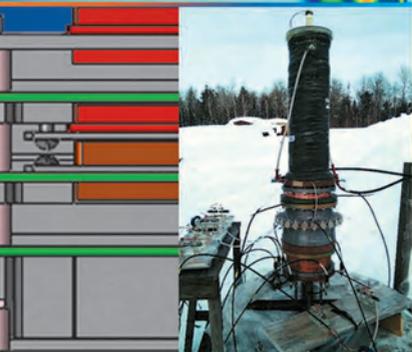


ОСНОВНЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ

РФЯЦ-ВНИИЭФ

2018



У-кванты

ИЗДАТЕЛЬСКО-ПОЛИГРАФИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС РЯЦ-ВНИИЭФ

www.vniief.ru

ИПЦ готов выполнить для вас полный цикл полиграфических работ – от предоставления клиентам оригинальных идей до изготовления тиража. Новая технологическая линия полноцветной печати позволяет продукции ИПЦ быть конкурентоспособной на российском рынке многокрасочной печатной продукции.

Продукция ИПЦ – научно-технические сборники трудов ученых Ядерного центра, материалы конференций, совещаний, научно-популярные журналы, книги, справочники, учебники для вузов, рекламные буклеты, календари, бланки, визитки, листовая продукция.

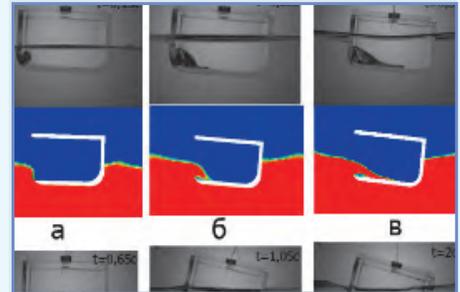
Заказать нашу продукцию можно:

- по телефону 8(83130) 7-75-96 или 7-75-84
- по электронной почте kul@otd68.vniief.ru

СОДЕРЖАНИЕ

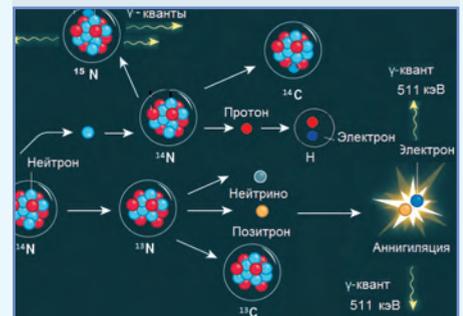
2

ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ (ИТМФ)



19

ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ (ИЛФИ)



24

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЗРЫВА (ИФВ)



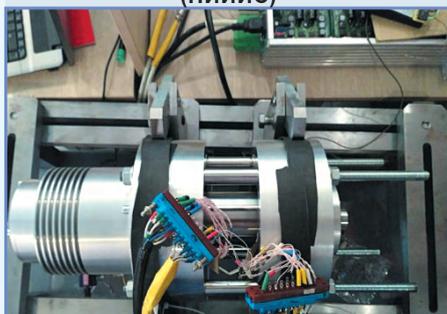
35 ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ
И РАДИАЦИОННОЙ ФИЗИКИ (ИЯРФ)



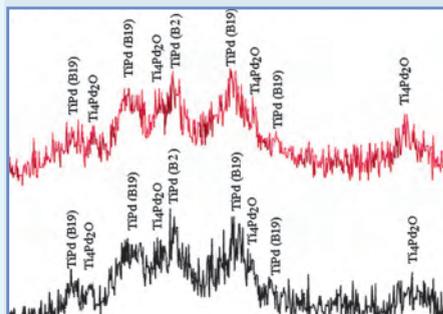
50 НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ
ЦЕНТР ФИЗИКИ (НПЦФ)



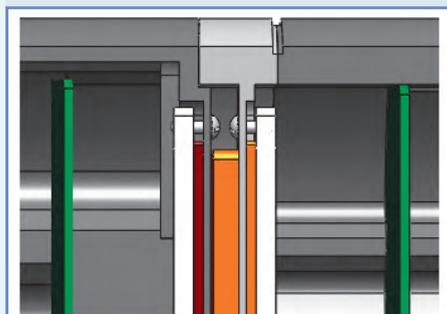
39 НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ
СИСТЕМ им. Ю. Е. Седакова
(НИИС)



51 ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ
ОТДЕЛЕНИЕ



43 КОНСТРУКТОРСКИЕ
БЮРО



РЕДКОЛЛЕГИЯ ВЫПУСКА

*д-р физ.-мат. наук В. П. Соловьев
академик РАН Р. И. Илькаев
академик РАН В. П. Незнамов
канд. физ.-мат. наук В. В. Хижняков
академик РАН С. Г. Гаранин
д-р физ.-мат. наук Н. В. Завьялов
д-р физ.-мат. наук А. В. Ивановский
Е. В. Куличкова
д-р техн. наук А. Л. Михайлов
д-р физ.-мат. наук В. А. Разуваев
чл.-корр. РАН В. Д. Селемир
д-р физ.-мат. наук Р. М. Шагалев*

РЕДАКТОР *Н. Ю. Зимакова*

**КОМПЬЮТЕРНАЯ ПОДГОТОВКА
ОРИГИНАЛА-МАКЕТА** *Е. Л. Соседко*

ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ (ИТМФ)

Основное направление деятельности теоретических и математического подразделений ИТМФ – создание современной расчетно-теоретической базы моделирования сложных физических процессов прежде всего в задачах механики сплошных сред и физики высоких плотностей энергий, а также задачах по основной тематике деятельности РФЯЦ-ВНИИЭФ.

В 2018 г. усилия специалистов математического отделения были сосредоточены на разработке, создании и совершенствовании математических методик и программных комплексов для эффективного компьютерного моделирования задач в многомерной постановке на вычислительных системах нового поколения, развитии технологий высокопроизводительных вычислений и их внедрении в практику научных исследований и высокотехнологичные отрасли российской промышленности.

МЕТОДИЧЕСКИЕ РАБОТЫ

В 2018 г. специалисты математического отделения выполнили ряд методических работ в рамках совершенствования физико-математических моделей и внедрения их в комплексы программ, созданных в РФЯЦ-ВНИИЭФ, а также работ, связанных с развитием суперкомпьютерной инфраструктуры.

В последнее время среди численных алгоритмов для описания двумерных газодинамических процессов большой популярностью пользуются так называемые бессточные методы. К подобным методам относится, в частности, метод сглаженных частиц

Smooth Particle Hydrodynamics (SPH), основанный на свободно-лагранжевом подходе, согласно которому элементы среды представляются как «размазанные» по пространству области вещества, центры масс которых двигаются по законам динамики сплошной среды. Использование модели частиц позволяет в безавтоматическом режиме численно моделировать течение жидкости и газа с сильными деформациями и большими относительными перемещениями при столкновениях поверхностей раздела веществ.

В математическом отделении ИТМФ активно ведутся работы по созданию и развитию комплексов программ на базе методов сглаженных частиц. В рамках этих работ в 2018 г. была исследована возможность использования метода SPH при расчете процесса переноса энергии излучением, протекающим при тяжёлоионном инерциальном термоядерном синтезе. Исследование проводилось для системы, в которой длина свободного

пробега фотонов много меньше ее характерного размера. Хорошим приближением для этого случая служит модель лучистой теплопроводности. В ходе исследования была разработана и реализована численная методика расчета уравнения лучистой теплопроводности как в двумерной плоской, так и в осесимметричной постановках. Методика апробирована на примере решения задач о распространении тепла в однородных и слоистых системах. Получено хорошее согласие численных и известных аналитических решений.

В ходе исследования также была показана сходимость решения по числу частиц и установлено, что хаотичное расположение частиц не оказывает существенного влияния на точность численного решения. Это позволяет в дальнейшем использовать разработанную и реализованную численную методику в расчетах лучистой теплопроводности в однородных и слоистых системах совместно с процессами газовой динамики.



Распределение температуры, полученное в результате расчета слоистой системы по реализованной численной методике:

● – аналитическое решение, сплошная линия – численное решение

Необходимость точного предсказания поведения взрывчатых веществ (ВВ) при различных воздействиях делает чрезвычайно актуальной задачу численного моделирования процессов инициирования, распространения и затухания детонации. Для ее решения используют различные модели кинетики детонации, и в частности модель Морозова – Карпенко, разработанную в РФЯЦ-ВНИИЭФ.

Численные исследования, выполненные в 2018 г., показали, что классический метод SPH может применяться для моделирования процесса детонации ВВ как с контролем скорости детонационной волны, так и с кинетикой по модели Морозова – Карпенко. Примером служит расчет глубины преддетонационного участка в исследуемом ВВ при заданном давлении на границе ВВ в плоской инициирующей ударной волне прямоугольного профиля. График зависимости глубины возбуждения детонации от нагружающего давления (диаграмма Пополато) – это результат серии расчетов по методу SPH, в которых инициирование ВВ на основе ТАТБ осуществлялось нагружением ударной волной через экраны из алюминия. Видно хорошее согласие расчетных результатов с экспериментальными данными.

Специалисты математического отделения ИТМФ продолжили работу по совершенствованию методов типа Годунова применительно к расчетам двумерных и трехмерных задач на гладких структурированных сетках. Большое внимание уделялось решению проблемы карбункул-неустойчивости – одной из основных проблем современных методов сквозного счета.

