологий Госкорпорации «Росатом» на период 2010– 2014 гг. [2], программа создания типовой информационной системы предприятий (ТИС) [3].

В рамках реализации программы ТИС в РФЯЦ-ВНИИЭФ была разработана и успешно внедрена система управления основными средствами предприятия (далее – Система).

Данная Система предназначена для автоматизации и оптимизации управления основными средствами предприятия.

Цели создания Системы:

 разработка и внедрение системы управления основными средствами предприятия, обеспечивающей автоматизацию процессов управления на базе корпоративной ИТ-платформы;

 повышение эффективности исполнения процессов путем сокращения дублирующих операций по вводу первичных данных, а также операций, выполняемых вручную;

 повышение качества принятия управленческих решений за счет оперативности предоставления полной и достоверной информации.

В данной статье приведены основные этапы работ по созданию Системы [4], показаны основные достигнутые результаты и эффекты от внедрения системы.

1. Этапы работ по созданию системы

1.1. Формирование требований к системе

На данном этапе создавались рабочие группы ключевых пользователей.

В рабочие группы ключевых пользователей включались наиболее опытные работники, обладающие соответствующей компетентностью в предметной области.

Данными рабочими группами формировались основные требования к Системе. Осуществлялось формирование перечня регламентирующей документации, включая:

- организационную структуру проекта;

- методики;
- регламенты;
- нормативные документы;
- отчетные формы;
- показатели эффективности;

- алгоритмы расчета показателей эффективности.

Проводился анализ собранной информации.

Осуществлялась подготовка исходных данных для формирования требований к Системе.

Проводился анализ бизнес-процессов.

В ходе анализа бизнес-процессов были выделены следующие основные бизнес-процессы управления основными средствами [5]:

- поступление основных средств;
- классификация основных средств;
- начисление амортизации;
- инвентаризация;
- переоценка;
- модернизация;
- консервация;
- изменение стоимости;
- перемещение;
- выбытие, списание;
- прогнозирование амортизационных отчислений;
- анализ данных и формирование отчетности.

Осуществлялись опросы ключевых и конечных пользователей.

Проходили обследования, анкетирования на рабочих местах специалистов предприятия.

1.2. Разработка технического задания

На этапе разработки технического задания [6] были определены:

• Назначение и цели Системы

Система предназначена для комплексного информационно-аналитического обеспечения управления основными средствами предприятия и обеспечивает:

 прозрачный доступ к учетной и аналитической информации, содержащейся в Системе;

 единую схему доступа к корпоративной информации, корпоративным приложениям и другим источникам данных Системы;

 поиск необходимой информации, возможность выбора данных из различных источников (прикладных систем, информационных ресурсов, корпоративных документов).

• Характеристики объектов автоматизации

Объектами автоматизации Системы являются процессы управления основными средствами предприятия. Рабочие места Системы распределены по всем подразделениям предприятия и включены в единое информационное пространство. Информация обрабатывается в едином центре обработки данных.

• Общесистемные требования

Разработка Системы проводилась с учетом следующих общесистемных требований:

- федерального и регионального законодательства;

локальных нормативных актов предприятия;

 масштабируемость – Система обеспечивает масштабируемость по количеству пользователей, объему хранимых данных, интенсивности обмена данными, скорости обработки запросов и данных, набору предоставляемых услуг, способам обеспечения доступа;

 возможность настройки – Система имеет гибкие возможности настройки без модификации кода модулей при изменении внешней среды и конкретных задач пользователя.

Разработка Системы основывалась на принципе модульности с четким разделением функций между компонентами.

Система обеспечивает единое информационное пространство для всех пользователей в отдельных подразделениях и отделах управления с учетом требований информационной безопасности.

В Системе обеспечена защита информации в соответствии с существующими требованиями нормативных документов и действующей разрешительной системой.

Система обеспечивает выполнение требований нормативных документов по защите информации от несанкционированного доступа, действующих на предприятии.

• Функциональные требования

Система управления основными средствами обеспечивает решение задач связанных с учетом и движением основных средств от момента образования до их выбытия (списания). История перемещений внутри предприятия, перевода основных средств в различные состояния и изменение стоимости отражается и сохраняется в Системе. Учет основных средств ведется в нескольких видах учета (бухгалтерский, налоговый, МСФО) с учетом требований учетной политики предприятия [7].

• Требования к информационному обеспечению

Информационное обеспечение Системы предоставляет:

 единый методологический подход к организации данных;

 – согласованные форматы представления данных, исключающие дублирование и ввод избыточной информации;

 – согласованную технологию информационного взаимодействия; достоверность и актуальность характеристик состояния Системы.

Информационные ресурсы Системы управления основными средствами базируются на основе корпоративной системы классификаторов и нормативных документов.

• Состав и содержание работ

В рамках технического задания был определен следующий состав и содержание работ:

- разработка технического проекта;
- разработка рабочей документации;
- разработка прототипа Системы;
- тестирование Системы;
- подготовка рабочего варианта Системы;
- обучение персонала;
- подготовка и ввод Системы в эксплуатацию.

• Порядок контроля и приемки Системы

Мероприятия по вводу Системы в эксплуатацию включали в себя следующие работы:

- установка программного обеспечения;
- адаптация функциональных программ к реальным потребностям пользователя;
- контроль работы Системы;

Сдача-приемка результатов работ осуществлялась посредством проведения приемо-сдаточных испытаний.

Испытания проводились на основе программы и методики испытаний, включающей в себя контрольный пример, построенный на основе реальных данных.

Контрольный пример был подготовлен на согласованной конфигурации Системы и утвержден в качестве эталона для использования при обучении пользователей и внедрении Системы.

<u>1.3. Оценка и выбор базового</u> программного обеспечения

Вопросы оценки и выбора программного обеспечения имеют определяющее значение в успешном функционировании динамично развивающихся предприятий. От того, кем и какое программное обеспечение для управления предприятием будет разрабатываться и внедряться, будет определяться дальнейшая судьба предприятия. В случае неудачного выбора вендора и программной платформы предприятие может потерять свои позиции на рынке. В случае же правильного выбора предприятие может совершить скачок в своем развитии, повысить управляемость бизнесом, стать привлекательным для инвесторов. В случае же государственных предприятий прозрачная Система с использованием передовых технологий и методик дает преимущества при получении государственных заказов.

Поэтому при выборе поставщика и программного обеспечения для реализации ТИС и Системы, в частности, был проведен тщательнейший анализ имеющихся систем на рынке.

Была проведена большая работа по выработке критериев, которым должна удовлетворять Система. На основании данных многостороннего анализа на этапе выбора базового программного обеспечения была разработана методика, в которой были учтены следующие основные критерии:

– стоимость лицензий;

- стоимость внедрения;
- сроки внедрения;
- наличие документации;
- распространенность в отрасли;
- интеграционные возможности;
- наличие и стоимость технической поддержки;
- размер компании-разработчика;
- время существования компании-разработчика;
- гибкость системы;

 соответствие требованиям отечественных стандартов;

 возможность настройки системы под требования заказчика;

- разграничение доступа;
- хранение истории данных;
- журнализация событий;
- масштабируемость;
- наличие примеров внедрения;
- производительность.

1.4. Разработка эскизного проекта

На этапе разработки эскизного проекта были разработаны предварительные проектные решения по Системе, а также была разработана часть проектной документация. Был определен состав комплексов задач, концепция информационной базы, ее укрупненная структура, функции и параметры основных программных средств.

1.5. Разработка технического проекта

На этапе разработки технического проекта проводилась разработка общих решений по Системе и ее частям, определялась структура технических средств, алгоритмы решения задач. Осуществлялась разработка решений по организации и ведению информационной базы, системы классификации и кодирования информации, по программному обеспечению.

1.6. Разработка рабочей документации

На данном этапе проводилась разработка, оформление, согласование и утверждение документации [8] в объеме, необходимом для описания полной совокупности принятых проектных решений и достаточном для дальнейшего выполнения работ по созданию Системы. Были разработаны решения по интеграции с внешними и смежными системами, решения по обеспечению информационной безопасности.

1.7. Миграция данных

Одним из важнейших этапов внедрения информационных систем является этап миграции данных.

На данном этапе проводились следующие работы:

подготовка плана трансформации базовых данных;

 анализ структур данных исторических систем и целевой системы; - определение взаимосвязей между объектами;

 определение последовательности переноса данных в соответствии с определенными ранее зависимостями;

 – разработка процедур трансформации наследуемых базовых данных (разработка необходимых конверторов);

 непосредственная миграция данных с необходимыми преобразованиями. Из наследуемых систем мигрировано более 100 тысяч объектов основных средств.

Основные проблемы, с которыми столкнулись на этапе миграции данных, были следующими:

– недостаток опыта в миграции данных. Было предложено несколько подходов к миграции данных.

Основным различием в подходах было место, где трансформируются данные (наследуемая система, промежуточный слой, целевая система). Был выбран комбинированный вариант. Частично данные преобразовывались в исторической системе, частично в промежуточном слое и также часть преобразований осуществлялась непосредственно при переносе данных в целевую систему;

– слабое понимание данных в исходных системах. Данные были рассредоточены по историческим системам в различных форматах и не соответствовали необходимому уровню качества и точности. Документация была устаревшей. Огромную роль при решении проблем такого рода играли специалисты, разрабатывавшие наследуемые системы и хорошо разбирающиеся в исходных системах;

 модификация целевой системы. Во время разработки процедур трансформации данных изменялась структура целевой системы. В результате приходилось дорабатывать уже работающие процедуры переноса данных;

недостаточное качество переносимых данных.
 Данные из исторических систем имели ошибки, целостность данных была нарушена;

– проблемы синхронизации данных после переноса данных в целевую систему. На начальном этапе работы новой системы, когда она работает параллельно с исторической системой, необходимо обеспечить передачу данных (синхронизацию) как из целевой системы в историческую, так и обратно.

1.8. Ввод в действие

На данном этапе осуществлялись следующие работы:

 подготовка персонала. Проводилось обучение персонала и проверка его способности обеспечить функционирование Системы;

 создание рабочих мест. Создавались автоматизированные рабочие места в соответствии с требованиями технического задания;

– проведение предварительных испытаний [9]. Проводились испытания системы на работоспособность и соответствие техническому заданию в соответствии с программой и методикой предварительных испытаний. Устранялись неисправности и осуществлялось внесение изменений в документацию на Систему в соответствии с протоколом предварительных испытаний;

 проведение опытной эксплуатации. Проводилась опытная эксплуатация Системы. По результатам опытной эксплуатации проводилась доработка программного обеспечения;

 проведение приемочных испытаний. Проводились испытания системы на работоспособность и соответствие техническому заданию в соответствии с программой и методикой приемочных испытаний. Осуществлялся анализ результатов испытания Системы и устранение недостатков, выявленных при испытаниях;

- ввод Системы в постоянную эксплуатацию.

1.9. Сопровождение Системы в эксплуатации

На этапе сопровождения осуществляется техническая поддержка пользователей системы, устраняются недостатки, выявленные при эксплуатации Системы.

2. Контроль и оценка хода исполнения проекта

На каждом этапе разработки и внедрения Системы осуществлялся постоянный контроль за ходом исполнения проекта.

Осуществлялся следующий контроль [10]:

- мониторинг и контроль работ проекта;
- интегрированный контроль изменений;
- контроль содержания проекта;
- контроль расписания;
- контроль стоимости;
- контроль качества;
- контроль коммуникаций;
- контроль рисков.

В рамках реализации проекта осуществлялся контроль за командой проекта.

Оценивалась занятость конкретных исполнителей в проекте.

Была разработана матрица ответственности. За каждой работой проекта был закреплен конкретный ответственный исполнитель.

Была разработана методика оценки компетентности, сформирован перечень компетентностей, обладание которыми являлось необходимым условием для привлечения сотрудников к работам по проекту. В зависимости от имеющихся компетентностей сотрудники могли претендовать на ту или иную роль в проекте.

Оценивалась квалификация разработчиков программного обеспечения, их знания в области методологии разработки программного обеспечения, владения современными подходами к внедрению информационных систем.

На основании анализа данных о компетентности определенного участника проекта, возложенной на него ответственности, способности выполнять порученные задания принимались решения о продвижении сотрудника по карьерной лестнице.

На каждом этапе работ отслеживались определенные показатели проекта, такие как:

 общая фактическая длительность – разница между фактическими датами окончания и начала работ,

 освоенный объем – сумма плановых стоимостей работ проекта, которые выполнены на текущий момент времени,

• фактическая длительность – сумма фактических длительностей работ проекта, которые выполнены на текущий момент времени,

• фактическая стоимость – сумма фактических стоимостей работ проекта, которые выполнены на текущий момент времени,

• плановая стоимость выполненных работ – сумма плановых стоимостей работ проекта, которые выполнены на текущий момент времени,

• фактическая стоимость выполненных работ – сумма фактических стоимостей работ проекта, которые выполнены на текущий момент времени,

 отклонение по срокам – разница между освоенным объемом работ проекта и плановым объемом работ проекта,

• отклонение по стоимости – разница между освоенным объемом работ проекта и фактической стоимостью работ проекта,

• процент выполнения – отношение фактической длительности выполненных работ проекта к его длительности по завершении.