Еще в 2015 г. специалистами ИТМФ был предложен

новый подход к ее решению. Суть подхода заключалась в следующем: на фронте ударной волны в базовый метод решения уравнений Эйлера добавляется некоторое количество диссипации в форме правых частей уравнений Навье – Стокса, но с заменой коэффициента молекулярной вязкости на коэффициент искусственной вязкости. Такой подход (метод искусственной вязкости) является внешним по отношению к конкретной схеме и не меняет алгоритм расчета невязких потоков. В последующие годы он был успешно опробован и протестирован на схемах первого порядка точности. В 2018 г. метод искусственной вязкости был адаптирован к схемам типа Годунова повышенной точности. Для исследования проблемы было выбрано несколько реализаций хорошо известных схем. Они включали в себя алгоритмы реконструкции данных по пространству, применяемые в схемах типа MUSCL и WENO, а также алгоритмы интегрирования по времени, такие как методы Рунге – Кутты и процедура *предиктор – корректор* схемы Годунова – Колгана – Родионова (ГКР).

Многочисленные расчеты задач типа задачи Кёрка позволили протестировать и настроить новый метод на отобранных схемах. В результате

для схем повышенного порядка точности был подобран базовый коэффициент в модели искусственной вязкости и сформулированы несколько рекомендаций для решения проблемы карбункул-неустойчивости и существенного снижения уровня осцилляций за фронтом ударной волны.

На примере расчета задачи о двойном маховском отражении по схеме ГКР (второго порядка аппроксимации) в базовом варианте хорошо заметно ухудшающееся качество данных (показано стрелками). Вариант с добавлением искусственной вязкости демонстрирует подавление всех паразитных возмущений.

В методике ТИМ разработан подход к построению трехмерной неструктурированной сетки на основе диаграммы Вороного со специальной расстановкой центров вблизи исходной поверхностной сетки с последующим удалением внешнего слоя ячеек. Специальная расстановка центров позволяет строить сетки в невыпуклых областях, в том числе и полученных в расчетах.

В алгоритме построения сетки выделяются следующие этапы:

- анализ и улучшение качества исходной поверхностной сетки путем дробления боль-

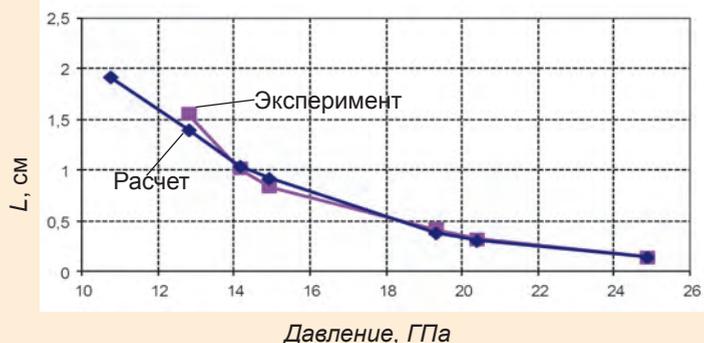
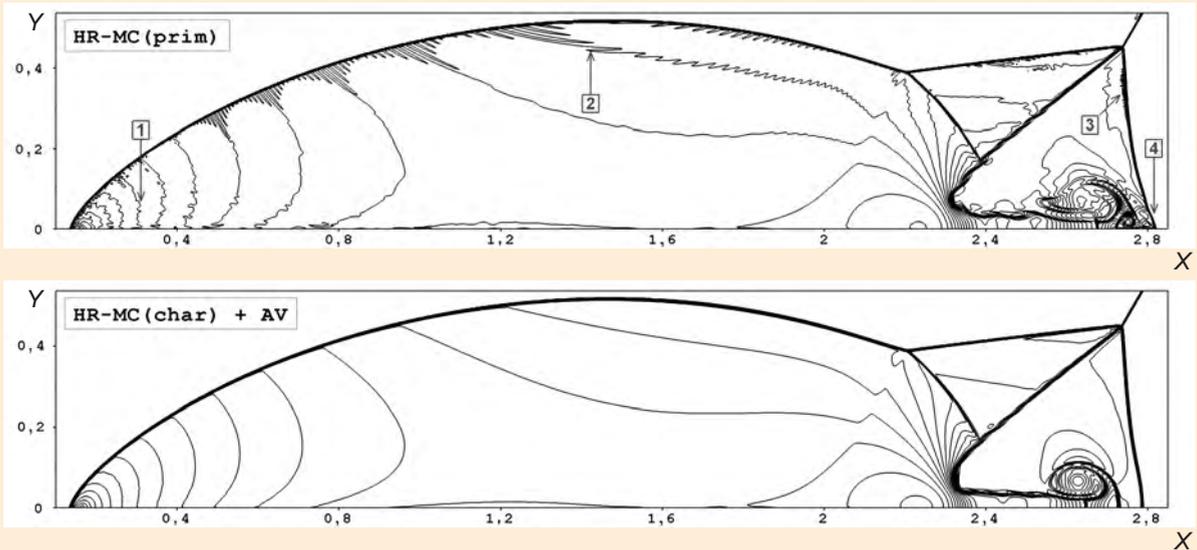


Диаграмма Пополато для ВВ на основе ТАТБ с начальной плотностью 1,91, полученная в расчете по методу SPH



Задача о двойном маховом отражении: а – данные, полученные по схеме ГКР; б – то же с добавлением искусственной вязкости

ших и вытянутых граней и триангуляции неплоских граней;

– расстановка центров ячеек с учетом поверхностной сетки. Для качественного описания границы области центры расставляются парами на одинаковом расстоянии от центров граней поверхностной сетки вдоль направлений внешней и внутренней нормалей. Для построения сетки внутри области построения дополнительные центры расставляются таким образом, чтобы избежать влияния на построение сетки у границы. На данном этапе обрабатываются особенности начальной геометрии (например, «щели» – изломы исходной поверхностной сетки, образующие узкие пустоты);

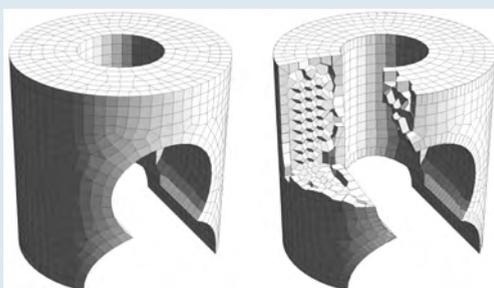
– по набору основных и дополнительных центров строится сетка на основе диаграммы Вороного в габаритном параллелепипеде. При построении не допускается появление малых и вырожденных граней и ребер. На данном этапе особым образом обрабатываются ячейки вблизи изломов исходной поверхности, в том числе у «щелей»;

– удаление внешнего слоя ячеек;

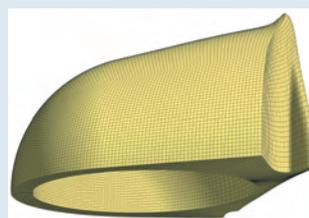
– устранение ступенчатости – дефекта сетки в виде чередования относительно крупных и мелких граней на поверхности с углом между векторами нормалей, близким к 90° , путем коррекции границы сетки с помощью транс-

формации малых граней в узел, ребро или совокупность ребер в зависимости от формы грани.

Дальнейшее развитие получила методика С-007, предназначенная для решения методом Монте-Карло линейных задач переноса нейтронов, гамма-квантов и заряженных частиц. В методике особое внимание уделяется способам описания геометрии, и в 2018 г. поступило предложение использовать для описания геометрии задачи принцип конструктора: сначала геометрия задачи разбивается на самостоятельные фрагменты, называемые блоками, а затем из них формируется требуемая



а



б

Пример сетки диаграммы Вороного для поршня (а) и в деформированной области (б)

конфигурация. Такой подход имеет ряд достоинств: блок, входящий в геометрию многократно, описывается только один раз; для блока, обладающего определенной симметрией, используется упрощенный способ описания; для моделирования траекторий частиц в пределах такого блока применяется ускоренный алгоритм.

Конструирование конечной геометрии задачи осуществляется путем процедуры вложения блоков друг в друга (при необходимости произвольное число раз). Исходный блок – пустое пространство (0-й уровень вложенности), где размещаются блоки 1-го уровня, в которых, в свою очередь, могут размещаться блоки 2-го уровня и т. д. Такой способ задания особенно подходит для задач, геометрия которых содержит много одинаковых структурных фрагментов (например, тепловыделяющие сборки в активной зоне реактора).

На схеме, демонстрирующей геометрию, полученную из трех различных блоков, в варианте *а* квадрат изображает блок 1 (внутренняя структура блоков для данного примера не важна), круг – блок 2, треугольник – блок 3. В варианте *б* представлен результат вложения двух экземпляров блока 3 в блок 2, причем каждое вложение имеет свою ориентацию. Наконец, вариант *в* показывает геометрию после

двукратного вложения блока 2 в блок 1. Отметим, что оба экземпляра блока 2 содержат всё, что в него было вложено.

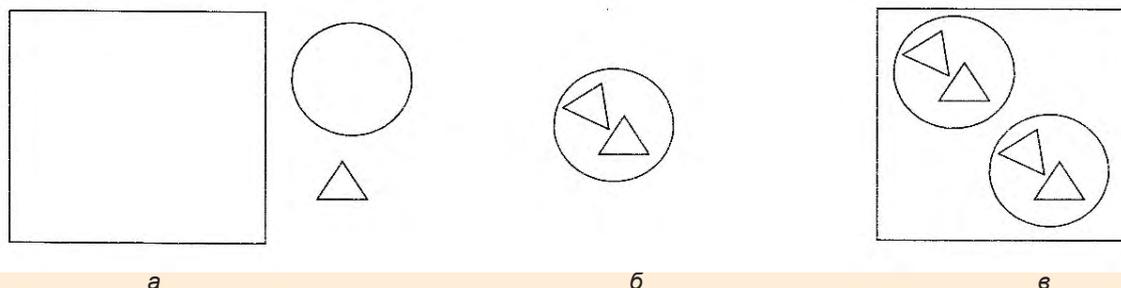
Когда фрагмент геометрии задачи обладает определенной симметрией (осевой, сферической), то для его описания используют соответствующий тип блока: плоский, где поверхности – это набор параллельных плоскостей, а области – слои между плоскостями; сферический, где поверхность – концентрические сферы, а области – сферические слои между ними; осесимметричный, где поверхность и области – это поверхности вращения и тела вращения вокруг некоторой оси; цилиндрический, где поверхности – прямые цилиндры. Как отмечалось выше, для обладающих симметрией блоков применяется упрощенный способ описания, а для моделирования траекторий частиц в пределах такого блока – ускоренный алгоритм. Но есть тип блока, который не обладает никаким видом пространственной симметрии, – трехмерный. В этом случае описание геометрии и алгоритмы вычислений траектории частиц, естественно, более сложные. Тем не менее способ задания геометрии в методике С-007 неплохо зарекомендовал себя на практике. Его достоинства отчетливо проявляются при расчетах серии задач, геометрия которых отличается расположением какого-либо фрагмен-

та, описанного в виде блока. В таком случае изменения в исходных данных задач будут минимальными.

Интересен результат проведенной в 2018 г. специалистами математического отделения работы по модификации полуэмпирической модели уравнений состояния РОСА-МИ, в соотношениях которой учитываются общие закономерности, характерные для веществ, имеющих несколько изотопных составов и существующих в нескольких структурных формах.

С помощью модифицированной модели, экспериментальных и расчетных данных, описывающих термодинамические свойства веществ, были разработаны уравнения состояния, характеризующие термодинамические свойства изотопных модификаций бора и различных полиморфных модификаций диоксида кремния (SiO_2): стишовита, козсита, кварца и плавленого кварца. Уравнения состояния описывают как область сравнительно невысоких давлений и температур, доступную для экспериментальных исследований, так и область сверхвысоких давлений и температур, в настоящее время доступную только для расчетов по теоретическим моделям.

В 2018 г. в математическом отделении продолжались исследования по поиску методов интегрирования уравнений га-

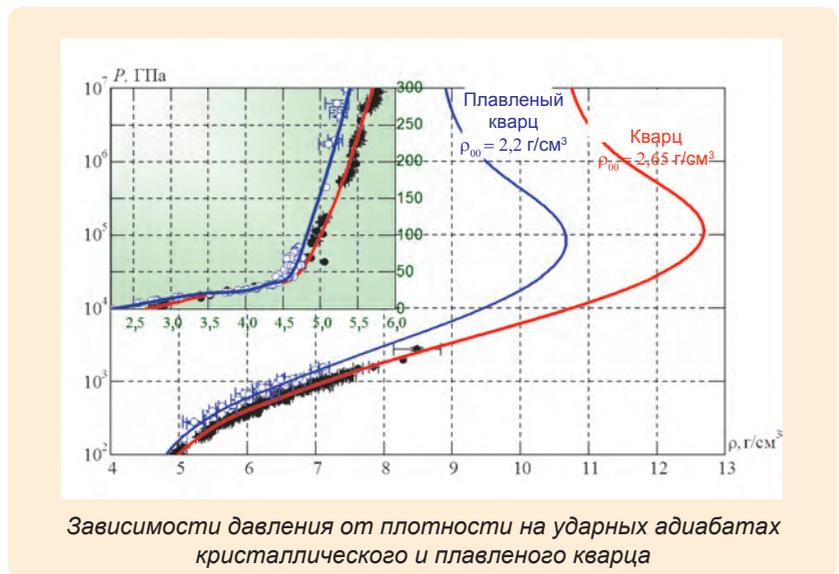
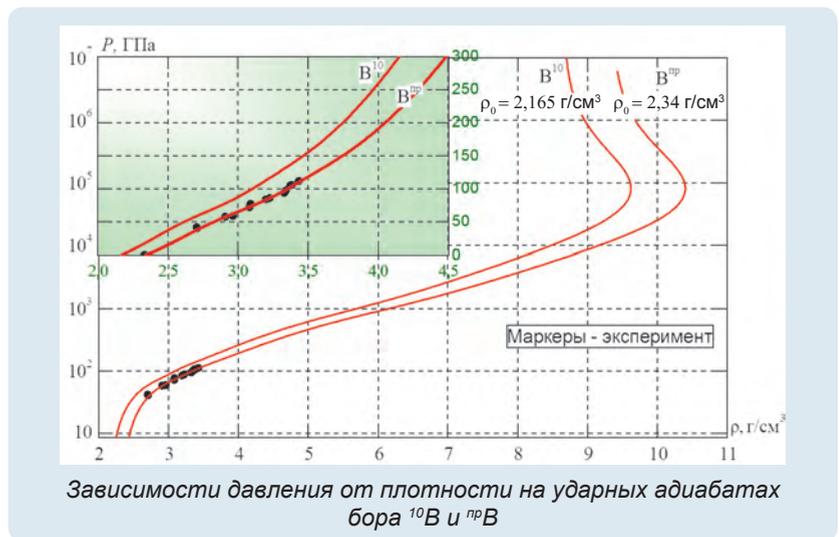


Схематическое изображение трех различных блоков для описания геометрии задачи

зовой динамики и гидромеханики. Актуальность исследований обусловлена необходимостью разработки новых эффективных аналитических и численно-аналитических методов решения краевых задач для уравнений математической физики. В связи с этим вызвал интерес предложенный метод, основанный на использовании полных систем законов сохранения. В общем случае нахождение полных систем законов сохранения, особенно для нелинейных уравнений, весьма проблематично, поэтому пример решения краевой задачи газовой динамики, выполненный в 2018 г., имеет важное теоретическое и прикладное значение. Предложенный метод интегрирования уравнений газовой динамики и гидромеханики в дальнейшем предполагается реализовать в пакете программ ЛОГОС-Аэро-Гидро.

В математическом отделении в 2018 г. разрабатывались новые программные модули для решения актуальных задач при проектировании и эксплуатации конструкций и аппаратов новой техники, к числу которых относится задача оценки их общего, выработанного и прогнозируемого остаточного эксплуатационного ресурса.

Для оценки усталостной долговечности опасных зон конструкций разработан автономный программный модуль расчета ресурса долговечности при малоцикловой усталости «Resource_v1». Модуль позволяет по заданной истории изменения компонент тензора полных деформаций и температуры в исследуемой точке проводить важные расчеты, в том числе расчеты параметров процесса монотонного и циклического деформирования, накопления повреждений при малоцикловой усталости.



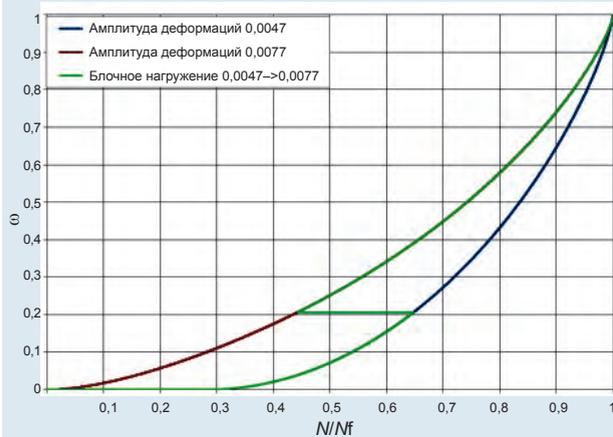
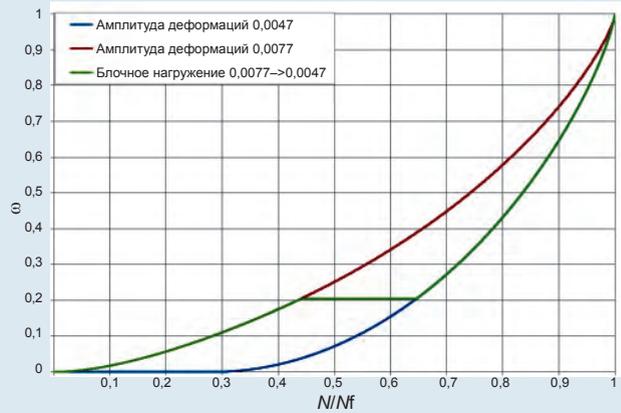
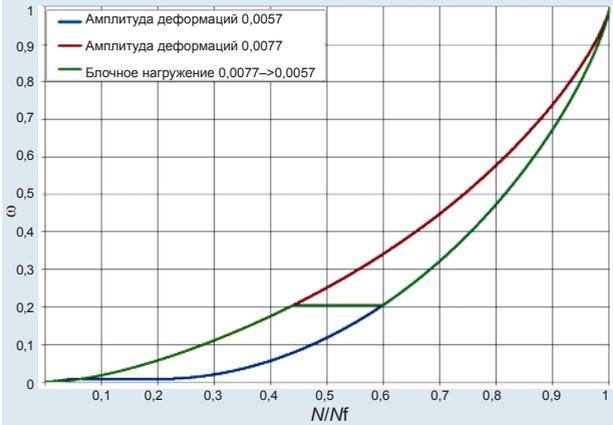
Для описания параметров упругопластического деформирования и процесса накопления повреждений используется модель Ю. Г. Коротких.

С помощью «Resource_v1» смоделирован процесс накопления усталостных повреждений для ряда конструктивных стальных при блочном малоцикловом нагружении с контролируемой амплитудой полной осевой деформации. Сравнение численных и экспериментальных результатов подтверждает достоверность модели поврежденной среды Ю. Г. Коротких, а также показывает, что нормативный подход, основанный на правиле линейного суммирования по-

вреждений, в расчетах на долговечность может приводить как к консервативной, так и неконсервативной оценке.

Программный модуль оценки ресурса «Resource_v1» предполагается реализовать в пакете программ ЛОГОС-Прочность.