Заключение

В ходе реализации проекта по разработке и внедрению Системы получены следующие результаты:

– разработана Система и успешно введена в эксплуатацию;

разработана техническая документация и регламенты эксплуатации Системы;

 – реализована возможность электронного обмена данными в рамках единого информационного пространства;

из наследуемых систем мигрировано более
 100 тысяч объектов основных средств;

 – пользователями Системы являются более 500 сотрудников предприятия;

 – создано более 10 типовых ролей (таких как: Бухгалтер, МОЛ, Экономист и др.);

 – создано более 900 групповых ролей (в требуемых разрезах);

 определены ключевые показатели эффективности, необходимые для анализа состояния основных средств;

разработаны и реализованы алгоритмы расчетов ключевых показателей эффективности в системе управления эффективностью деятельности предприятия;

- настроена регламентированная отчетность;

– Система интегрирована в типовую ERP – систему.

– Основные эффекты от внедрения Системы:

 оптимизация процессов управления основными средствами; снижение трудоемкости проведения операций с основными средствами;

 повышение достоверности и качества информации за счет реализации механизмов контроля первичных данных;

 повышение оперативности подготовки аналитической информации для принятия управленческих решений.

Литература

1. Паспорт Программы инновационного развития и технологической модернизации Госкорпорации «Росатом» на период до 2020 г. (в гражданской части)

2. Программа трансформации ИТ Госкорпорации «Росатом» на период 2010–2014 гг. // Решение Правления Госкорпорации «Росатом» от 02.10.09 г. и от 16.10.2009 г.

3. Распоряжение Правления Государственной Корпорации «Росатом» о реализации Программы

«Создание типовой информационной системы предприятий» № 1-1/142-Р от 22.12.2010 г.

4. ГОСТ 34.601-90 Автоматизированные системы. Стадии создания.

5. Положение по бухгалтерскому учету «Учет финансовых вложений» ПБУ 19/02 // Утвержденное приказом Министерства финансов РФ от 10.12.2002 № 126н (с учетом последующих изменений и дополнений).

6. ГОСТ 34.602-89 Техническое задание на создание автоматизированной системы.

7. Методические указания по бухгалтерскому учету основных средств. // Утвержденные приказом Министерства финансов РФ от 13.10.2003 № 91н (с учетом последующих изменений и дополнений).

8. ГОСТ 19. Единая система программной документации.

9. ГОСТ 34.603-92 Виды испытаний автоматизированных систем.

10. Руководство к Своду знаний по управлению проектами (Руководство РМВОК). – Пятое издание. Project Management Institute, Inc., 2013.

ПРОГРАММА РАСЧЕТА РАЗМЕРНЫХ ЦЕПЕЙ В САПР КОМПАС-3D

О. И. Максимов, С. Е. Фильцов, <u>Д. А. Сироткин</u>, А. В. Уразов, Д. А. Клинков, Р. М. Валеев

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

Введение

Важнейшим требованием при создании новых конструкций изделий является достижение максимального производственного эффекта при снижении их стоимости на единицу мощности или производительности. Одним из частных путей решения поставленных задач является расчет на точность с использованием теории размерных цепей [1].

Проведение расчета размерных цепей позволяет обеспечить собираемость и работоспособность изделия, а также определять величины изменения зазоров в изделии во всем диапазоне эксплуатационных температур. Определение данных параметров необходимо для проведения расчетного обоснования, а также для обеспечения максимальной плотности сборки и вместе с тем работоспособности конструкции изделия в целом.

Размерные цепи

Размерной цепью называется замкнутая цепь размеров, определяющих точность относительного расположения осей и поверхностей одной детали или нескольких деталей в сборочном соединении. Примеры размерных цепей со схемами представлены на рис. 1. Целью расчета размерных цепей является проверка правильности заданных в конструкторском документе размеров, обеспечивающих сборку с полной взаимозаменяемостью, путем определения предельных значений замыкающего звена.

Расчет размерных цепей должен подтверждать, что заданные в конструкторском документе размеры и их предельные отклонения при любом их сочетании обеспечивают сборку составных частей и изделия в целом с заданными параметрами в пределах требуемой точности.

Для расчета размерных цепей используются 2 метода: метод минимума и максимума и вероятностный метод.

Номинальный размер замыкающего звена размерной цепи А вычисляют по формуле

$$A_{\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_{A_i} A_i, \qquad (1)$$

где i = 1, 2, ..., m – порядковый номер звена; ξ_{A_i} –

передаточное отношение *i*-го звена размерной цепи.

Для звеньев, повернутых относительно координатных осей, роль передаточных отношений выполняют тригонометрические функции, используемые при проектировании составляющих звеньев на соответствующие координатные оси.





Рис. 1. Примеры размерных цепей

Координату середины поля допуска $\Delta_{0_{\Delta}}$ замыкающего звена вычисляют по формуле:

$$\Delta_{0_{\Delta}} = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \Delta_{0_i}, \qquad (2)$$

где $\Delta_{0_{\Delta}} = \frac{\Delta_{\mathbf{B}_{\Delta}} + \Delta_{\mathbf{H}_{\Delta}}}{2}; \quad \Delta_{0_i} = \frac{\Delta_{\mathbf{B}_i} + \Delta_{\mathbf{H}_i}}{2}; \quad \Delta_{\mathbf{B}_i}, \Delta_{\mathbf{H}_i} = \frac{\Delta_{\mathbf{B}_i} + \Delta_{\mathbf{H}_i}}{2};$

предельные верхнее и нежнее отклонения *i*-го звена.

Допуск замыкающего звена T_{Δ} вычисляют по формулам: при расчете по способу максимумаминимума:

$$T_{\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} \left| \xi_i \right| T_i, \tag{3}$$

где $T_0 = \Delta_{\mathbf{B}_\Delta} - \Delta_{\mathbf{H}_\Delta}, \ T_0 = \Delta_{\mathbf{B}_i} - \Delta_{\mathbf{H}_i};$

при расчете по вероятностному способу:

$$T_{\Delta} = t_{\Delta} \sqrt{\sum_{t=1}^{m-1} \xi_i^2 \lambda_i^2 T_i^2}.$$
 (4)

где λ_i^2 – коэффициент относительного рассеяния.

Коэффициент риска t_{Δ} выбирается из таблиц значении функции Лапласа $\Phi(t)$ в зависимости от принятого процента риска P [2].

Имеющиеся средства

В настоящее время, для расчета размерных цепей используются следующие средства:

- ПО АСКОН «Размерные цепи»;
 - ГРАФПИРКС;
 - Ручной способ;

Плюсы и минусы этих средств представлены в таблице.

Сравнение основных средств расчета размерных цепей

	ПО АСКОН «Размерные цепи»	ГРАФПИРКС	Ручной расчет
Плю- сы	 взаимодей- ствие с КОМПАС; 	 возможен расчет практи- чески любых цепей; 	– возможен расчет любых цепей;
Ми- нусы	 ограничен- ный функцио- нал; нет отчета; много заме- чаний при тес- тировании; 	 нет взаимо- действия с КОМПАС; нет отчета; сложно работать; 	 необходи- мо много вре- мени на расчет и оформление.

ПО «Расчет размерных цепей»

В рамках практического применения САПР КОМПАС-3D в части библиотеки «Размерные цепи» сформулирован ряд предложений по развитию функционала библиотеки. В результате разработана собственная программа «Расчет размерных цепей» как прикладное приложение САПР КОМПАС-3D. Программа, рис. 2, разработана с применением API интерфейсов САПР КОМПАС-3D и Win 32.

Программа «Расчет размерных цепей» является прикладной библиотекой САПР КОМПАС-3D. Взаимодействие с системой осуществляется посредством стандартных функций КОМПАС АРІ. Библиотека – это приложение, созданное для расширения стандартных возможностей КОМПАС-3D и работающее в его среде. По своей архитектуре библиотека является стандартным динамически подключаемым модулем (DLL) Windows. Схема работы программы представлена на рис. 3.

🖞 Расчет разме	рных цепей					
Райл Справка						
) 🖻 🖬 🐠	🖷 🗙 🛦 🖷	∆ 4 @ ⇒	ц 🖓 🔳 🎯	· (i)		
Індекс звена	Номинальное з	в.п.	н.п.	Допуск	Направление	
\1	10.00	2.00	-2.52	4.52	-	
1	25.00	0.52	0.00	0.52	-	
1	80.00	1.00	-1.00	2.00	+	
11	45.00	1.00	-1.00	2.00	-	

Рис. 2. Главное окно программы



Рис 3. Схема работы программы

Расчет размерной цепи проводится последовательно:

- а) выбор составляющих звеньев размерной цепи;
- б) выбор замыкающего звена;

выбор увеличивающих звеньев и задание углов поворота (длянепараллельных размерных цепей);
 г) расчет размерной цепи.

Программа «Расчет размерных цепей» позволяет выполнять расчет методами:

максимума и минимума;

- вероятностным методом.

При этом расчет возможен для следующих цепей: – линейной размерной цепи с параллельными звеньями,

 линейной размерной цепи с непараллельными звеньями,

- угловой размерной цепи.

Возможность формирования отчета, реализованная в ПО «Расчет размерных цепей» позволяет моментально получить отчет, включающий в себя таблицу исходных данных, схему цепи и формулы расчета. Особенностью данного отчета является полное представление данных по размерной цепи, что отсутствует в других программах, представленных выше. Тестовая версия отчета представлена на рис. 4.

Требования к объектам расчета

Для расчета размерной цепи необходимо соблюдение следующих требований:

 – расчет размерных цепей может быть выполнен только для чертежа или фрагмента;

 – элементами размерной цепи могут быть проставленные линейные, радиальные, диаметральные и угловые размеры;

размеры, входящие в размерную цепь, должны быть параллельными. Если в качестве звена указан отрезок, непараллельный направлению цепи, необходимо указать углы поворота;

 для расчета замыкающего размера должны быть известны все составляющие размеры и их отклонения.



Рис. 4. Вид окна программы с результатами расчета размерной цепи

Заключение

ПО «Расчет размерных цепей» позволяет сократить время расчета допусков замыкающих звеньев. В результате автоматизации ручного расчета исключается человеческий фактор: ошибки подсчета значений отклонений допусков. После расчета размерной цепи с помощью разработанного ПО, формируется многостраничный отчет. Тестовая версия программы успешно прошла тестирование, и принято решение о дальнейшем расширении функциональных модулей.

Литература

1. Солонин И. С., Солонин С. М. Расчет сборочных и технологических размерных цепей. – М.: Машиностроение, 1980. 110 с.

2. РД 50-635-87. Цепи размерные. Основные понятия. Методы расчета линейных и угловых цепей. [Электронный ресурс] / ИС «Техэксперт: Интранет». – Введ. 01.07.88.

ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАССИВОВ ДАННЫХ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА МАСКИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ

<u>Д. В. Сплюхин</u>, А. А. Мартынов, Д. Б. Николаев

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

Важное место в защите информационных систем занимает обеспечение конфиденциальности и целостности информации. Современными способами которых являются встраивание информации с целью ее скрытой передачи, построение и адаптация цифровых водяных знаков, формирование идентификационных номеров для защиты от копирования и несанкционированного использования. В качестве номинального элемента для обеспечения высокой криптографической стойкости при маскировании информации используются сформированные тестовые последовательности, начальные заполнения, которые определяют качество и заданные свойства информационной составляющей системы. Основой для формирования последовательностей являются генераторы псевдослучайных последовательностей (ПСП).

На рис. 1 рассмотрен генератор ПСП с входными/выходными величинами, условиями и средствами.



Рис. 1. Генератор ПСП как процесс

Генераторы случайных и псевдослучайных последовательностей являются связующим звеном в обеспечении информационной безопасности. Поскольку такие генераторы применяются во многих криптографических задачах, например, формировании случайных параметров и ключей систем преобразования информации, то требования, предъявляемые к ним, оказываются достаточно высокими.

Генераторы ПСП широко используются при решении сложных статистических задач с начальными условиями, также находят применение в имитационном моделировании автоматизированных систем. Проверка качества (тестирование) генераторов ПСП, используемых в криптографических приложениях, является важной задачей как в практическом, так и в теоретическом плане. От качества выходной последовательности генератора ПСП зависит качество системы, в которой он используется, точность результатов моделирования, стойкость средств защиты информации. Существует необходимость в повышении качества маскирования информации, так как от него зависят криптографические свойства информационной системы, в которой используется данный механизм защиты информации. Отсюда и формируется цель данной работы: исследование математических характеристик массивов данных для повышения качества маскирования информации.

На начальном этапе проводился анализ генераторов псевдослучайных последовательностей, который показал и дал обоснование основным методикам разработки и проверки качества генераторов псевдослучайных последовательностей. В ходе работ и исследований разработан программный комплекс модульного типа для осуществления анализа исследуемых данных информационных выходных потоков гетерогенных псевдослучайных последовательностей, который отвечает самым высоким требованиям по универсальности применения, по эффективности и безопасности.

Для решения поставленной цели принято решение о проведении исследования информационных характеристик гетерогенных псевдослучайных последовательностей для выявления общих характеристик, различных оценок, факторов, по которым уже в дальнейшем следует анализировать генератор ПСП.

Для проведения исследования выбран и программно реализован генератор ПСП, построенный на регистрах сдвига, формируемый последовательность максимального период выходной ПСП ~(2⁹⁸–1). Генератор ПСП, построенный на регистрах сдвига обладает следующими свойствами: простота реализации, прозрачность эксперимента, показательность. Структурная схема генератора ПСП представлена на рис. 2.

На следующем этапе работы выбрано изображения для дальнейшего маскирования ПСП размерностью 10⁶ символов (~120 КБайт), проведено несколько операций маскирования линейными и нелинейными ПСП с целью выявления качества маскирования. Выбрано несколько информационных характеристик ПСП для проверки результатов маскирования: гистограммы вероятностей появления комбинаций длиной 1–5 бит в исходном и маскированном изображениях, коэффициент взаимной корреляции исходного и маскированного изображений, величина преобладания «0» и «1» в маскированном изображения.