С 2009 г. в ИТМФ ведутся работы по созданию методики моделирования протонных изображений различных объектов (статических и динамических), полученных в результате газодинамических расчетов. В 2014 г. на программную реализацию методики получено свидетельство о государственной регистрации программ



Зависимость развития поврежденности от приведенного количества циклов нагружения в условиях двухблочного циклического нагружения: ε – относительная объемная доля дефектов в элементарном объеме вещества, N – номер цикла нагружения, N_f – количество циклов до разрушения

Число циклов до разрушения

| Амплитуда полной деформации | Экспериментальное число циклов | Расчетное число циклов |
|-----------------------------|--------------------------------|------------------------|
| 0,0047 | 4337 | 4326 |
| 0,0057 | 1972 | 1960 |
| 0,0077 | 499 | 571 |

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

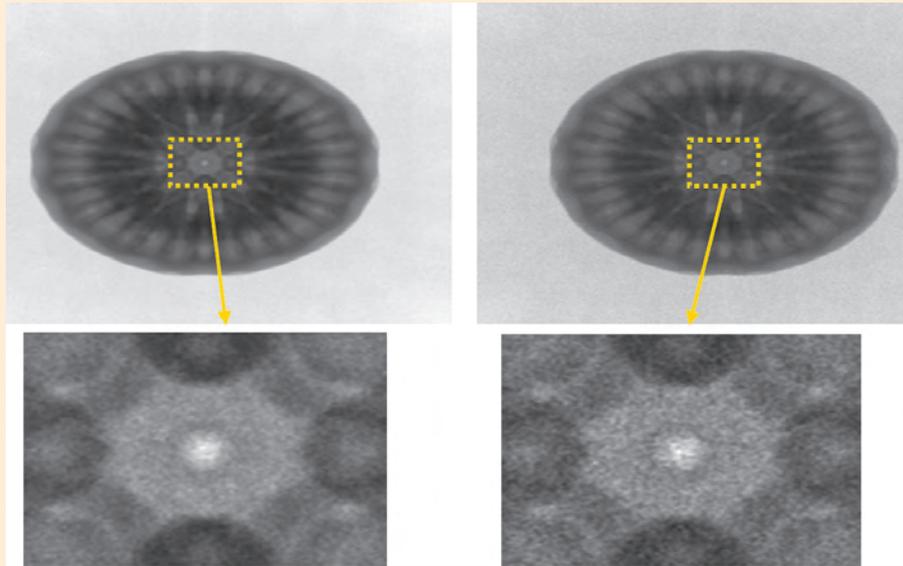
| Блок № 1 | | Блок № 2 | | Расчетное число циклов до разрушения (общее по двум блокам) | Правило линейного суммирования повреждений, $\sum \frac{N_i}{N_{fi}}$ |
|-----------------------------|--------------|-----------------------------|--|---|---|
| Амплитуда полной деформации | Число циклов | Амплитуда полной деформации | Число циклов до разрушения (общее по двум блокам), эксперимент | | |
| 0,00770 | 250 | 0,0057 | 930–1245 | 1038 | 0,8398 |
| 0,0077 | 250 | 0,0047 | 1640–2270 | 1784 | 0,7924 |
| 0,0047 | 2800 | 0,0077 | 2875–3210 | 3119 | 1,2059 |

для ЭВМ «Программный комплекс "Протонные изображения"» (ПИ).

Методика ПИ предназначена для математического обеспечения и сопровождения протонных радиографических установок и активно используется при планировании еже-

годных серий динамических экспериментов на установке ПРГК-100 (г. Протвино). Моделирование протонных изображений с различными настройками магнитооптической системы обеспечивает выбор оптимальных значений коллиматоров, устанавливаемых

в фурье-плоскости, и токов в магнитных квадрупольных линзах для получения наиболее информативных экспериментальных снимков. Методика позволяет априори оценить результаты опыта и спрогнозировать качество экспериментальной инфор-



Смоделированные протонные изображения сборок

мации и, по возможности, уточнить постановку эксперимента.

В настоящее время методика продолжает совершенствоваться. В текущей версии программная реализация методики состоит из трех расчетных модулей, включает подсистему автоматической подготовки и запуска расчетов (АПИ) с использованием веб-интерфейса, базу данных хранения пакетов заданий и архивов результатов успешно и аварийно завершенных расчетов. Архив позволяет в автоматическом режиме загрузить в систему запуска АПИ выбранный расчет с последующей корректировкой параметров и перезапуском.

Для предварительного анализа расчетных изображений в методику ПИ интегрирована программа анализа радиографических изображений (ПАРИ) с улучшенным математическим аппаратом и реализацией новых функциональных модулей пакетной обработки изображений и расчета границ раздела двух сред на изображении. В целом работа по совершенствованию методики ПИ позволила улучшить

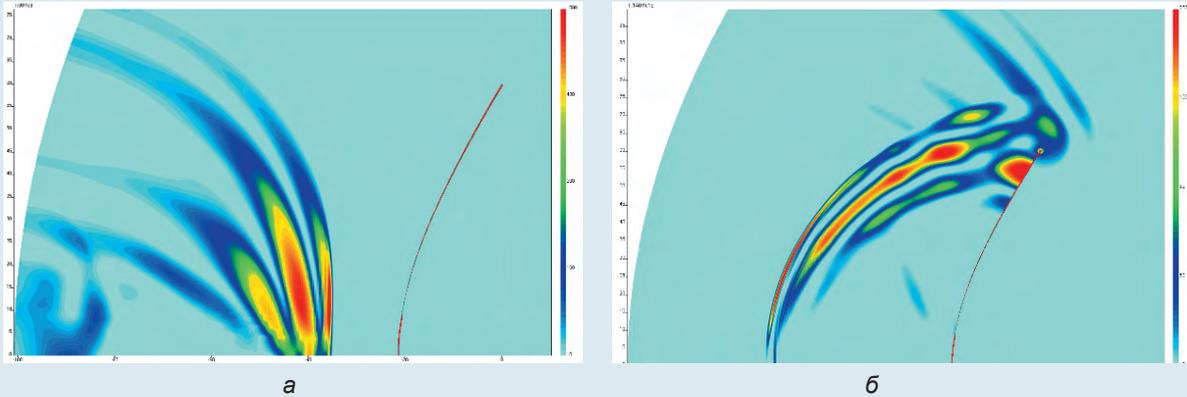
качество получаемых протонных изображений.

В 2018 г. завершена работа, связанная с созданием трехмерной методики численного моделирования генерации и фокусировки сверхширокополосного электромагнитного излучения (СШП ЭМИ) в двухзеркальной фокусирующей антенной системе (ФАС), которая состоит из пассивного параболического рефлектора большого диаметра и контррефлектора (внутреннего рефлектора).

Возможности разработанной методики расчета такой конструкции позволяют моделировать системы, в которых поверхность контррефлектора может отличаться от параболической, а источник излучения СШП ЭМИ может располагаться либо снаружи пассивного рефлектора, либо внутри ФАС. Для обоих вариантов конструкции используется поэтапная технология расчета: на первом этапе моделируется работа излучающего элемента СШП ЭМИ, на втором – работа ФАС. В первом варианте конструкции источник излучения находится снаружи пас-

сивного рефлектора, вблизи его вершины, и имеет общую с ФАС ось симметрии. Связь между этапами расчета в этом случае осуществляется через граничные условия, сформированные на участке пассивного рефлектора вблизи его вершины. Во втором варианте конструкции источник излучения располагается внутри ФАС и может иметь ось симметрии, отличную от оси других элементов ФАС. В данном случае значения полей, вычисленные на первом этапе, с помощью разработанных алгоритмов интерполяции пересчитываются на новую сетку и формируют на ней начальные данные для расчета второго этапа.

Завершены интересные работы в рамках развития системного программного обеспечения (СПО), в том числе создание отладчика параллельных программ Parallel Debugger (PD). Его появление было обусловлено высокой сложностью алгоритмов создаваемых в математическом отделении программных комплексов моделирования физических процессов на



Распространение электромагнитного импульса в двухзеркальной ФАС:
 а – внутри ФАС, б – отражение от гиперболического контррефлектора диаметром 120 см

многопроцессорных вычислительных системах. Этот инструмент, разработанный для математиков ИТМФ, в опытный режим внедряется в Вычислительном центре (ВЦ) ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» с 2016 г. В настоящее время отладчик уверенно занял место в ряду отечественных средств отладки, разрабатываемых для российских многопроцессорных вычислительных систем. Он обеспечивает отладку программ, написанных на Си/Си++ и фортране. Графический интерфейс PD подобен интерфейсу зарубежного отладчика Allinea DDT, его можно настроить на сочетание «горячих клавиш» и цветовое оформление исходного текста отладчиков MS Visual Studio, Eclipse, IDEA и Allinea DDT. Отладчик PD поддерживает системы пакетной обработки заданий Open PBS/Torque, SLURM и СПО JAM, но может быть настроен и на другие системы. С отладчиком PD интегрированы свободно распространяемые профилировщики Google Performance Tools и mpiP. Кроме того, он позволяет отлаживать процессы и потоки программы, управлять точками прерывания и наблюдения, логически делить процессы программы на подмножества, управлять ими, а также изменять и просматри-

вать переменные.

Отладчик PD создан на языке программирования Java, предназначен для отладки программ в ОС Unix/Linux.

Важно отметить, что графический интерфейс параллельного отладчика позволяет создавать сессию отладки программы на вычислительных узлах вычислительной системы, а также рабочем (локальном) компьютере пользователя. По своим возможностям отладчик PD очень близок к коммерческим отладчикам TotalView и Allinea DDT, но у него нет лицензионных ограничений: он позволяет одновременно отлаживать и профилировать любое количество параллельных программ без учета числа используемых ими процессоров.

Сегодня PD успешно применяется на всех многопроцессорных вычислительных системах ВЦ РФЯЦ-ВНИИЭФ для отладки создаваемых в ИТМФ программных комплексов. Он включен в дистрибутив системного программного обеспечения супер-ЭВМ со встроенными средствами защиты информации от несанкционированного доступа.

В области создания системного программного обеспечения завершена еще одна интересная работа – программная система диагности-

ки многопроцессорных узлов вычислительной системы (СДУ), созданная для решения проблемы оперативной локализации сбоев/отказов в системе пакетной обработки заданий JAM (СПО JAM).

В автоматическом режиме СДУ проверяет неработоспособные узлы, а затем вводит их в работу, если дефекты были устранены. Одновременно система может проверять 100 и более вычислительных узлов. В задачи, решаемые СДУ, входят:

- автоматическое тестирование узлов с обнаруженными СПО JAM дефектами;
- ввод в работу проверенных узлов;
- формирование истории функционирования узлов многопроцессорной вычислительной системы (хранится в базе данных СПО JAM).

В настоящее время СДУ внедрена на всех вычислительных системах ИТМФ, находящихся под управлением СПО JAM. Положительный эффект применения СДУ проявился в улучшении эксплуатационных показателей мощной вычислительной системы ИТМФ сразу после внедрения.

Еще одна важная характеристика СДУ – круглосуточный режим работы. На разных вычислительных системах показатель срабатывания сис-

Эксплуатации характеристики вычислительной системы

| Характеристика | Без СДУ, % | С СДУ, % |
|----------------------------------|------------|----------|
| Коэффициент работоспособности | 82,54 | 97,26 |
| Коэффициент потерь из-за ремонта | 2,93 | 0,83 |

темы в интервале от 17 до 8 часов находится в пределах 20–69 %.

СДУ является важным программным компонентом Вычислительного центра ИТМФ, способствующим повышению готовности, эксплуатационной надежности, пропускной способности вычислительной системы и уменьшению времени её технического обслуживания.

Новизна технического решения СДУ по восстановлению работоспособности вычислительных систем подтверждена свидетельством ФИПС.

РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ И МЕТОДОВ СУПЕРКОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В рамках работ по созданию, развитию и внедрению технологий высокопроизводительных вычислений и методов суперкомпьютерного моделирования в научные исследования, проектирование и создание высокотехнологичной продукции РФЯЦ-ВНИИЭФ в 2010 г. начаты и активно развиваются следующие направления:

– разработка отечественного прикладного программного обеспечения для высокопроизводительных вычислений (создание многофункционального пользовательского комплекса программ ЛОГОС для многодисциплинарного комплексного моделирования на основе современных физических моделей и эффективных численных методов);

– разработка и создание суперкомпьютерной инфраструктуры (высокопроизводительные супер-ЭВМ, вычислительные сети, системное программное обеспечение);

– формирование (совместно с соисполнителями) базы данных по свойствам материалов и базы данных для верификации и валидации, необходимых для создания и внедрения технологии суперкомпьютерных виртуальных испытаний с применением суперкомпьютерных двойников изделий.

Суперкомпьютерный двойник изделий – это система взаимосвязанных моделей, обеспечивающая моделирование значимых процессов и явлений, происходящих при

эксплуатации изделия, с целью прогнозирования и оптимизации тактико-технических характеристик и режимов работы изделия на основе сквозного суперкомпьютерного моделирования, выполняемого как на этапе проектирования, так и на этапе эксплуатации изделия. Суперкомпьютерный двойник может быть создан как для существующего, так и для перспективного изделия. Цифровой двойник разрабатывается для уже готового изделия и включает в себя схемы, чертежи и другую документацию в электронном виде.

Создание и внедрение суперкомпьютерных виртуальных испытаний с применением суперкомпьютерных двойников не только сокращает сроки изготовления, но и снижает стоимость жизненного цикла изделия, а также способствует расширению возможностей в области повышения тактико-технических и эксплуатационных характеристик создаваемых продуктов.



Технология проектирования и создания наукоемких изделий на основе суперкомпьютерных двойников изделий



Суперкомпьютерный двойник изделия: состав работ

ЛОГОС

ЛОГОС ПЛАТФОРМА
МОДУЛЬНАЯ ИНТЕГРАЦИОННАЯ ПЛАТФОРМА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ СВЯЗНЫХ И СОПРЯЖЕННЫХ РАСЧЕТОВ

ЛОГОС АЭРО-ГИДРО
АЭРОДИНАМИКА ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ, ТУРБУЛЕНТНОЕ ПЕРЕМЕШИВАНИЕ

ЛОГОС ТЕПЛО
ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС, ИЗЛУЧЕНИЕ

ЛОГОС ПРОЧНОСТЬ
СТАТИЧЕСКАЯ И ДИНАМИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ, РАЗРУШЕНИЕ И ДЕФОРМАЦИЯ

ЛОГОС ПРЕПОСТ
ПОДГОТОВКА НАЧАЛЬНЫХ ДАННЫХ, ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Основные составляющие многофункционального пользовательского комплекса программ ЛОГОС

В 2018 г. получили дальнейшее развитие все основные пакеты программ, входящие в состав многофункционального пользовательского комплекса программ ЛОГОС. В частности, для пакета программ ЛОГОС-Тепло (трехмерное моделирование тепло-массообмена на произвольных сетках) были реализованы следующие функциональные блоки:

- моделирование ламинарно-турбулентного перехода на неструктурированных расчетных сетках;

- моделирование перфорированной стенки в рамках доработки модели пористого тела;

- моделирование распространения ударных волн от взрыва ВВ;

- подготовка данных для перестроения расчетной сетки средствами ЛОГОС-ПП в зависимости от особенностей решения;

- моделирование образования инея;

- моделирование эрозии и абляции;

- моделирование течений в турбовинтовых установках;

- расчет влажности с учетом испарения и конденсации;

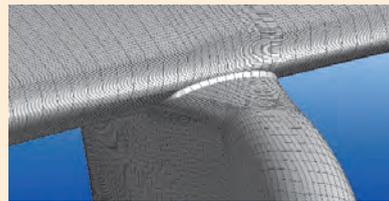
- моделирование кавитирующих течений на основе гомогенного приближения;

- моделирование течения частиц к-фазы в газовой струе и эрозионного воздействия при попадании струи на поверхность;

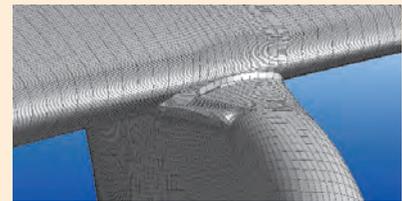
- моделирование впрыска жидкости в сверхзвуковой поток;

- расчет локальных источников массы, импульса и энергии, задаваемых пользователем;

- расчет фазового перехода



Начальная форма поверхности



Форма поверхности через 20 с

Образование инея в месте сочленения крыла и пилона



Распределение относительной влажности воздуха в салоне автомобиля

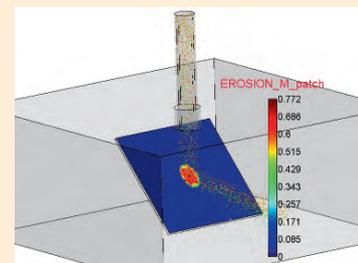
методом подвижного фронта;

- расчет сопряженного теплообмена системы подвижных тел;

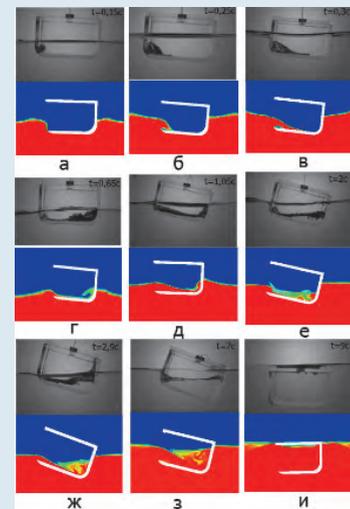
- моделирование гидродинамических течений со свободной поверхностью на подвижных сетках.

В пакете программ ЛОГОС-Прочность, предназначенном для решения задач напряженно-деформированного состояния на конечно-элементных сетках, в 2018 г. выполнен большой объем работ по расширению и совершенствованию функциональных возможностей всех его основных составляющих модулей (статическое деформирование, вибрационное воздействие, динамическое деформирование) в целях расширения классов решаемых задач в интересах предприятий авиационной, ракетно-космической, судостроительной отраслей.

Для решателя статических



Эрозия графитовой пластины под узконаправленным потоком частиц (масса унесенного с графитовой пластины материала)



Затопление модели судна: сравнение экспериментальных фотографий и численных результатов для модели с боковым отверстием

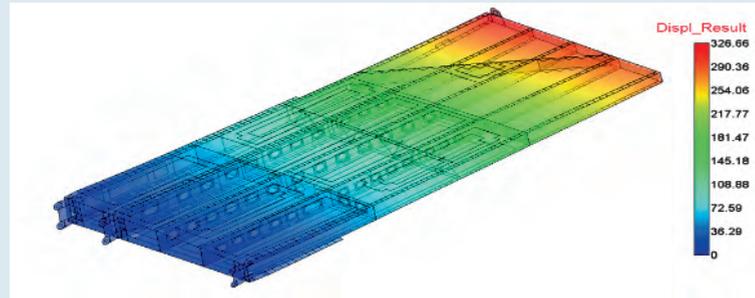
задач прочности в 2018 г. были характерны следующие направления развития:

- реализация модели слоистого композиционного материала;
- учет контактного взаимодействия для оболочечных поверхностей;
- реализация шарнирных соединений; возможности по заданию пользовательских моделей материалов и критериев разрушения.