RG1, RG2, RG3 – регистры сдвига с обратной связью (РЛЗ);

В - узел реализации операции выборки;

RG1 задан многочленом вида x⁶⁰+x¹¹+1;

RG2 задан многочленом вида x⁷⁹+x¹⁹+1;

RG3 задан многочленом вида x⁹⁸+x²⁷+1;

 $N_4 = 32;$ $k_4 = 17.$

Рис. 2. Структурная схема выбранного для исследования генератора ПСП

При маскировании исходного изображения равновероятной линейной ПСП получены следующие результаты: коэффициент взаимной корреляции исходного и замаскированного изображения равен «0,001212», величина преобладания «1» не превышает «0,0011213», визуально маскирование проведено успешно. Исходное изображение и результат маскирования равновероятной линейной ПСП показан на рис. 3.



Рис. 3. Исходное изображение и результат маскирования равновероятной линейной ПСП

Для получения нелинейной ПСП из равновероятной линейной ПСП внесено преобладание величины «1» в исходную ПСП с шагом 8 и с шагом 3. Внесение величины преобладания в равновероятную линейную ПСП можно считать гетерогенной опасной неисправностью. При маскировании исходного изображения нелинейными ПСП получены следующие результаты: коэффициент взаимной корреляции исходного и замаскированного изображения при внесении преобладания «1» с шагом 3 равен «–0,324444», с шагом 8 равен «-0,113333», при внесении преобладания «1» с шагом 3, величина преобладания не превышает «0,19596», а с шагом 8 не превышает «0,066868», визуально маскирование проведено неуспешно (заметен контур изображения при внесении преобладания «1» с шагом 3). Результат маскирования нелинейной ПСП с внесением преобладания «1» с шагом 8 и с шагом 3 представлен на рис. 4.



Рис. 4. Результат маскирования нелинейной ПСП с внесением преобладания «1» с шагом 8 и с шагом 3

В ходе работы проведен анализ влияния математических характеристик массивов данных на качество маскирования информации, разработано программное обеспечение для анализа исследуемых данных математических характеристик гетерогенных массивов данных, проведены маскирования гетерогенными массивами данных и представлены визуальные примеры гетерогенных маскирований информации. В ходе исследования проводились программные маскирования информации при применении криптографических операций: побитовая операция сложения по модулю два, операция перестановки бит, операция замены бит. На основе вычисленных характеристик построены гистограммы, отражающие распределение полученных математических величин на различных объемах выборки.

По полученным результатам можно сказать, что при отсутствии гетерогенных опасных неисправностей, информационный массив вырабатываемой ПСП близок по своим свойствам к идеальной случайной последовательности. При возникновении опасных гетерогенных неисправностей происходит значительное снижение криптографической стойкости информационного массива реализуемой ПСП.

Результаты, полученные на практике, будут использованы при построении программно-методического комплекса анализа псевдослучайных последовательностей с линейными и нелинейными характеристиками.

Литература

1. Информационная безопасность компьютерных систем и сетей: учеб. пособие / В. Ф. Шаньгин. – М.: ИД «ФОРУМ»: ИНФРА-М, 2013. – 416 с.: ил.

2. Чугунков И. В., Иванов М. А. Теория, применение и оценка качества генераторов псевдослучайных последовательностей. – М.: «КУДИЦ-ОБРАЗ», 2003.

3. Теоретико-числовые методы в криптографии: Учебное пособие / Е. Б. Маховенко. – М.: Гелиос АРВ, 2006. 320 с., ил.

ИНТЕРФЕЙС ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ ПОДСИСТЕМЫ «МОДЕЛИРОВАНИЕ СА»

А. Н. Липатов, В. А. Сюлаев

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина», г.Снежинск Челябинской обл.

В РФЯЦ-ВНИИТФ ведутся работы по созданию подсистемы «Моделирование системы автоматики (СА)», предназначенной для функционального и схемотехнического моделирования режимов работы СА изделия.

Помимо разработки библиотеки моделей приборов автоматики (ПА) на языке VHDL-AMS, была поставлена задача создания рабочей среды пользователя, в которой он мог бы составлять задание на моделирование СА и анализировать результаты расчетов.

Было принято решение: задание на моделирование СА формировать непосредственно в схемном редакторе «ЭЗ» САПР «СА» (рис. 1). Для каждого устройства, представленного на схеме ЭЗ изделия (например, ЭВ1), можно программным способом извлечь имена цепей, к которым подключены контакты устройства. Это означает, что при наличии в библиотеке моделей соответствующей модели прибора автоматики, а именно, ТЭВ31 (рис. 2), появляется возможность взять ее заголовок и заменить в нем имена внешних узлов на имена соответствующих цепей из схемы ЭЗ. Повторив эту операцию для каждого устройства в схеме, сгенерируем совокупность строк, составляющих vhd-файл, необходимый для моделирования схемы изделия.



Рис. 1. Фрагмент схемы «ЭЗ» в окне схемного редактора

```
Файл
              : TEV31.vhd
  Автор
               : Липатов А.Н.
               : 2013/08/08
   Создан
               : 2014/02/12
-- Изменен
-- Описание:
               Модель включателя электромагнитного ТЭВ31
library IEEE;
use IEEE.electrical_systems.all;
entity tev31 is
   generic (Vsr
                  : REAL := 14.0;

    напряжение срабатывания

                    time := 12.0 ms;
             Tsr
                  :
                                           -- время срабатывания
             Robm : REAL := 130.0;
                                           -- сопротивление обмотки
                  : real := 1.0;
             Ron
                                           -- сопротивление замкнутого контакта
            Roff : real := 1.0e6);
                                           -- сопротивление разомкнутого контакта
   port (terminal a1, b1, a2, b2, x1, x2, x3, x4, x5, x6, x7, x8, x9, x10, x11, x12, x13, x14, x15, x16, x17, x18, x19, x20 : electrical);
end entity tev31 ;
```

Рис. 2. Заголовок модели на языке VHDL-AMS

Таким образом, мы можем сформулировать следующие дополнительные требования к схемному редактору «ЭЗ», необходимые для генерации файла в формате VHDL-AMS с описанием схемы:

 загружать из библиотечного файла заголовки моделей со списками параметров и внешних выводов (по команде пользователя);

 назначать каждому устройству из схемы ЭЗ требуемую модель и редактировать ее параметры (под управлением пользователя);

 автоматически генерировать строки вызова моделей с именами цепей ЭЗ, подставленными вместо имен интерфейсных узлов (по команде пользователя).

Возможность назначать составным частям (СЧ) изделия модели на языке VHDL-AMS была реализована в схемном редакторе «ЭЗ» с помощью диалогового окна «Параметры VHDL – моделей» (рис. 3).

В левой части диалогового окна расположено дерево состава, в котором отображаются СЧ изделия. После выбора в дереве состава нужной СЧ, ей можно назначить соответствующую модель из библиотеки eCAD. Для этого в списке моделей следует выбрать имя заголовка модели, после чего ее параметры станут доступны для редактирования. После того как всем устройствам схемы назначены модели, следует нажать кнопку «Создать файл Testbench». В папке проекта будет сформирован файл описания схемы в формате VHDL-AMS, который имеет следующий вид (рис. 4).

Блок операторов entity ... end entity описывает внешний интерфейс файла типа TESTBENCH. После ключевого слова terminal, идет перечисление имен цепей, с помощью которых реализуются связи выводов моделей между собой. После ключевого слова begin следуют ссылки на модели приборов, в частности, X_MA1_EV6 является ссылкой на модель tev31. Оператор generic map содержит параметры экземпляра модели. Они могут отличаться от параметров «по умолчанию», если были скорректированы пользователем через диалоговое окно «Параметры VHDL - моделей». Оператор port map устанавливает связи выводов экземпляра модели с узлами (цепями) электрической схемы. Подобным же образом формируются ссылки на модели остальных приборов.

Изделие RN2016	Имя модели	Архитектура	
GB1 Батарея Т500 ФШ3.509.561	TEV31	▼ Cc	текст модели
СВ2 Батарея 1500 Фш3.509.561 Х1 Прибор Х1	Параметры моде	ли	
ВУ1 Устройство временное РВУ3	Имя	Тип	Значение
	Vsr	REAL	14.0
Включатель электромагни	Tsr	time	12.0 ms
33 Включатель электромагни	Robm	REAL	130.0
4 Включатель электромагни	< Ron	real	1.0
ключатель электромагни	Roff	real	1.0e6
ЭВ6 Включатель электромагни			
В1 Резистор С2-30H-0 5-2 5 Ом+5°			
R2 Резистор C2-30H-0,5-2,5 Ом±5%			
	Тедактирование	зпачения	12.0
	151		12.0 1115
		Удалить модель	из Создать файл

Рис. 3. Диалоговое окно «Параметры VHDL - моделей»

```
▶ 01 library IEEE, MGC AMS;
               02 use IEEE.electrical_systems.all;
03 use IEEE.MATH REAL.all;
                04 use MGC_AMS.CONVERSION.all;
                05 use work.all:
                06 use work.Common.all
               08 entity RN2016_tb is
09 end entity RN2016_tb;
                10
                11 architecture arch RN2016 of RN2016 tb is
                12
                                                               erminal E0004, E0005, E0006, E0007, E0008, E0009, E0010, E0012, E0013, E0018,
                13
                14
                                                    E0019, E0020, E0021, E0022, E0023, E0024, E0025, E0026, E0027, E0028, E0029, E0030, E0031, E0032, E0033, E0034, E0035, E0036, E0037 : electrical;
                15
                16
                17 begin
                18 X_MA1_EV6 : entity TEV31 (cc)
                                                    MAL EV6 : entity TEV31 (cc)
generic map ( Vgr >> 18.0, Tsr => 10.0 ms, Robm => 130.0, Ron => 1.0, Roff => 1.0e6 )
port map ( a1 => E0029, b1 => E0028, a2 => E0030, b2 => E0032, x1 => E0005,
x2 => E0010, x3 => ground, x4 => ground, x5 => ground, x6 => ground,
x7 => E0010, x6 => E0033, x9 => ground, x11 => E0024,
x12 => E0011, x13 => E0027, x14 => E0028, x15 => ground, x11 => E0024,
x12 => E0031, x13 => E0027, x14 => E0028, x15 => ground, x16 => ground,
x12 => E0031, x13 => E0027, x14 => E0028, x15 => ground, x16 => ground,
x12 => E0031, x13 => E0027, x14 => E0028, x15 => ground, x16 => ground,
x12 => E0031, x13 => E0027, x14 => E0028, x15 => ground, x16 => ground,
x12 => E0031, x13 => E0027, x14 => E0028, x15 => ground, x16 => ground,
x12 => E0031, x13 => E0027, x14 => E0028, x15 => ground, x16 => ground,
x12 => E0031, x13 => E0027, x14 => E0028, x15 => ground, x16 => ground,
x12 => E0031, x13 => E0027, x14 => E0028, x15 => ground, x16 => ground,
x12 => E0031, x13 => E0027, x14 => E0028, x15 => ground, x16 => ground,
x12 => E0031, x13 => E0027, x14 => E0028, x15 => ground, x16 => ground,
x12 => E0031, x13 => E0027, x14 => E0028, x15 => ground, x16 => ground,
x12 => E0031, x13 => E0027, x14 => E0028, x15 => ground, x16 => ground,
x12 => E0031, x13 => E0027, x14 => E0028, x15 => ground, x16 => ground,
x12 => E0031, x13 => E0027, x14 => E0028, x15 => ground, x16 => ground,
x12 => E0031, x13 => E0027, x14 => E0028, x15 => ground, x16 => ground,
x12 => E0031, x13 => E0027, x14 => E0027, x14
                19
                20
                21
                22
                23
                24 x17 => ground, x18 => ground, x19 => E0036, x20 => E0019 );
25 X_MA1_EV5 : entity TEV31 (cc)
               25 X_MAL_EV5 : entity TEV31 (cc)
    generic map ( Vsr => 14.0, Tsr => 12.0 ms, Robm => 130.0, Ron => 1.0, Roff => 1.0e6 )
    port map ( a1 => E0026, b1 => E0025, a2 => E0006, b2 => E0007, x1 => E0026,
    x2 => E0013, x3 => ground, x4 => ground, x5 => ground, x6 => ground,
    x1 => ground, x13 => E0024, x14 => E0025, x15 => ground, x16 => ground,
    x1 => sqround, x13 => E0024, x14 => E0025, x15 => ground, x16 => ground,
    x1 => tots, x18 => E0024, x14 => E0025, x15 => ground, x16 => ground,
    x1 => tots, x18 => E0024, x14 => E0025, x15 => ground, x16 => ground,
    x1 => tots, x18 => E0024, x14 => E0025, x15 => ground, x16 => ground,
    x1 => tots, x18 => E0024, x14 => E0025, x15 => ground, x16 => ground,
    x1 => tots, x18 => E0024, x14 => E0025, x15 => ground, x16 => ground,
    x1 => tots, x18 => E0024, x14 => E0025, x15 => ground, x16 => ground,
    x1 => tots, x18 => E0024, x14 => E0025, x15 => ground, x16 => ground,
    x1 => tots, x18 => E0024, x14 => E0025, x15 => ground, x16 => ground,
    x1 => tots, x18 => E0024, x14 => E0025, x15 => ground, x16 => ground,
    x1 => tots, x18 => E0024, x14 => E0025, x15 => ground, x16 => ground,
    x1 => tots, x18 => E0024, x14 => E0025, x15 => ground, x16 => ground,
    x1 => tots, x18 => E0024, x14 => E0025, x15 => ground, x16 => ground,
    x1 => tots, x18 => E0024, x14 => E0025, x15 => ground, x16 => ground,
    x1 => tots, x18 => tot
                                                       generic map ( Vsr => 14.0, Tsr => 12.0 ms, Robm => 130.0, Ron => 1.0, Roff => 1.0e6 )
                33
```

Рис. 4. Фрагмент сформированного файла описания схемы в формате VHDL-AMS

Сформированный файл описания схемы в формате VHDL-AMS может быть запущен на «счет» в любой системе моделирования, которая работает с этим стандартным форматом. Мы использовали зарубежную систему моделирования «SV». Результаты моделирования удобнее всего представлять в графической форме в виде диаграмм токов, напряжений, логических сигналов и т.д. (рис. 5). Для этого в системе «SV» имеется удобный интерфейс «SV-Viewer». С его помощью можно не только визуализировать результаты моделирования, но и проводить несложные измерения и вычисления, используя графические данные.