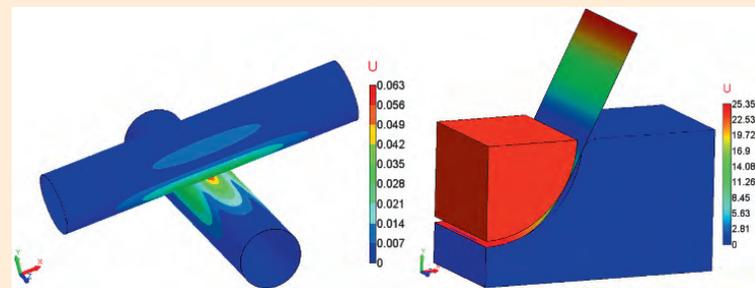
Реализация перечисленных функциональных возможностей потребовала развития методического и сервисного программных блоков модуля ЛОГОС-Прочность и модуля автоматизированной подготовки и обработки расчетных моделей ЛОГОС-ПреПост.

В области решения вибрационных задач прочности отмечены следующие достижения:

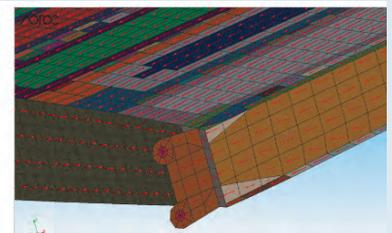
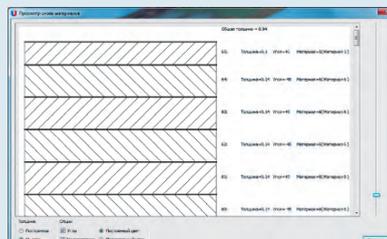
- расширение гармонического анализа для поддержки балочных и оболочечных конечных элементов;
- значительное ускорение анализа широкополосных случайных вибраций для решения задач большой размерности и добавление поддержки нагрузок, заданных на креплениях.



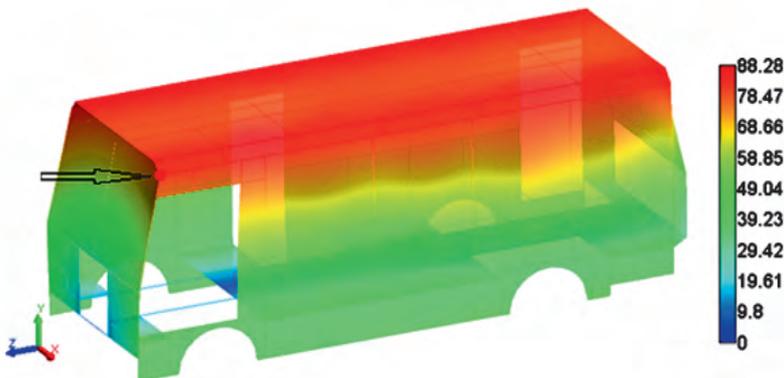
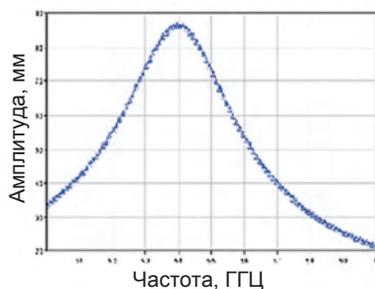
Расчет напряженно-деформированного состояния панели летательного аппарата из композитного материала



Учет контактного взаимодействия для поверхностей из оболочечных элементов



Возможности препроцессора по заданию и визуализации свойств слоистых композиционных материалов



Получение отклика кузова автобуса под действием гармонической вибрации, идущей от передней оси

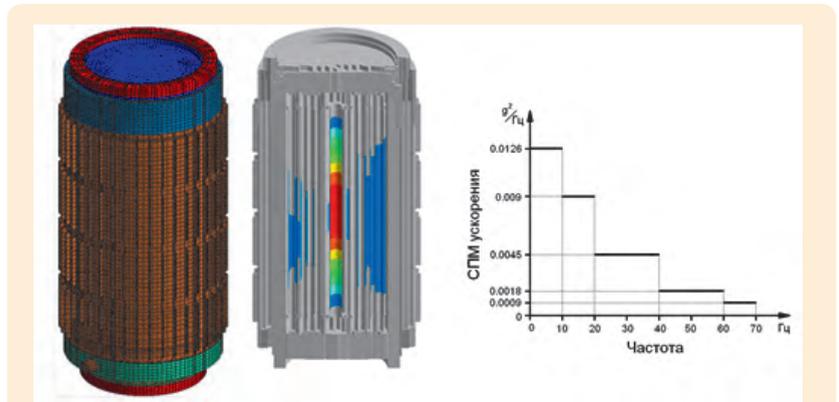
В сфере решения динамических задач прочности по итогам 2018 г. выделяются следующие направления развития:

- расширение библиотеки конечных элементов;
- ведение новых моделей материалов и уравнений состояния (в том числе композитных материалов, бетона, железобетона, льда и др.), а также критериев их разрушения;
- возможность счета задач с большими деформациями в эйлеровой постановке; моделирование контактного взаимодействия с использованием подходов, учитывающих особенности геометрической формы балочных и оболочечных элементов; моделирование сварных соединений;
- моделирование процессов пробития и др.

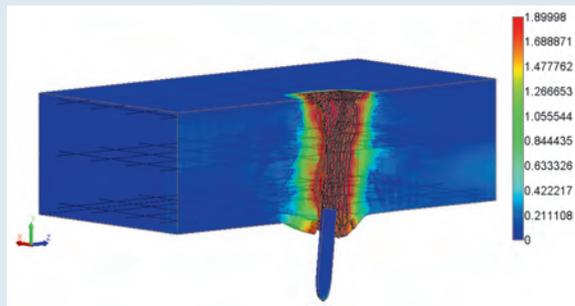
Кроме того, по модулю ЛОГОС-Прочность в 2018 г. выполнен большой объем работ по верификации и обоснованию возможности использования пакета программ для численного моделирования напряженно-деформированного состояния и обоснования прочности оборудования объектов использования атомной энергии.

Значимые работы были выполнены по развитию пакета программ ЛОГОС-ПреПост. Так, в области генерации расчетных сеток для решения задач аэрогидродинамики к имевшимся ранее средствам добавлен ряд новшеств:

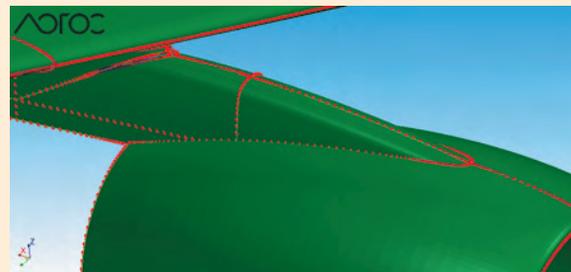
- в рамках генератора поверхностных сеток на аналитических моделях реализованы новые возможности построения на заданных границах разбиений ребер и поверхностных сеток, позволяющие выполнить предварительное построение сеток для выбора параметров генерации;
- в рамках работ по автоматическому построению объем-



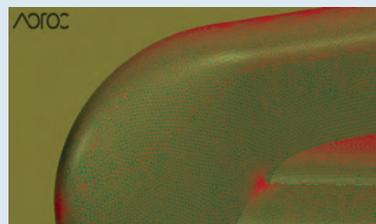
Получение отклика транспортно-упаковочного контейнера под действием широкополосной случайной вибрации, приложенной на закреплении



Пробитие железобетонной преграды стальным ударником



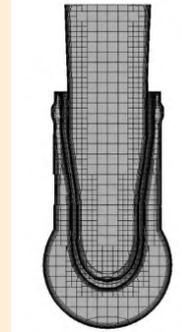
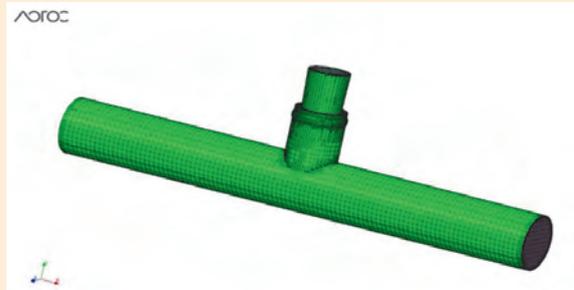
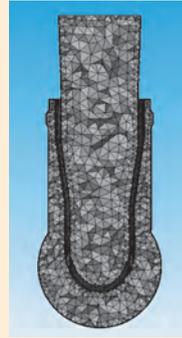
Разбиение ребер модели на выделенной границе



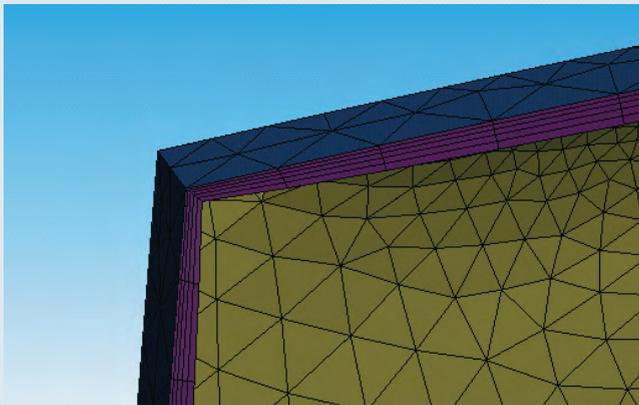
Построение поверхностной сетки на выделенных границах

ных сеток с призматическими слоями реализована возможность генерации расчетных сеток с выбором типа элемен-

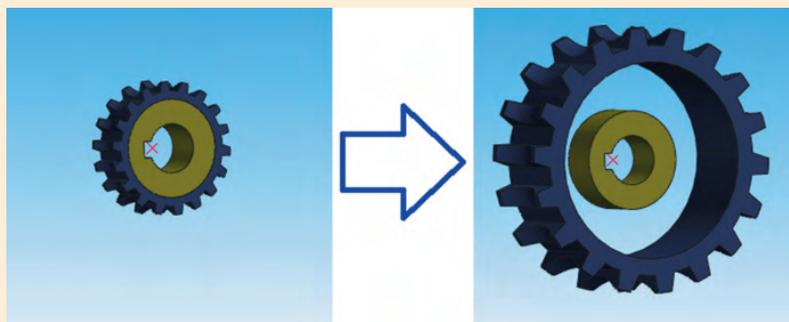
тов в ядре сетки (тетраэдры, адаптивные и отсеченные ячейки);



Генерация объемных сеток с выбором типа элементов в ядре сетки



Построение сеток из призматических ячеек с треугольным основанием



Масштабирование геометрических тел

– для решения тепловых задач в совокупности с задачами аэродинамики реализована возможность автоматического построения сеток из призматических ячеек с треугольным основанием.

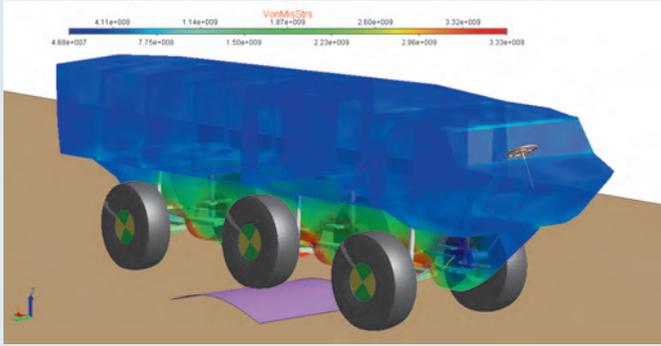
К имевшимся ранее средствам работы с геометрией и сеткой при решении задач аэрогидродинамики и прочности добавлен целый ряд новых возможностей, в том числе:

- операция «создание грани – продлением грани»;
- операция формирования твердого тела из набора граней;
- операция преобразования твердого тела в листовое тело;
- операция удаления вершины с объединением сходящихся в ней двух ребер;
- операция создания дуги;
- операция создания вершины в центре дуги;
- операция создания «офсетных» кривых для цепочки ребер;
- операция масштабирования геометрических тел и др.

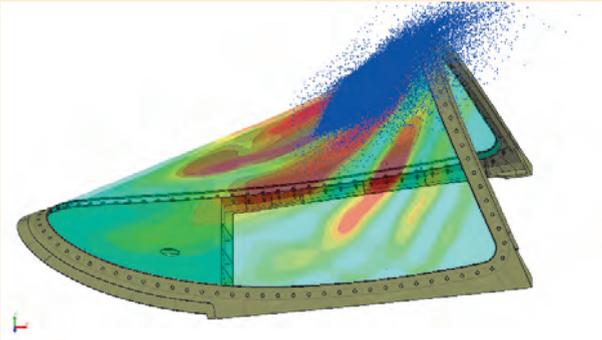
Расширен перечень операций прямого редактирования, в него добавлены:

- операции ассоциации/деассоциации узлов/ячеек сетки с геометрическими элементами;
- операция проецирования узлов сетки на грань/ребро, по направлению, а также проецирование набора узлов на набор граней;
- операция перемещения ячеек сетки между компонентами; операция интерактивно перемещения узлов.

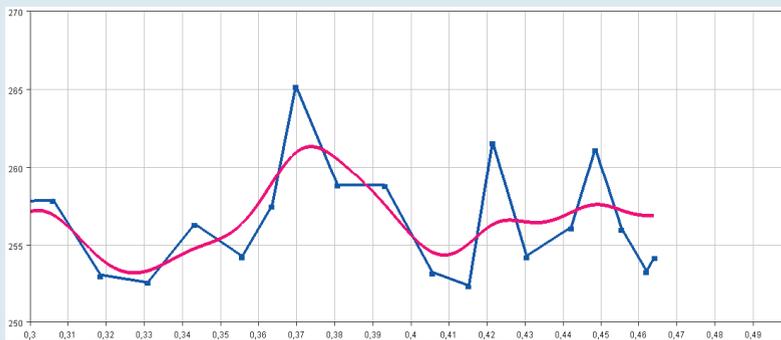
В пакете программ ЛОГОС-ПреПост проведена оптимизация скорости работы генераторов относительно предыдущей версии. Распараллелены алгоритмы локального перестроения поверхностной сетки и алгоритмы построения смещенной поверхности в генераторах объемных сеток (для задач повышенной слож-



Отображение результатов совместного моделирования прочности и кинематики



Результаты работы порядко-независимого алгоритма при отображении объектов в полупрозрачном режиме



Пример использования частотной фильтрации временных диаграмм: — исходный график, — результат применения фильтра Баттерворта низких частот 4-го порядка



Отображение компонента векторной величины в исходной декартовой системе координат (слева) и в глобальной цилиндрической (справа)

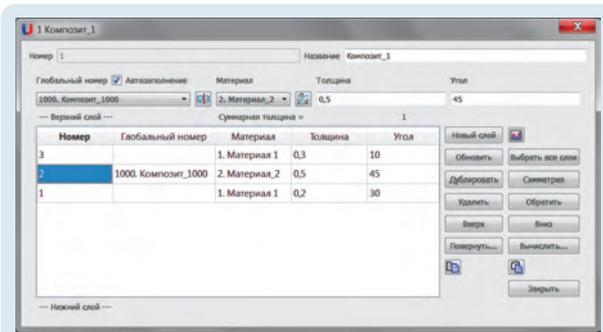
ности получено ускорение до 20 раз).

В части постпроцессинга пакета программ ЛОГОС-Пре-Пост к имеющимся ранее средствам (параллельный режим, более 45 алгоритмов числовой и графической обработки, макроязык, кроссплатформенность и т. д.) добавлены новые возможности, основные из которых:

- отображение результатов совместного моделирования прочности и кинематики;
- отображение результатов моделирования с использованием порядко-независимой прозрачности в параллельном режиме;
- постобработка граничных массивов, полученных при моделировании задач теплопереноса;
- расчет дополнительных сеточных и интегральных величин при постобработке результатов моделирования прочности.

Основные функциональные возможности, реализованные в рамках работ 2018 г. по открытой части основной тематики предприятия:

- вывод графиков с независимыми шкалами в области 3D-сцены;
- алгоритм автоматического масштабирования перемещений;
- выделение линиями каркаса границ счетных регионов задач теплопереноса в трехмерном случае;
- отображение и фильтрация «фиктивных» элементов для задач прочности;
- новый алгоритм сохранения результатов постобработки в виде сеточных данных;
- анимирование деформаций;
- частотная фильтрация временных диаграмм;
- алгоритм перевода векторных и тензорных величин в глобальную цилиндрическую



Диалоговое окно редактора композитного материала



Презентация пакета программ ЛОГОС в НТЦ ЯРБ

и сферическую системы координат.

Наконец, ключевыми результатами 2018 г. в развитии пакета программ ЛОГОС-ПреПост (в части задания математической модели для проведения моделирования) относятся:

- реализация возможности «отката» выполненных операций редактирования сеточных моделей;

- разработка набора инструментов для задания и редактирования параметров композитных материалов, а также создание средств визуализации данных для упрощения подготовки входных данных для нелинейных задач механики композитных материалов, реализующих новые физические модели для последующего расчета задач статической прочности;

- реализация интерфейса пользователя для задания параметров моделирования шарнирных соединений, при-

меняемых при решении статических задач прочности;

- внедрение возможности импорта табличных данных из текстовых файлов формата CSV и их последующего использования при моделировании задач прочности;

- разработка возможности конфигурирования системы запуска задач на удаленном компьютере для снижения расходов на адаптацию ЛОГОС-ПреПост к счетным кластерам с различными настройками на разных предприятиях.

В 2018 г. специалисты математического отделения приступили к созданию отечественной программной платформы суперкомпьютерного моделирования, цифровых испытаний и прогнозирования сложных технических систем ЛОГОС-Интеллект, которая будет положена в основу развития как новых прикладных приложений пакетов программ (ЛОГОС-Машиностроение,

ЛОГОС-Экономика, ЛОГОС-Строительство и др.), так и уже активно развивающихся (ЛОГОС-АТОМ и ЛОГОС-НИМФА).

Для внедрения пакета программ ЛОГОС на предприятиях атомной промышленности необходима его аттестация в Ростехнадзоре России (ФБУ «НТЦ ЯРБ»). По решению секции № 2 НТС ФБУ «НТЦ ЯРБ» пакет программ ЛОГОС принят к аттестации в интересах моделирования теплогидравлических процессов в оборудовании транспортных ядерных энергетических установок и процессов теплопроводности и излучения в твердотельных конструкциях объектов использования атомной энергии.