Рис. 5. Графическая часть результатов моделирования

Стандарт VHDL-AMS предоставляет возможность моделям в процессе счета писать (читать) информацию в файл (из файла). Такой возможностью удобно воспользоваться, например, для создания текстового log-файла (журнала событий) (рис. 6), который заполняется в процессе счета сообщениями, формируемыми моделями ПА в моменты времени, соответствующие ключевым событиям.

Таким образом, процесс VHDL-моделирования с использованием схемного редактора «ЭЗ» включает следующие этапы (рис. 7):

 – создание библиотеки моделей элементов и устройств автоматики в формате VHDL, доступной как схемному редактору «ЭЗ», так и программе моделирования;

– создание моделей неэлектрической части СА
 и окружающей среды (атмосфера, баллистические
 уравнения, приемники давления и т. д.);

– автоматическое получение vhd-файла с описанием схемы из схемного редактора «ЭЗ» (предварительно всем устройствам схемы должны быть назначены модели). Этот файл формируется в папке проекта и получает имя X.vhd, где X – название проекта, преобразованное в латиницу.

🗌 log -	— Блокно	т					X	5
<u>Ф</u> айл	<u>П</u> равка	Фор <u>м</u> ат	<u>В</u> ид	<u>С</u> правка	3			
0.020	000e+00	0 xxx	C00	бщение	1	XXX		
1.000	000e+00	0 xxx	C00	бщение	2	XXX		
1.100	000e+00	0 xxx	C00	бщение	3	XXX		
1.101	672e+00	0 xxx	C00	бщение	4	XXX		
1.200	000e+00	0 xxx	C00	бщение	5	XXX		
3.135	575e+00	0 xxx	C00	бщение	6	XXX		
4.000	000e+00	0 xxx	C00	бщение	7	XXX		
4.655	000e+00	0 xxx	C00	бщение	8	XXX		
5.120	000e+00	0 xxx	C00	бщение	9	XXX		
5.222	000e+00	0 xxx	C00	бщение	10	XXX		
6.152	000e+00	0 xxx	C00	бщение	11	XXX		
6.382	000e+00	0 xxx	C00	бщение	12	XXX		
6.655	000e+00	0 xxx	C00	бщение	13	XXX		
7.100	000e+00	0 xxx	C00	бщение	14	XXX		
7.103	000e+00	0 xxx	C00	бщение	15	XXX		
7.118	000e+00	0 xxx	C00	бщение	16	XXX		
7.229	000e+00	0 xxx	C00	бщение	17	XXX		
7.232	000e+00	0 xxx	C00	бщение	18	XXX		
7.245	000e+00	0 xxx	C00	бщение	19	XXX		
7.652	000e+00	0 xxx	C00	бщение	20	XXX		
8.876	000e+00	0 xxx	C00	бщение	21	XXX		
8.952	000e+00	0 xxx	C00	бщение	22	XXX		
								π
.€							*	.,d

Рис. 6. Пример фрагмента текстового log-файла



Рис. 7. Процесс VHDL-моделирования с использованием схемного редактора «ЭЗ»

Результаты

1) создан специальный интерфейс пользователя, сочетающий возможности схемного редактора «ЭЗ» САПР «СА» и системы моделирования «SV». С его помощью можно:

 – создавать схему электрическую принципиальную в среде схемного редактора «ЭЗ»;

 назначать каждому устройству из схемы ЭЗ требуемую VHDL-модель и редактировать ее параметры;

 автоматически генерировать файл исходных данных для моделирования;

представлять результаты моделирования в виде журнала событий и временных диаграмм.

 интерфейс пользователя отработан при моделировании фрагментов электрической схемы одного из изделий.

ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ ИНТЕГРИРОВАННОЙ ИНФОРМАЦИОННО-СПРАВОЧНОЙ СИСТЕМЫ ЯОК ПО НОРМАТИВНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ НА БАЗЕ ИНФОРМАЦИОННО-СПРАВОЧНОЙ СИСТЕМЫ «ТЕХЭКСПЕРТ»

<u>Н. О. Швед</u>, А. А. Орешин

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

Основание создания ИСС ЯОК

Целью создания интегрированной информационно-справочной системы Ядерного Оружейного Комплекса (ЯОК) по нормативной документации на базе информационно-справочной системы «Техэксперт» (ИСС ЯОК) является создание единого фонда внешних и внутренних нормативных документов, необходимых в работе сотрудникам предприятий ЯОК с возможностью сквозного поиска и гипертекстовых связей.

Реализация данной системы позволит пользователям получать необходимые документы через «одно окно» с гарантией их актуальности и достоверности.

Архитектура ИСС ЯОК

Характеристика объектов базы данных

нормативных документов

Объектами базы данных являются нормативные документы (НД), имеющиеся в фонде НКБС и предприятия, а также прочие НД в номенклатуре, определяемой заказчиком:

 нормативно-техническая документация – ГОСТ, СНиП, СанПиН, ВСН, РД, РДС, СП, ГЭСН, СТО и др., устанавливающие комплексы норм, правил, требований для определенных областей экономики.

 нормативно-правовые акты различных органов государственной власти Российской Федерации.

– технологическая и справочная информация (типовые технологические карты, типовые проекты производства работ и материалы для разработки собственных проектов, формы строительной документации, словари определений, практику разрешения споров и многое другое).

– отраслевые стандарты (ОСТ, ПР, Р, РТМ, РД, НМО, НД, СТО).

Каждый документ может содержать либо чисто текстовую информацию, либо комбинацию текстовой, табличной и графической информации.

Принципиальной особенностью фонда НД является необходимость оперативного ведения (актуализации) хранимых документов – в НД вносят изменения, НД могут быть аннулированы по окончанию или в течение установленного срока действия, либо заменены вновь разработанными документами.

Возможности системы

Основные возможности системы:

 предоставление доступа к нормативнотехнической и нормативно-правовой информации;

 предоставление средств поиска нормативнотехнической и нормативно-правовой информации в пределах базы данных системы.

Методы организации поиска

Поиск в предварительно подготовленном массиве нормативных документов по ключевым словам в тексте документа, значениям атрибутов документа и их комбинации.

Поиск по тексту – отбор документов, в тексте которых встретились заданные ключевые слова или их сочетания.

Поиск по атрибутам - отбор документов, атрибуты которых удовлетворяют условиям поискового запроса. Основное средство поиска документов в базе данных - карточка атрибутов. Она представляет собой таблицу с некоторым количеством поисковых полей. Для каждого поискового поля предусмотрен свой словарь, автоматически заполняемый и корректируемый по мере поступления документов в базу данных. При вводе в систему каждого нового документа его атрибуты заносятся в словарь, соответствующий определенному поисковому полю. Набор атрибутов карточки документа определяется во время подготовки массива нормативных документов. Как правило, в карточку атрибутов, по которым осуществляется поиск, включен широкий набор полей: орган, принявший документ, вид документа, название документа, дата принятия, номер, номер и дата регистрации в Министерстве юстиции. Для поиска любого документа достаточно заполнить лишь два-три поля. Использование этого вида поиска возможно только при условии наличия точных атрибутов конкретного документа.

Интеллектуальный поиск – поиск, являющийся сочетанием двух вышеназванных методов поиска. В качестве поискового образа документа используется его полный текст, а также распознаются некоторые атрибуты документа. Этот вид поиска осуществляется при отсутствии точных данных о документе или если известны только основные атрибуты документа. Для увеличения скорости процесса используется информация словаря синонимов. Данный вид поиска основан на полнотекстовом автоматизированном индексировании документов, при котором все слова, встречающиеся в текстах, автоматически заносятся в словарь с указанием номера документа, где встретилось данное слово.

Перечень функций, реализуемых системой

Перечень функций:

 поиск в автоматизированной системе нормативно-технической и нормативно-правовой информации, необходимой в работе специалистов,

 создание индивидуальной папки для работы с нормативно-технической и нормативно-правовой информацией,

 – создание общей папки для коллективной работы с нормативно-технической и нормативноправовой информацией,

 сравнения редакций документов (сравнение всего документа и обзор изменений),

 постановка выбранного документа на «контроль» (автоматическое оповещение о всех изменениях выбранного документа),

 сервис «Двухоконный режим» (одновременный просмотр нескольких документов),

– интеграция с офисными и конструкторскими приложениями (MS Office, Auto CAD, Компас и др.),

– проставление ограничений работы с документами (запрет копирования, печати и прочее).

 – широкие возможности печати документы (возможность распечатать любой текстовый и сканированный документ, печать документов формата А3 на листах А4 с указанием линий склеивания после печати и др.). <u>Варианты архитектуры ИСС ЯОК</u> представлены на рис. 1



Рис. 1. Варианты архитектуры ИСС ЯОК

Интерфейс ИСС ЯОК представлен на рис. 2

Описание взаимосвязей ИСС ЯОК

с другими системами

• Пример взаимодействия с MS Office представлен на рис. 3.

Уже на стадии подготовки внутрифирменных документов предоставляется возможность проставлять ссылки и использовать материалы из ИСС ЯОК.



Рис. 2. Интерфейс ИСС ЯОК

ų	1 При.doc - Microsoft Word -	□ ×
:	<u>Файл Правка Вид Вставка Формат Сервис Таблица Окно Справка</u> Введите вопрос	• ×
:	🗋 🙆 🖬 🕃 🗿 🔊 - 연 - 🗐 🏥 ¶ 100% 🔹 📲 Times New Roman 🔹 12 🔹 🗶 🗶 및 등 등 등 등 등 등 등 등 등 등 등 등 등 등 등 등 등 등	<u>A</u> -
(🕼 🗟 Авторасстановка ссылок 🧟 🔤 💽 💡	
	1 3 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	· · · · ·
	При отсутствии реализации можно предъявить НДС к возмещению по приобретенному оборудованию при наличии счета-фактуры продавца. В соответствии с п.2 ст.171 и п.1 ст.172 НК РФ для принятия НДС, предъявленного поставщиком товаров (работ, услуг), имущественных прав к вычету, необходимо выполнить три условия:	

Рис. 3. Взаимодействие с MS Office

• Пример взаимодействия с Компас-3D, рис. 4.

Находясь в системе проектирования, можно получить быстрый доступ к материалам систем, а также установить ссылки на материалы ИСС ЯОК.

• Пример взаимодействия с Auto CAD, рис. 5.

Находясь в системе проектирования, можно получить быстрый доступ к материалам ИСС ЯОК, а также установить ссылки на материалы ИСС ЯОК.

• Пример взаимодействия с почтовыми клиентами, рис. 6.



Рис. 4. Взаимодействие с MS Office

R AutoCAD 2007	:(CUberticleptabl Decomental Jaropagnike) 40-6030-5.deg) free Juset Format Torio, Dara Denamico: Marily Window Help NormaCS しつおうしーロック・アメート・コードになったので、空田 1000000000000000000000000000000000000	Sandard
1110	3.407.1-157.1-104	Стойка СЦП195-310
010	<u>F0¢T</u> 22687.3-85	Подпятник П1
0020	3.40 ^{(TOCT 226873-85 Croiker xezesosagnaki regeneri in nogrammakos 1.7.7-1.30.1-0001}	Анкерная балка АБ
\$ P .]		
A		

Рис. 5. Взаимодействие с AutoCAD



Рис. 6. Взаимодействие с почтовыми клиентами

Перспективы и области применения ИСС ЯОК

Функционирование системы

1. Сведения о входных данных

Входными данными программы являются, главным образом, запросы к базе данных информационной системы, представляющие собой информацию в текстовом виде. В текст запроса входят ключевые слова, наиболее полно характеризующие искомый документ, а также связанные с ним цифровые данные, например, дата принятия закона, его регистрационный номер и т. д. Программа фильтрует входные данные, отсеивая «шумовые» слова: предлоги, междометия, наиболее часто употребляемые буквосочетания, затрудняющие идентификацию конкретного документа.

Кроме вновь формируемых запросов, в качестве входных данных программа принимает наименования сохраненных, ранее выполненных обращений к базе данных, находящихся в пользовательских папках.

К входным данным относится интерпретация действий пользователя по настройке информационной системы – подключению/отключению томов базы данных, изменению шрифтов и т. д.

2. Сведения о выходных данных

Выходные данные подразделяются на результаты обращения к базе данных информационной системы и сообщения пользователю, не связанные с обработкой запросов.

Результатом обращения к базе данных может быть список документов, отвечающих параметрам запроса, представленный в удобном для дальнейшей работы виде и отсортированный заданным образом.

Интерфейсные сообщения пользователю подразделяются на сообщения об ошибках действия или неверных настройках системы и, наоборот, об удачном завершении работы того или иного модуля программы. 1. Использование ИСС ЯОК на предприятиях ЯОК будет иметь большой экономический эффект, обусловленный:

 – сокращением сотрудниками предприятия временных затрат на поиск и получение нормативных документов в бумажном виде;

 сокращением затрат на поддержку фонда бумажных копий нормативных документов в подразделениях предприятия;

– сокращением штучных закупок нормативных документов,

 а также повысится качество выполняемых работ за счет использования только актуальных документов и возможности более частого обращения к нормативным документам в связи с доступностью непосредственно с АРМ пользователя.

2. Необходимое количество лицензий ИСС ЯОК предполагается определять опытным путем в первый год эксплуатации, так как поставщик на первый год предоставляет большое количество бесплатных лицензий полной базы для проведения нагрузочного тестирования на предприятии. По результатам первого года эксплуатации будет получена статистика обращений пользователей к серверу ИСС ЯОК и определено количество «плавающих» лицензий для закупки на коммерческой основе.

3. Техническое решение интегрированной информационно-справочной системы может быть тиражировано на предприятия ЯОК. При этом предприятия должны будут первоначально приобрести платформу ИСС «Техэксперт» у регионального поставщика.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ДИСПЛЕЙНЫХ МОДУЛЕЙ НА ОСНОВЕ МАТРИЧНЫХ СВЕТОДИОДНЫХ ИНДИКАТОРОВ

А. Н. Юдачев

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

Во всех системах, где требуется представить информацию в форме, удобной для визуального восприятия, применяются средства отображения информации. Средства отображения информации являются одной из наиболее быстро развивающихся отраслей современной электроники, для которой характерно широкое использование больших интегральных схем и новых типов индикаторов, основанных на различных физических принципах.

В зависимости от сложности устройства отображения информации представляют собой либо одиночные элементы индикации, либо их набор в виде информационных полей, дисплейных модулей, плоских экранов и т. д., содержащих элементы индикации определенного типа и устройства управления ими. В состав устройства отображения информации кроме самих элементов индикации входят и средства ввода информации, а также средства преобразования, хранения и обработки информации.

Разработка аппаратуры специального назначения накладывает жесткие требования к выбору элементной базы, особенно остро это касается выбора элементов индикации.

На этапах разработки макета прибора в качестве устройства отображения информации, допускается использование дисплейных модулей зарубежного производства. Наиболее популярными, по причине их ценовой доступности и простого алгоритма информационного обмена, из них являются алфавитноцифровые жидкокристаллические модули со встроенной схемой управления на основе контроллера HD44780 [1]. Такое готовое решение удобно для отработки общего алгоритма функционирования прибора, создания и отработки экранных форм выводимой информации. На этапе опытного производства применять данный тип устройств нельзя, поэтому встает задача прямой замены зарубежного модуля на аналогичный отечественный, который должен отвечать следующим требованиям:

 дисплейный модуль должен быть выполнен в виде конструктивно законченного устройства с минимальными массогабаритными характеристиками, близкими к зарубежным аналогам;

2) дисплейный модуль должен иметь интерфейс связи, унифицированный по протоколу и физическому стыку с интерфейсом алфавитно-цифровых жидкокристаллических модулей, на основе контроллера HD44780, производимых рядом зарубежных фирмы, таких как Data Vision, Winstar и др.;

3) дисплейный модуль должен работать при напряжении питания 5 В;

4) входная информация для индикации должна поступать в дисплейный модуль в ASCII кодах;

 дисплейный модуль должен разрабатываться на отечественной элементной базе, допущенной межведомственным ограничительным перечнем МОП 44;

6) дисплейный модуль должен быть работоспособным в широком диапазоне температур;

 отображаемая информация должна быть хорошо видна при любой освещенности и при достаточно больших углах обзора;

8) разрешение (МОИ) должно составлять 80 знакомест (4 строки по 20 символов).

Структурная схема разработанного дисплейного модуля полностью удовлетворяющего всем вышеописанным требованиям приведена на рис. 1.



Рис. 1. Структурная схема дисплейного модуля

Для отображения информации в дисплейном модуле используется 20 светодиодных матричных индикаторов типа ИПВ72А-4/5х7Л, внешний вид и габаритные размеры одного из них приведен на рис. 2. Эти индикаторы были конструктивно объединены в группу 4×5 (4 строки по 5 индикаторов в строке), при этом получился дисплейный модуль разрядностью 4×20 символов.



Рис. 2. Внешний вид и габаритные размеры индикатора ИПВ72А-4/5х7Л

Данный тип индикаторов предназначен для отображения буквенно-цифровой и символьной информации и позволяют отображать практически любые символы размерностью 5×7 точек. Принципиальная схема индикатора ИПВ72А-4/5х7Л представлена на рис. 3 [3].

Данный тип индикаторов идеально подходит для встраивания в переносную аппаратуру, работающую в условиях недостаточного освещения и низкой

температуры, где применение жидкокристаллических индикаторов сопряжено с определенными трудностями, к тому же они разрешены к применению межведомственным ограничительным перечнем МОП 44 [2]. Индикаторы электрически совместимы с уровнями КМОП-микросхем и представляют собой гибридную сборку в керамическом корпусе, имеют 4 знаковых разряда из четырех матриц по 5*7 элементов (140 светоизлучающих диодов) с внутренней схемой управления. Каждая матрица светоизлучающих диодов имеет 7 строк (у диодов в строке соединяются катоды) и 5 столбцов (у диодов в столбце соединяются аноды). Соответствующие выводы столбцов всех матриц соединены между собой и с соответствующими выводами индикатора. Строки матриц наружу не выводятся, и внутри индикатора соединены каждая со своим драйвером постоянного втекающего тока. Схема управления содержит 28разрядный внутренний сдвиговый регистр с последовательным входом и выходом, параллельными выводами, управляющий драйверами постоянного втекающего тока. Последовательный выход сдвигового регистра связан с последним его разрядом и может быть подключен к входу следующего такого же индикатора, что позволяет создавать 8-ми, 12-ти, 16-ти и т. д. разрядные индикаторы. Сдвиговый регистр снабжен также входом разрешения Е, нулевой сигнал на котором отключает отображение независимо от состояния сигналов на входах столбцов индикатора и содержимого регистра.

Матричные светодиодные индикаторы работают в режиме динамической индикации с постоянной частотой смены кадров 100 Гц, поэтому необходимо непрерывно осуществлять смену кадров, если частота смены кадров будет большой, человеческих глаз не сможет отследить быструю смену состояний индикаторов, и не увидит мигание изображения. Для комфортного отображения информации микроконтроллер, с периодичностью 0,5 мс, перезагружает данные для засветки.



Рис. 3. Принципиальная схема индикатора ИПВ72А-4/5х7Л

Управление засветкой БИ осуществляется в два этапа.

На первом этапе микроконтроллер загружает данные для индикации. Перед началом загрузки необходимо отключить засветку горящих индикаторов. Данные для индикации предварительно считываются из ОЗУ. Для загрузки информации в сдвиговые регистры матричных светодиодных индикаторов используется стандартный интерфейс SPI, который предназначен для быстрого синхронного обмена информацией между микроконтроллером и периферийными устройствами или между двумя микроконтроллерами. Для загрузки данных используется вывод MOSI, который подключается к последовательному входу первого в строке индикатора. Пять индикаторов внутри строки соединены так, что последовательный выход предыдущего соединяется с входом последующего, такое подключение позволяет загрузить данные сразу для всей строки выбранного столбца. Запись информации в сдвиговый регистр осуществляется по тактовым импульсам сигнала SCK интерфейса SPI. Запись входной информации в последовательный сдвиговый регистр осуществляется по задним фронтам тактовых сигналов.

На втором этапе МК на выбранной строке на короткое время включает засветку загруженного столбца, путем подачи на вход столбца и на объединенные входы Е выбранной строки высокого логического уровня. Для адресного управления свечением светодиодных индикаторов в дисплейном модуле все одноименные входы столбцов 1–5 во всех строчках объединены и подключаются к коммутатору столбцов, также объединены входы разрешения Е в каждой строке в сигналы управления строками. Такая реализация позволяет значительно снизить общее энергопотребление индикатора, т. к. одновременно засвечивается только один столбец одной строки.

Спустя время засветки происходит аналогичный процесс записи данных и включения светодиодов для того же столбца, но следующей строки и т. д., затем все повторяется для следующего столбца. Когда будут засвечены все строчки и все столбцы будет сформирован кадр.

Основным элементом в блоке контроля и обработки информации является микроконтроллер, выполняющий функции вычислительного ядра для реализации управляющих алгоритмов. Программноаппаратное управление осуществляется с помощью микропроцессорного элемента на базе микро-ЭВМ 1882BE53У в корпусе 5133.48-3 [4].

КМОП микроконтроллер 1882ВЕ53У оснащен Flash ПЗУ, которое может быть загружено непосредственно в системе через последовательный SPI интерфейс и совместим по системе команд и по функциональному назначению выводов с аналогичными приборами семейства 80С51. Микроконтроллер содержит 12 Кбайт Flash ПЗУ, 2 Кбайт ЭСППЗУ, 256 байт ОЗУ, два указателя данных, 32 программируемых линии ввода-вывода, три 16-разрядных таймера/счетчика событий, универсальный асинхронный приемопередатчик (UART), программируемый сторожевой таймер, контроллер прерываний с четырьмя уровнями приоритетов и встроенный тактовый генератор. Содержимое Flash памяти программ может быть защищено от несанкционированной записи/считывания.

Дисплейный модуль по отношению к внешнему устройству является ведомым устройством, и имеет простой и удобный интерфейс для обмена данными. Управление дисплейным модулем и загрузка данных осуществляется через параллельный интерфейс, унифицированный по протоколу и физическому стыку с интерфейсом алфавитно-цифровых жидкокристаллических модулей, на основе контроллера HD44780. Физический стык реализован внутри блока согласования с внешним устройством. Для приема и передачи байтов используется шина данных DP0-DP7, и два сигнала управления RS и RW и синхросигнал Е. Сигнал управления RS, используется для определения типов данных (символ ASCII/команда), сигнал RW для определения направления передачи данных (чтение/запись), для стробирования сигналов используется сигнал Е. Формат всех команд, используемых для информационного обмена дисплейного модуля и внешнего устройства, представлен в таблице [1].

Перед началом процесса передачи данных для индикации или команды управления внешнему устройству необходимо, используя одну из комбинаций сигналов управления RS, R/W, сделать опрос флага занятости BF. Если модуль в настоящий момент не может принять входные данные, то флаг занятости равен 1. Если флаг занятости равен 0, то внешнее устройство с помощью сигналов управления RS, R/W посылает в дисплейный модуль, либо команду управления, либо символ для отображения в ASCII коде.

На первом этапе микроконтроллеру необходимо получить визуальное представление для каждого принятого символа в виде массива данных для отображения. Для этого используется встроенная таблица символов, где каждому символу ASCII кода соответствует пять байт данных точек (по одному байту на каждый столбец), которые соответствуют изображению, символа на матрице 5×7 точек.

На втором этапе микроконтроллеру необходимо из полученного массива 5×8 получить массив 5×7 , путем удаления лишнего бита, сгруппировать их в непрерывную последовательность в соответствии с размещением символов в строке и сохранить полученный результат. Для своевременного отображения данных на матричном светодиодном индикаторе микроконтроллер должен постоянно хранить все точки для отображения для каждой строки и каждого столбца, объем которых занимает 360 байт. Такое количество информации невозможно хранить во внутренней памяти микроконтроллера, поэтому необходимо использовать внешнее O3V.

Команды											Описание
	RS	R/W	DB7	DB6	DB5	DB4	DB3	DB2	DB1	DB0	
Очистить дисплей										1	Очистка дисплея и установка курсора в начало
Курсор в начало									1	*	Возврат курсора в начало.
Режим ввода								1	I/D	S	Установка движения курсора и экрана.
Вкл/выкл дисплея							1	D	С	в	 D – вкл/выкл дисплея C – курсора B – мигание символа над курсором
Сдвиг дисп/курсора						1	S/C	R/L	*	*	Перемешение экр/курсора без смены изображения
Установка адреса курсора			1	Ад	рес к	урсо	pa				Данные могут быть записаны или счита- ны только после этой команды
Чтение флага заня- тости и адреса	0	1	B F	Ад	Адрес курсора					Чтение флага занятости и адреса курсора	
Запись данных	1	0	AS	SCII код символа							Запись ASCII кода символа в ОЗУ дис- плейного модуля
Чтение данных	1	1	AS	CII к	од си	имво.	па				Чтение ASCII кода символа внешним устройством из ОЗУ дисплейного модуля

Данная реализация дисплейного модуля имеет ряд недостатков:

 необходимость использования внешнего ОЗУ,
 что приводит к усложнению и удорожанию схемы дисплейного модуля,

– необходимость загрузки новой информации для каждого столбца выбранной строки перед каждой засветкой. Суммарное значение времени загрузки и засветки является фиксированной величиной и равно 0,5 мс. Загрузка информации занимает значительное время, что в конечном итоге приводит к уменьшению времени засветки. Уменьшение времени засветки приводит к уменьшению общей яркости дисплея.

Для того чтобы уменьшить общее время загрузки информации, необходимо изменить способ загрузки информации так чтобы информация столбца для отображения загружалась сразу во все строки дисплейного модуля. Один из способов это соединение всех матричных индикаторов последовательно друг за другом и использование для загрузки стандартного интерфейса SPI. Для исследования данного способа загрузки был разработан макет дисплейного модуля. При проведении исследований было учтено, что данный тип матричных светодиодных индикаторов имеет ограничение по частоте загрузки в 5 МГц, а также замечено, что при загрузке большого количества информации происходит рассинхронизация данных на выходе сдвигового регистра и тактовых импульсов сигнала SCK интерфейса SPI. Таким образом, для уменьшения рассинхронизации необходимо уменьшать частоту загрузки данных, при этом увеличивая общее время загрузки. Поэтому данный способ загрузки был признан неэффективным.

Особенностью данной работы, является оптимизация существующей схемы дисплейного модуля аппаратной в части использование для загрузки информации шины данных микроконтроллера, а в качестве сигнала синхронизации строб записи во внешнюю память WR. Для этого к каждой информационной линии шины данных контроллера подключено необходимое количество, соединенных последовательно, матричных индикаторов. Такая реализация позволила уменьшить общее время загрузки данных, т. к. данные одновременно загружаются по восьми линиям связи для всех строк выбранного столбца. Время загрузки данных одного столбца в параллельном режиме примерно равно времени загрузки информации через интерфейс SPI для одной строки.

Оптимизировалось также и программное обеспечение. Удалось добиться того, что микроконтроллер, за время пока происходит засветка информации текущего столбца, успевает подготовить данные отображения для следующего столбца. При этом данные для отображения каждого столбца попеременно занимают общую область памяти. Так, для того чтобы хранить 80 ASCII кодов символов необходимо 70 байт для хранения точек отображения. Очевидное преимущество данного способа, это отсутствие необходимости использования внешнего ОЗУ, все данные для отображения можно полностью хранить во внутренней памяти контроллера 1882BE53У, полностью задействовав внутренние аппаратные ресурсы микроконтроллера. Таким образом, улучшаются массогабаритные показатели дисплейного модуля, уменьшается количество требуемых микросхем, удешевляется производство. Структурная схема обновленного дисплейного модуля представлена на рис. 4.



Рис. 4. Структурная схема обновленного дисплейного модуля

Таким образом, проведенная оптимизация позволила избавиться от недостатков предыдущей версии дисплейного модуля, сохранив при этом все достоинства, позволив построить модуль в виде конструктивно законченного устройства с минимальными массогабаритными характеристиками и с оптимальными электрическими и временными показателями.

Литература

1. Библиотека электронных компонентов: Журнал № 8. – М: Додека, 1999.

- 2. Перечень МОП 44 001.02-2013.
- 3. АЕЯР.432220.232 ТУ.
- 4. АЕЯР.431280.286-02 ТУ.

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДОВЕРИЯ

С. С. Яковлев, П. К. Шиверов

Самарский национальный исследовательский университет им. академ. С. П. Королева

Введение

Безопасность информационных систем тесно связана с понятием, которое мы называем доверие.

Зародилось это слово в древней Руси, как производное от слов «вера» и «вероятный». Слово «вера» означало «убежденность в чем-либо». Слово же «вероятный» было получено от древнерусского и старославянского сочетания «принять веру» и означало «позволяющий поверить или достойный доверия». Следовательно, сначала мы верим объекту: убеждаем себя в том, что он будет следовать правилам, которые мы предварительно обсудили, и только потом начинаем доверять.

Согласно словарю по социальной психологии под редакцией М. Ю. Кондратьева, доверие – это специфическое отношение субъекта к определенным объектам, связанным с ситуативной, актуальной значимостью и априорной надежностью (безопасностью) объекта для субъекта [1].

В наше время трудно представить функционирование любой компании, фирмы или системы без доверительных отношений. Если бы их не было, то заключение сделок стало бы огромным риском для обеих сторон, что в итоге привело бы к взаимному недоверию, несоблюдению правил соглашения и, следовательно, к расторжению договора.

В связи с этим разработка способа вычисления уровня доверия к объекту становится особо актуальной.

1. Информационная безопасность и доверие

Понятие доверия является одним из главных аспектов в информационной безопасности. При использовании цифровых подписей и в процедуре аутентификации необходимо быть уверенным в том, что подпись или какой-либо другой критерий, удостоверяющий личность, используется именно тем человеком, кому он принадлежит. С этой проблемой справляются Удостоверяющие Центры (УЦ), которые формируют цифровые сертификаты подчиненных центров сертификации и конечных пользователей. Инфраструктура открытых ключей(*PKI – Public Key Infrastructure*) – набор средств (технических, материальных, человеческих и т. д.), распределенных служб и компонентов, в совокупности используемых для поддержки криптографических задач на основе закрытого и открытого ключей [2].

Одним из важных компонентов инфраструктуры открытых ключей является использование криптографической системы с открытым ключом. В ее основе лежит несколько принципов: 1) удостоверяющий центр создает сертификат открытого ключа, тем самым, сертифицируя его;

2) пользователи не доверяют друг другу, но должны доверять удостоверяющему центру;

 удостоверяющий центр может или подтвердить или опровергнуть принадлежность открытого ключа данному лицу, которое соответственно владеет закрытым ключом;

4) закрытый ключ должен быть известен только его владельцу[3].

Как видно, *PKI* является системой, где главенствующую роль занимает удостоверяющий центр и пользователи общаются друг с другом непосредственно через него. Так как *PKI* является стержневым понятием в современной криптографии, поэтому нельзя оставить без внимания и понятие доверия.

2. Доверие и принципы его построения

В системах, построенных на доверии, существует риск быть обманутым субъектом, с которым объект вступил в доверительные отношения. Следовательно, чем выше вероятность передачи данных третьим лицам, тем выше риск начала отношений с данным объектом – тем меньше к ним доверия.

Далее рассмотрим ситуацию, в которой вы разговариваете с объектом по сотовому телефону, у которого шанс перехвата информации, передающейся по данному каналу связи, высок. А теперь рассмотрим другую ситуацию, в которой вы обмениваетесь данными со своим собеседником через защищенный квантовый канал связи. Какому способу передачи вы бы доверились, если информация, которой необходимо обменяться, не должна попасть в руки третьих лиц? Определенно второму. Из этого следует, что чем выше безопасность использования какого-либо канала связи, тем выше к нему доверие, как к среде распространения информации.

Так как доверие основано на нашем прошлом опыте, на том, что данный объект не дискредитировал себя ранее, то это поддерживает в нас уверенность, что он будет соответствовать нашим ожиданиям в будущем. Вследствие того, что наша система представляет из себя комплексный объект, то необходимо учитывать ситуации, которые происходили с каждым отдельным элементом системы. В связи с этим введем статистику положительных результатов запуска каждого элемента системы и обозначим это понятием преддоверия или, по-другому, репутации элемента. Из всего вышесказанного следует, что доверие можно считать совокупностью таких факторов, как риск, преддоверие и канал передачи информации. А теперь разберем более подробно каждую из этих переменных.

<u>2.1. Оценки рисков и угроз</u> в информационных системах

Риск – это сочетание потенциальной угрозы и потенциальной уязвимости.

Угроза – это совокупность условий и факторов, которые могут стать причиной нарушения целостности, доступности, конфиденциальности информации.

Уязвимость – это слабость в системе защиты, которая делает возможной реализацию угрозы.

Оценка рисков – это выявление угроз, определение вероятности реализации этих угроз и их возможных последствий.

Степень риска – это возможность наступления каких-либо последствий при реализации угрозы. Существует 3 степени риска:

 допустимая – существует невысокая вероятность проявления угрозы. По возможности необходимо предпринять действия по устранению уязвимого места, но их стоимость не должна превышать размер прибыли от реализации проекта;

 критическая – существует реальная возможность осуществления такого события, при котором ущерб может превысить размер прибыли;

 катастрофическая – уязвимость представляет собой реальную угрозу для системы, при которой возможны потеря капитала и имущества руководителя предприятия.

Количественный анализ – численное определение величин отдельных рисков и угроз для проекта в целом.

Отметим, что стоит обратить внимание на описание методов количественного анализа информационного риска в связи с их многочисленностью.

В абсолютном выражении риск может определяться величиной возможных потерь в материальновещественном (физическом) или стоимостном (денежном) выражении.

В относительном выражении риск определяется как размер возможных потерь, отнесенный к некоторой базе, в виде которой наиболее удобно принимать либо имущественное состояние предприятия, либо общие затраты ресурсов на данный вид предпринимательской деятельности, либо ожидаемый доход (прибыль). В таком случае потерями можно считать отклонение от ожидаемого результата в сторону снижения прибыли.

Предпринимательские потери – это случайное снижение предпринимательского дохода. Степень риска характеризуется размером таких потерь.

Таким образом, размер вероятных потерь можно разделить на 3 группы:

1) потери, размер которых не превышает или равен прибыли предприятия;

 потери, размер которых превышает прибыль предприятия. В таком случае предпринимателю придется выплачивать оплачивать убытки из своих собственных средств;

3) потери, размер которых превышают капитал всего предприятия и имущества предпринимателя.

Если есть возможность оценить или проанализировать возможные потери от данного мероприятия, то это означает, что получена количественная оценка риска. Если разделить абсолютную величину возможных потерь на расчетный показатель затрат или прибыли, то получим количественную оценку риска в процентном соотношении.

Риск измеряется величиной вероятных потерь, следовательно необходимо учитывать случайный характер таких потерь. Можно определить вероятность наступления таких потерь объективным и субъективным методом. Объективным методом пользуются для определения вероятности наступления события на основе исчисления частоты, с которой происходит данное событие.

В свою очередь, субъективный метод основывается на использовании субъективных критериев, основанных на предположениях: оценка экспертов, мнение оценивающего либо его личный опыт в изучении данной проблемы.

Из этого следует, что оценка финансовых рисков предприятия зависит от вероятности возникновения угрозы и размеров потерь при ее реализации. Эта зависимость находит выражение в строящейся кривой вероятностей возникновения определенного уровня потерь.

Построение кривой требует от специалистов, занимающихся анализом информационных рисков большого багажа знаний, связанных с прогнозированием угроз. Существует множество способов создания данной кривой: статистический; анализ целесообразности затрат; метод экспертных оценок; аналитический способ; метод аналогий. Среди этих способов следует выделить два важных: метод экспертных оценок и аналитический способ.

Итогом работы метода экспертных оценок является результат анализа информации, поступающей от экспертов и специалистов, в процессе анализа собирается и анализируется вероятность возникновения различных уровней потерь. Оценки специалистов и экспертов базируются на учете всех возможных факторов финансового риска и статистических данных. Одним из нюансов использования данного метода является то, что в случае небольшого количества уровня оценок, усложняется процесс реализации способа.

Самым сложным способом построения кривой является аналитический метод, так как в процессе анализа используются элементы теории игр.

Для обеспечения защиты информации в определенных информационных системах (ИС) необходимо более конкретное рассмотрение составляющих ИС, расчеты и т. д.

С целью получения результата в виде формулы оценки риска, необходимо выполнить несколько шагов:

1) ввести определения и понятия для оценки рисков в ИС;

 определить значимость угрозы информации, чтобы оценить их влияние на величину, которая определяет степень риска;

3) вывести конечную формулу, которая оценивает степень риска в системе.

Стоимость информации (*S*). Любая информация, которая представляет для компании какую-либо ценность, подразделяется на блоки, каждый из которых варьируется по степени значимости от 0 до 1. Но ни один блок не имеет значимость равную 1, максимальным является значение, стремящееся к 1.

Вероятность реализации атаки (*P*) является понятием, которое зависит от уровня безопасности системы защиты объекта и всех способов несанкционированного получения информации с данного элемента системы третьими лицами.

Чем выше ценность используемой информации на данном предприятии, тем выше вероятность атаки правонарушителей на данную систему. При получении таких данных злоумышленниками ставится под угрозу существование всей этой системы в целом. Следовательно, такая информация будет задавать цену всей системе, поэтому в формуле будем использовать S_{max}, которое будет обозначать максимальную стоимость блока информации, используемого на предприятии. И чем выше стоимость информации, используемой на предприятии, тем выше вероятность атаки на элемент, содержащий такие данные.Поэтому будем использовать в формуле величину P_{max}, которая будет обозначать максимальную атаки конкретный элемент вероятность на СЗИ(Система Защиты Информации), где значение этой вероятности будет также варьироваться от 0 до значения близкому к 1.

В экономике используется формула VaR (Value At Risk – стоимостная мера риска), которая выражается, как

$$R = L \cdot P , \qquad (1)$$

где R – это риск; L – это количество потерянных денег или жертв в результате одного нежелательного события; P – это вероятность одного нежелательного события.

Обозначим в нашей формуле за L такое потенциальное количество денежных средств, которые мы можем потерять в результате успешной атаки на нашу СЗИ (S_{max}). Вместо P будем использовать максимальную вероятность атаки(P_{max}) на определенный элемент системы.

В результате данных рассуждений получаем формулу оценки рисков ИС в виде:

$$R = S_{\max} \cdot P_{\max} \tag{2}$$

Из вышесказанного следует, что чем выше риск при использовании системы, тем выше вероятность доступа третьих лиц к хранящимся в этой системе данным, следовательно, тем меньше к ней доверия.

2.2. Оценка свойств канала связи

Следующей переменной является характеристика канала среды, в которой передается информация. У каждого канала передачи имеются свои минусы и плюсы, что сказывается на доверии к этому каналу передачи. К примеру, у сетей Ethernet существует высокий риск взлома канала, в отличие от оптоволоконных сетей передачи, в которых безопасность передачи информации выше, и, следовательно, уровень доверия к этой среде тоже.

На данный момент существует несколько типов каналов распространения информации:

1) беспроводные сети передачи данных: *Wi-Fi*, *WiMAX*, 3*G* и т. д. Слабозащищенные сети, высокая вероятность взлома, отследить перехват проблематично;

2) кабельные сети передачи данных (витая пара, коаксиальный кабель). Так же может быть совершен взлом канала передачи, но возможно зафиксировать перехват;

 оптоволоконные сети передачи данных. Перехватить информацию тяжело, зафиксировать перехват возможно [5];

4) квантовые сети передачи данных. При попытке перехвата информации канал разрушается [6].

Из всего вышесказанного введем переменную (X_i) , которая будет обозначать коэффициент безопасности передачи информации по каналам связи.

<u>2.3. Понятие преддоверия</u> в информационной системе

Предсказуемость информации – это способность исследуемого объекта при проведении исследований в конце каждого опыта выдавать позитивный результат. Технология работы *PKI* построена на предсказуемости, так как никто не знает: дойдет ли сообщение до нужного адресата, по этой причине все полагаются на удостоверяющий центр.

Неопределенность – отсутствие или недостаток информации для принятия какого-либо решения. Чем выше предсказуемость и ниже неопределенность, тем выше доверие к объекту СЗИ.

Расчет преддоверия к системе

Для примера представим способ, по которому высчитывается безотказность работы какой-либо системы. Берется статистика, в которой имеется количество успешных запусков системы (l), имеющих значение равное 1, и количество неудачных запусков (k), значение которых равно 0, и делится на общее количество запусков (m), таким образом, находится статистическая вероятность успешного запуска системы.

Используем такой же способ вычисления, что и для предыдущего примера, для нашей формулы. Рассмотрим такой способ передачи данных. A – это источник, B – это приемник и K_{AB} – это ключ. Исходя из предыдущих рассуждений, преддоверие системы будет высчитываться таким образом:

$$PD = \frac{\sum_{i=1}^{m} q_i}{m}$$
(3)

Далее необходимо посчитать преддоверие к каждому указанному ранее элементу, то есть к источнику (A), приемнику (B) и ключу (K_{AB}). Делается это по формуле указанной ранее. После этого мы суммируем значения преддоверия каждого элемента и делим на количество запусков (m), для нахождения преддоверие ко всей рассматриваемой системе. Таким образом, мы сможем высчитать коэффициент, обозначающий насколько хорошо элементы системы оправдывали наши ожидания в прошлом.

2.4. Математическая модель доверия

Из ранее сказанного следует то, что:

• во-первых, доверие (D_i) обратно пропорционально риску (R);

• во-вторых, доверие к элементу СЗИ, должно быть пропорционально преддоверию участника (*PD*), так как если элемент себя ни разу не скомпрометировал, то и доверие к нему будет высокое;

• в-третьих, доверие к участнику, который организовал обмен информации, через канал передачи данных (*X_i*), будет зависеть от коэффициента безопасности используемого канала связи, поэтому, чем выше коэффициент безопасности, тем выше доверие к среде передачи. Следовательно, доверие будет пропорционально данному коэффициенту.

В итоге математическая формула расчета доверия принимает такой вид:

$$D_i = \frac{PD \cdot X_i}{R} \tag{4}$$

Исходя из проведенной работы, можно сделать вывод, что в нынешних условиях каждый параметр формулы играет важную роль для построения математической модели доверия.

Литература

1. Социальная психология // Словарь под ред. М. Ю. Кондратьева [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.insai.ru/slovar/2160/свободный – Яз., рус. – Загл с экрана.

2. Черемушкин А. В. Криптографические протоколы: основные свойства и уязвимости [Текст] / А. В. Черемушкин // Прикладная дискретная математика. – 2009. № 2. С. 14–25.

3. Инфраструктура открытых ключей [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://infotecs.ru/ solutions/pki/свободный – Яз., рус. – Загл с экрана.

4. Способы оценки степени риска [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.askins.ru/ index.php/methods/свободный – Яз., рус. – Загл с экрана.

5. Среда и методы передачи данных в вычислительных сетях – Режим доступа: http://www.lessonstva.info/edu/telecom-loc/m1t2_2loc.html/свободный – Яз., рус. – Загл с экрана.

6. Квантовая криптография [Электронный реcypc] – Режим доступа: http://www.naturalsciences.ru/ru/article/view?id=30414/свободный – Яз., рус. – Загл с экрана.

СОДЕРЖАНИЕ

Пленарные доклады

<u>Барабин В. В.</u> , Гладцинов А. В., Занегин И. В., Калмыков А. П., Кальманов А. В., Свидинский А. В.									
Высокоскоростное взаимодействие поражающих элементов из реакционных материалов									
с металлической преградой	6								
<u>Пичугова С. В.</u> , Боровик А. И. Разработка методики и средств обучения проектированию изделий									
по новой сквозной 3D-технологии на цифровом предприятии	10								
<u>Храпунов Е. Ф.,</u> Чумаков Ю. С. О свободноконвективном теплообмене над горизонтальной									
поскостью с локализованным нагревом									
Шалтаева Ю. Р. Спектрометрия ионной подвижности для различных применений	22								

Секция 1. Теоретическая и математическая физика

<u>Андреюк Н. Н.</u> , Голубев А. И., Пятаков Н. П., Якутов Б. П. Генерация релятивистских электронов в плазменной кильватерной волне, возбужденной мощным лазерным импульсом	28
Белова А. И., Лукичев А. Н., Борисенко О. Н. Вычисление кривизны дискретных поверхностей в генераторе поверхностных триангуляционных сеток Логос.ПреПост	34
<i>Анпилогов Р. А., <u>Белугин В. А</u>., Поздяев Д. Н.</i> Расчетное исследование коэффициентов сопротивления при поперечном обтекании пучков труб с треугольной равносторонней расстановкой	41
<u>Гиниятуллина А. Г.</u> , Лазарев В. В., Мартенс Р. В. Построение сетки протягиванием 2,5D поверхностных ячеек в отдельном объеме	46
<u>Голомидов Ф. О.</u> , Никитин В. А., Панов А. И., Соколов С. С., Шурыгин А. В. Генератор замкнутой поверхностной триангуляционной сетки в комплексе программ ЛОГОС	53
<u>Кравец Н. А.</u> , Фролова Е. В. Динамика электронных волновых пакетов в топологических диэлектриках, находящихся во внешнем магнитном поле	56
<u>Кузьменко М. В.</u> , Борисенко О. Н., Смолкина Д. Н. Разрезание невыпуклых многоугольных граней и многогранных ячеек в генераторе объемных сеток методом отсечения ЛОГОС.ПреПост	61
<u>Лазарев А. А.</u> , Полищук С. Н., Тихомиров Б. П. Численное решение уравнения лучистой теплопровод- ности методом сглаженных частиц	67
<u>Лукичёв А. Н.</u> , Цалко Т. В., Панкратов Д. М., Логинов Д. В., Белова А. И., Моськина Е. О. Особенности построения триангуляционных сеток на поверхностях в аналитическом и фасеточном представлении	73
<u>Мартынова И. А.</u> , Иосилевский И. Л., Шагайда А. А. Особенности экранировки макрозарядов в комплексной плазме	79
<i>Пенягин И. В.</i> Квантовомеханические электронные состояния в полупроводниковых сверхрешетках в сильных магнитных полях	84
<u>Половникова Т. Н.</u> , Воропинов А. А. Алгоритмы динамической балансировки вычислительной нагрузки для многомерных расчетов в методике ТИМ	90
<u>Шмелёва А. К.</u> Воропинов А. А. Алгоритмы построения трёхмерных неструктурированных сеток на основе поверхностной сетки для методики ТИМ	95

Секция 2. Экспериментальная физика

Барабанова Д. С., Жердев Г. М. Библиотека погрешностей характеристик распада радионуклидов	104
<u>Беляев А. Н.</u> , Опекунов А. М., Тельнов А. В., Шориков И. В. Моделирование режимов работы системы инжекции резонансного ускорителя электронов БЕТА-8	112
Бестаев Р. Р. Автоматизация энергетической калибровки гамма детекторов в установках меченых нейтронов	118
<u>Бодров Е. В.</u> , Невмержицкий Н. В., Сотсков Е. А., Сеньковский Е. Д., Левкина Е. В., Кривонос О. Л., Кучкарева А. С., Анисифоров К. В., Фролов С. В. Измерительно-вычислительный комплекс	
для исследования микроструктуры турбулентных течений	124
Агапов А. А., <u>Валекжанина Е. И.</u> , Городнов А. А., Завьялов Н. В., Картанов С. А., Михайлюков К. Л., Таценко М. В. О возможности измерения сечений взаимодействия высокоэнергетичных протонов с веществом методом протонной радиографии	130
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----
<u>Васильев А. М.</u> , Юрлов А. В., Пушков В. А., Найданова Т. Г., Цибиков А. Н. Реакция ВВ на основе октогена и ТАТБ на динамическое нагружение методом составного стержня Гопкинсона	134
<u>Веденеев Н. Н.</u> , Грачева Д. В., Киселев Ф. К., Корочкин М. А., Кротова О. С., Миронов М. С. Система поддержания и контроля температуры для проведения радиационных исследований и испытаний	141
<u>Газизова Э. А.</u> , Бурцев А. В., Великанов С. Д., Порубов Р. В., Щуров В. В. Исследование энергетических и временных параметров спектральных составляющих лазерного излучения электроразрядного HF/DF-лазера	148
<u>Глухова О. В.</u> , Баркин В. В., Краюхина К. Ю., Лобкаева Е. П. Нормализующее действие низкочастотного импульсного магнитного поля на вегетативную нервную систему крыс	153
<u>Глушков М. С.</u> , Соломатин И. И., Виноградов А. В., Андраманов А. В., Бакайкин Д. В. Позиционирование источника излучения для настройки мишени в транспортном пространственном фильтре	159
<i>Денежко М. А.</i> Расчетное обоснование возможности измерения температуры ударно-сжатых конден- сированных сред методом нейтронной резонансной доплеровской спектроскопии с использованием импульсного нейтронного источника на основе плазменной нейтронной камеры (ПНК-13)	165
Головкин С. Ю., Деркач В. Н., <u>Добикова В. Ю.</u> , Лащук В. О., Сизмин Д. В., Щеников В. А. Прецизион- ные измерения коэффициентов отражения покрытий оптических деталей	172
<u>Доброцветов Д. М.</u> , Мунтян А. Н., Петров С. И., Н. М. Романова, Таран С. С. Методика регистрации динамики генерации рентгеновского излучения в мишени «газовый мешок»	176
<u>Ерофеев А. Н.</u> , Климушкин К. Н., Ситникова Н. И., Торопов К. С. Газодинамическая отработка модуля дискового ВМГ среднего класса	180
Белов И. А., Деркач В. Н., Деркач И. Н., <u>Жуков Р. В.</u> , Зималин Б. Г., Кудряшев О. М., Рукавишни- ков Н. Н. Расчетно-экспериментальные исследования разрушения элементов конструкции финально- го оптического модуля под действием импульсного лазерного излучения	186
<u>Каторов А. С.,</u> Ревазов В. О., Селезнев В. П. Зондовые исследования лазерной плазмы в вакууме	191
<u>Кандурина Т. С.</u> , Голубев А. В., Синельникова И. А., Девяткова Н. С. Комплексная оценка воздействия низкочастотного импульсного магнитного поля на психофизиологическое состояние	195
<i>Дубинов А. Е., <u>Кожаева Ю. П.</u>, Львов И. Л., Садовой С. А., Селемир В. Д., Вялых Д. В.</i> Быстрая кристаллизация сахаров в пчелином меде под действием наносекундных микроразрядов	198
Козлов Г. А. Определение комплексной диэлектрической проницаемости воды с помощью радиоин- терферометра РИ-03/3 в КВЧ диапазоне	201
<u>Костюнин Р. Ю.</u> , Борщевский А. В., Жуков Р. В., Корниенко Д. С., Салатов Е. А. Фемтосекундный канал установки «Луч» для проведения исследований мишеней по облучению при интенсивности излучения ~10 ²⁰ Вт/см ²	205
<u>Кучкарева А. С.</u> , Невмержицкий Н. В., Сотсков Е. А., Сеньковский Е. Д., Левкина Е. В., Кривонос О. Л. Влияние амплитуды начальных возмущений контактной границы газов на переход неустойчивости Рихтмайера – Мешкова в турбулентную стадию	214
<u>Лопаткин А. А.</u> , Занегин И. В., Барабин В. В., Малышев А. Н., Скоков В. И., Кальманов А. В., Игнатова О. Н. Пороховая нагружающая установка для исследования динамических прочностных свойств конструкционных материалов	220
<u>Марунин П. В.</u> , Родигин А. В. Модернизация электронного блока нейтронного детектора для порта- тивной аппаратуры радиационного контроля	224
<u>Опекунов А. М.</u> , Беляев А. Н., Кузнецов В. В., Курапов Н. Н., Поляков Л. Е., Поспелов Г. П., Сметанин М. Л., Тельнов А. В., Хромяк М. И., Шаравин Э. А., Шеин А. Н., Шориков И. В. Система инжекции резонансного ускорителя электронов БЕТА-8. Расчеты и эксперимент	229
Подкопаев А. В. Экспериментальные исследования люминесцентных характеристик эксимерной молекулы XeBr для газовой смеси Ar-Xe-CF ₃ CHClBr	236
<u>Поляков Л. Е.</u> , Курапов Н. Н., Опекунов А. М., Тельнов А. В., Шаравин Э. А., Шеин А. Н., Шориков И. В., Юрьев И. А. Разработка системы диагностики положения пучка для резонансного ускорителя электронов БЕТА-8	240

<u>Салтыков Е. В.</u> , Манешкин А. А., Чуваткин Р. С., Харитонов С. В., Цыкин В. С., Захряпа А. В. Зави- симость спектральных и энергетических характеристик излучения Fe ²⁺ :ZnSe-лазера с накачкой DF-лазером от температуры активного элемента	245
<u>Сафронова Е. С.</u> , Дормидонов А. Е. Эффективная диодная накачка лазерного квантрона в широком температурном диапазоне	250
<u>Селезнев А. А.</u> , Эльяш С. Л., Юрьев А. Л. Расчет индуктивности элементов сложной формы, используемых в конструкции субнаносекундного ускорителя электронов	253
<u>Спирин И. А.</u> , Седов А. А., Шалыгин А. А., Шевлягин О. В., Князев В. Н., Пронин Д. А. Исследование возбуждения взрывчатых веществ расходящейся ударной волной	258
<u>Султанова А. А.</u> , Верещагин А. А., Гаганов В. Е. Разработка алгоритма автоматической юстировки одного канала установки «Искра-5»	265
<u>Тетеревков А.В.</u> , Панченко А. Н., Пикарь В. А. Программно-аппаратная измерительная система для исследования радиационной стойкости сложнофункциональных микросхем	268
<u>Тимонин И. В.</u> , Зубков А. В., Коваленко В. П. Исследование влияния параметров изучения йодного лазера «Искра-5» на эффективность преобразования в третью гармонику	272
<u>Утенков А. А.,</u> Антипов М. В., Блинов А. В., Михайлов А. Л., Огородников В. А., Юртов И. В. Взрывной пьезогенератор с энергией 50 Дж для автономных источников энергии	277
<u>Цветков А. В.</u> , Богданов Е. Н., Шаврин М. Е., Буренин В. И., Родионов А. В., Козлов Г. А., Рычагов Е. В. Экспериментальное исследование ударно-волновой сжимаемости АБС 20/20 с применением методик минганинового датчика давления и микроволновой диагностики в диапазоне давления 8–40 Гпа	282
<u>Шеин А. Н.</u> , Тельнов А. В., Сметанин М. Л., Поляков Л. Е. Расчетная электродинамическая модель датчика частотной обратной связи ВЧ генератора ускорителя БЕТА-8	287
<u>Юрьев И. А.</u> , Поляков Л. Е., Курапов Н. Н., Опекунов А. М., Тельнов А. В., Шаравин Э. А., Шеин А. Н., Шориков И. В. Разработка магнитного корректора для системы диагностики положения пучка резонансного ускорителя электронов БЕТА-8	292

Секция 3. Инженерные науки

Аккуратов А. И. Поворотное приспособление для сварки с системой управления	298
<u>Антонов Д. Ф.</u> , Шишканов А. Ф., Шрамко С. А., Хохлов П. В. Разработка бортовых широкополосных антенн	303
<u>Власенко Е. А.</u> , Никиенко А. В. Влияние алгоритмов работы радиационных портальных мониторов ядерных материалов на надежность их функционирования	306
<u>Глазкова А. В.</u> , Филимонова Н. П. Разработка автоматизированного комплекса контроля параметров активированного состояния химических источников тока	310
<i>Дубровский Д. А., Клячкин А. В., <u>Глыбченко А. А.</u> Особенности изготовления крышки реакторной установки РИТМ-200 для атомного ледокола «Арктика»</i>	313
<u>Девина И. В.</u> , Вертей С. В., Мигачев М. И. Разработка волноводной антенны	316
<u>Дорохов С. П.</u> , Салов А. С. Влияние анизотропии кристалла LiNbO ₃ на расходимость ПАВ, обусловленную допусками технологической оснастки	319
Кузнецов А. А., Бережко П. Г., Кунавин С. М., <u>Жилкин Е. В.</u> , Царев М. В., Ярошенко В. В., Мокрушин В. В., Юнчина О. Ю., Митяшин С. А. Исследование процессов, протекающих при гидрировании металлического титана, методом акустической эмиссии	323
Жмуровский А. В. Оценка эффективности и размеров блока сверхпроницаемых мембран на основе ванадия с плазменной диссоциацией изотопов водорода в установках типа ДЕМО-ТИН и ITER	327
Лопа И. В., <u>Жукаев А. И.</u> Влияние скорости движения шибера на перепад давления на затворе трубопровода	332
Лопа И. В., <u>Жукаев А. И.</u> Гидравлический расчет шиберной задвижки	335
Зеленкина Н. В. Лабораторный метод изучения воздействия подводной ударной волны (ПУВ) на подводный аппарат	337
<u>Карпов М. А.</u> , Копылов Л. А. Внедрение и расширение системы мониторинга серверной инфраструктуры на основе инструментов Nagios и Ganglia	343

Козлов Е. А. Исследование возможности повышения степени интеграции и снижения массогабаритных характеристик СПП за счет применения многоуровневых сборок	34
<u>Копченов М. Н.</u> , Кручинин В. А., Одзерихо И. А. Изготовление детали «Кронштейн» с использованием сквозной технологии 3D-проектирования, расчетов, испытаний, производства	35
<u>Куликов Д. А.</u> , Патрушева А. И., Гантман М. Ю., Шмелев Е. И. Численный анализ вибраций конструкции, вызванных гидродинамическими источниками	35
<u>Левцова В. А.,</u> Кошкин В. В., Овсов А. В., Смирнов М. К. Использование оптронов в радиационно- стойкой электронной аппаратуре	36
<u>Лехнер Г. А.</u> , Кузякин Г. М., Викулов Ю. Н. Программно-аппаратное решение программатора микроконтроллера в серии 1986ВЕ9х компании «Миландр»	36
<u>Малых Ю. В.</u> , Шубин В. В. Разработка и исследование устройства вывода и сбора излучения с боковой поверхности оптического волокна	36
<u>Маслов М. Г.</u> , Гантман М. Ю., Патрушев Д. Н., Шмелев Е. И. Определение причин виброактивности оборудования по результатам совместного анализа внешнего вибрационного и внутреннего акустических полей	37
<u>Ошкин И. В.</u> , Профе В. Б., Троцюк К. В., Гузов А. И., Рыбкин А. Е. Исследование непрерывных широкополосных сигналов в режиме импульсного питания приборов СВЧ	38
<u>Поздняков К. А.</u> , Белеевский А. В., Клюкин К. В., Никурадзе З. Ш., Перцев А. А., Стрельцов О. А., Юдин М. В. Экологическая безопасность технологии микросферического топлива	38
<i>Леванов Л. В.</i> , <u><i>Радостин А. Ф., Кузин В. Е.</i> Анализ влияния искривлений TBC на нейтронно- физические характеристики активной зоны PWR с использованием кода CASMOS-SIMULATES</u>	39
<i>Рыбкин Е. А.</i> Создание типовой КД для снижения трудоемкости протекания процесса ТПП по специальному режущему инструменту	39
<i>Силаева И. И.</i> Оптимизация температурного профиля конвекционного метода оплавления припоя <i>Синицын Д. С.</i> Особенности контроля вибросостояния основного роторного оборудования энергоблока АЭС	39 40
<u>Сметанина Ю. Г.</u> , Иванов А. В., Куфтин А. А., Калмыков С. А. Проблемы создания систем активной виброзащиты малогабаритной бортовой аппаратуры	40
<u>Федотов Н. В.</u> , Садчикова В. А., Никифоров Е. А., Егоров И. А., Белугин А. В., Романов А. В. Обеспечение теплового режима автономного источника питания	41
<i>Прудкой Н. А., Куприянов И. А., <u>Чиркова Л. И.</u> Методика и результаты исследования экранных свойств экранирующих оболочек</i>	41
<u>Шаплыгин Е. П.</u> , Агафонцев А. С., Мунин А. В. Оптимизация производственного процесса изготовле- ния химических источников тока	42
<u>Шатунов В. Е.,</u> Белова Ю. С., Моисеева Е. П., Штыров М. В., Тарасов А. А. Исследование влияния состава влагозащитного полиэтиленового покрытия на его эксплуатационные свойства	42
<u>Шацких С. Н.</u> , Лазарева О. Л., Попова Е. И. Влияние моноглицидиловых эфиров на свойства высоконаполненного эпоксидно-ферритового компаунда	43
<i>Туркин В. Н., <u>Шубин А. С.</u></i> Устройство цифровой регистрации излучения для замены фотопленки в фотохронографе типа СФР	43
Постников А. Ю., Царев М. В., Мокрушин В. В., <u>Юнчина О. Ю.</u> , Коршунов К. В. Исследование структуры, химического и электропроводящих свойств образцов карбида бора	44

Секция 4. Информационные системы и технологии

Байкова Т. В., Ларин Д. М., Емельянов А. В., Митенов А. А., Стеньгач А. А. Разработка программного	
обеспечения SCADA «Лабораторные системы» для решений по автоматизации программно-	
технических комплексов уровня экспериментальной установки	446
Борисова Е. И. Офицерова Т. Н. Занькова О. Н. Практика реализации произволственного	
планирования в рамках внедрения системы управления производством ТИС	453
<u>Боркивец Д. Е.,</u> Егоров А. И., Кузякин А. Г. Функциональное моделирование цифровых схем	450
с помощью программ тестирования на языке C++	459

<u>Евстифеев А. А.</u> , Ерошев В. И., Казаков А. А., Николаев Д. Б. Особенности механизма генерации побочного электромагнитного излучения, создаваемого техническими средствами	463
<u>Землянухин К. Ю.</u> , Безусяк А. Ю. Архитектура систем управления полным жизненным циклом изделий. Общие положения	467
Анисимов Ю. А., Головин И. А., <u>Клевнов Ю. В.</u> , Овсов А. В., Рыкин А. В., Сергеев Д. В., Царев М. А. Опыт использования технологии аэрозольной печати при нанесении проводящего рисунка на трехмерное основание из металла	471
Басалов В. Г., <u>Козлов Д. О</u> . Применение пакета BOOKSIM для моделирования топологий вычислительных сетей	475
<u>Комиссаров А. В.</u> , Лаптев М. В., Цыганков Б. В., Тагинцев М. Ю., Козлов Д. А. Библиотека ЭРИ для систем автоматизированного проектирования электронных приборов	478
<u>Латыпов Т. И.</u> , Ведерников В. Л., Биктимиров З. Н., Хлестков С. М. Аппаратно-программный комплекс прототипирования полузаказных БИС	482
<u>Лашманова М. Г.</u> , Аверина Н. С., Баканова Т. Ю., Косарева А. С., Савиных Е. А., Серова Т. Н. Технология тестирования комплекса программ «ЛОГОС»	488
<u>Лыкина О. А.</u> , Хохлов А. В., Старовойтов С. Н., Донцова А. В. Создание единого информационного пространства в части коммуникаций	494
Авдеев М. П., Дыдыкин С. В., <u>Малых Ю. А.</u> , Попов В. С. Оптимизация параметров работы контроллера PCI Express адаптерного блока системы межпроцессорных обменов СМПО – 10GA-AD	497
<u>Мартынова А. Н., Клюшев А. В., Юдачев А. Н.</u> Технология создания интерактивных моделей пульто- вой аппаратуры для использования в учебно-тренировочных целях	500
Никитин А. А. Реализация сверточных кодов на базе ПЛИС	503
<u>Селюндяев И. В.</u> , Печенкин Е. Д. Перспективы развития сквозной технологии 3D-проектирования (СТ 3D)	508
Симонов А. В. Опыт разработки и внедрения системы управления основными средствами предприятия	512
Максимов О. И., Фильцов С.Е., <u>Сироткин Д. А.</u> , Уразов А. В., Клинков Д. А., Валеев Р. М. Программа расчета размерных цепей в САПР КОМПАС-3D	517
<u>Сплюхин Д. В.</u> , Мартынов А. А., Николаев Д. Б. Исследование математических характеристик массивов данных для повышения качества маскирования информации	521
Липатов А. Н., Сюлаев В. А. Интерфейс пользователя подсистемы «Моделирование СА»	524
Швед Н. О., Орешин А. А. Перспективы создания интегрированной информационно-справочной системы ЯОК по нормативной документации на базе информационно-справочной системы ЯОК «Техэксперт»	527
<i>Юдачев А. Н.</i> Оптимизация программно-аппаратных решений для построения дисплейных модулей на основе матричных светодиодных индикаторов	531
<u>Яковлев С. С.,</u> Шиверов П. К. Разработка математической модели доверия	536

Научное издание

Молодежь в науке

Сборник докладов пятнадцатой научно-технической конференции (25–27 октября 2016 г.)

Компьютерная подготовка оригинала-макета: Череменова Е. В., Моисеева Е. В.

Печатается с оригинальных текстов авторов

Подписано в печать 7.08.2017 Формат 60×84/8 Печать офсетная Усл. печ. л. ~ 65,6 Уч.-изд. л. ~ 78,0 Тираж 150 экз. Зак. тип. 1367-2017

Отпечатано в ИПЦ ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»

607188, г. Саров Нижегородской обл., ул. Силкина, 23