Как отмечалось выше, в 2018 г. проведена масштабная верификация пакета программ ЛОГОС-Прочность с целью обоснования его применимости для моделирования напряженно-деформированного состояния и анализа прочнос-

ЛОГОС-ИНТЕЛЛЕКТ

Головной исполнитель: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»

МАШИНОСТРОЕНИЕ (ЛОГОС-М)

Проектирование и создание высокотехнологичных изделий ОПК

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА (ЛОГОС-АТОМ)

Обеспечение конкурентоспособности объектов АЭС на внутреннем и внешнем рынках

ЭКОНОМИКА (ЛОГОС-ИСТРА)

Прогнозирование и оптимизация бюджетных процессов

НЕФТЕГАЗОДОБЫЧА (ЛОГОС-НИМФА)

Моделирование газовых нефтяных месторождений. Оптимизация нефтегазодобычи

ЭКОЛОГИЯ (ЛОГОС-НИМФА)

Обеспечение экологической безопасности промышленных объектов

СТРОИТЕЛЬСТВО (ЛОГОС-С)

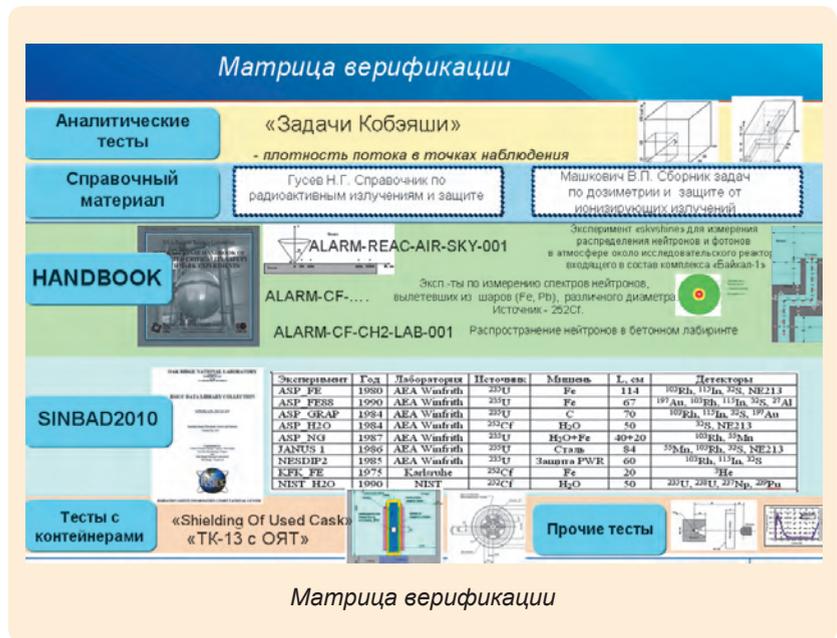
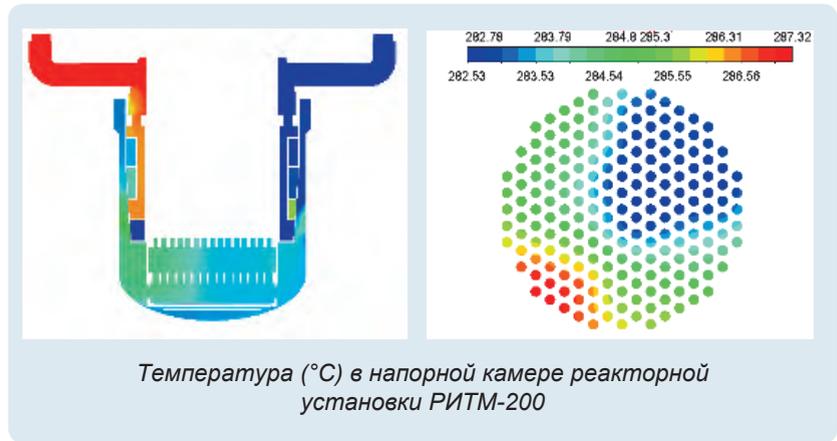
Проектирование и эксплуатация сложных инженерных объектов

Отечественная программная платформа суперкомпьютерного моделирования, цифровых испытаний и прогнозирования сложных технических систем ЛОГОС-Интеллект

ти оборудования объектов использования атомной энергии, в том числе элементов конструкции ядерных энергетических установок различного назначения, защитных контейнеров для наземной и воздушной транспортировки делящихся и радиоактивных материалов. Верификационный базис содержал широкий класс прочностных задач (динамический, статический, модальный, гармонический анализ, анализ устойчивости) в условиях сложного термо-механического нагружения. Пакет программ показал хорошее согласие полученных результатов с аналитическими и экспериментальными данными. По итогам работ выпущен верификационный отчет для подачи пакета программ ЛОГОС на аттестацию для моделирования указанных физических процессов.

Подготовлен и передан в ФБУ «НТЦ ЯРБ» для прохождения процедуры аттестации доработанный верификационный отчет по обоснованию применимости пакета программ ЛОГОС для моделирования течений жидкометаллических теплоносителей в оборудовании реакторных установок на быстрых нейтронах.

Также с целью внедрения пакета программ ЛОГОС в атомную отрасль в 2018 г. проведены работы в интересах разработки технологий моделирования актуальных классов промышленных задач для двух предприятий: АО «ОКБМ Африкантов» (по оптимизации проектных решений и для обоснования долговечности оборудования при термоциклическом нагружении транспортных реакторных установок) и АО ОКБ «Гидропресс» (по расчетному обоснованию оборудования реакторных установок водо-водяных энергетических реакторов). По пакету программ ЛОГОС была рассчитана акту-

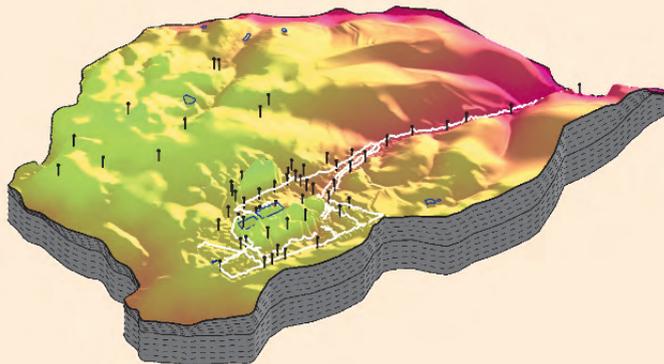


альная практическая задача для АО «ОКБМ Африкантов» – моделирование смешения неизотермических потоков в напорной камере перспективной транспортной реакторной установки РИТМ-200 в парциальном режиме работы при отключении секции парогенератора. Сравнительный анализ результатов моделирования, полученных по пакету программ ЛОГОС и коммерческому коду ANSYS CFX (предоставлены АО «ОКБМ Африкантов»), продемонстрировал их удовлетворительное согласие по всем оцениваемым параметрам (в том числе перепаду температуры на входе в активную зону, температурным полям в различных сечениях напор-

ной камеры, статистическим характеристикам изменения температуры в контрольных точках).

В ИТМФ продолжались работы по развитию и внедрению программного комплекса Time Dependent Monte-Carlo Code (TDMCC) решения задач совместного переноса нейтронов и гамма-квантов методом Монте-Карло. В рамках этого направления в 2018 г. завершена верификация программного комплекса TDMCC для решения задач радиационной защиты от заданных источников нейтронного и фотонного излучений.

24 октября 2018 г. экспертный совет по аттестации программных средств при Ростех-



Трехмерная модель объекта ПАО «МСЗ»

надзоре принял решение об утверждении аттестационного паспорта программного комплекса TDMCC. Результаты расчетов по аттестованной программе теперь возможно использовать в проектных работах.

В 2018 г. активно продолжалась работа по развитию пакета ЛОГОС-НИМФА. Успешно выполнен договор между Госкорпорацией «Росатом» и ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» на проведение НИР по теме «Обеспечение высокой достоверности прогнозов распространения радионуклидов в грунтах и грунтовых водах при обосновании безопасности ЯРОО и вывода из эксплуатации пунктов хранения ЯМ и хранилищ РАО путем адаптации и внедрения в работы Госкорпорации «Росатом» отечественного программного комплекса ЛОГОС-НИМФА».

Параллельно велась работа по лицензионной поставке программного комплекса (ПК) ЛОГОС-НИМФА на российские предприятия: выполнена лицензионная поставка ПК НИМФА в АО «СХК», ФГУП «ГХК» и ООО «Деймос ЛТД». Успешно выполнен договор техподдержки между ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» и ООО «Деймос ЛТД».

В 2018 г. ПК ЛОГОС-НИМФА (версия 5.0) для трехмерных расчетов процессов фильтра-

ции и миграции в насыщенно-ненасыщенных водоносных горизонтах прошел верификацию на моделях реальных территорий объектов. В настоящий момент идет процесс аттестации ПК в ФБУ «НТЦ ЯРБ».

В прошедшем году в состав ПК ЛОГОС-НИМФА включена программа разработки геологических моделей. Она позволяет построить геологическую модель на основе набора осадочных тел в автоматическом режиме. Появление такого блока в составе ПК выводит его на лидирующие мировые позиции по функциональным возможностям среди программ гидрогеологического моделирования.

Кроме того, в составе ПК ЛОГОС-НИМФА создан модуль автоматической калибровки геофильтрационных моделей. Он позволяет автоматически проводить калибровку данных в параллельном режиме на мультипроцессорных комплексах с распределенной памятью, чем выгодно отличается от широко используемой на практике системы PEST, разработанной в США, в которой такая функция отсутствует.

Средствами ПК ЛОГОС-НИМФА разработаны геомиграционные модели ПАО «МСЗ» и АО «ГНЦ НИИАР».

Геомиграционная модель ПАО «МСЗ» внедрена на данном предприятии.

РАЗВИТИЕ ПРОДУКТОВОЙ ЛИНЕЙКИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ ИТМФ

В декабре 2017 г. по итогам федерального этапа Всероссийского конкурса «100 лучших товаров России» контроллер защиты FOBOS-100GL разработки специалистов математического отделения ИТМФ (сертификат ФСТЭК России № 3329), обеспечивающий техническую защиту информации, передаваемой по волоконно-оптическим линиям без ограничения скорости передачи и количества каналов, за пределами контролируемой зоны, был признан лауреатом конкурса и получил право в течение двух лет (2018–2019 гг.) сопровождаться официальным логотипом. Декларация обеспечения стабильного качества контроллера защиты FOBOS-100GL на этот период была подписана руководством ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ».

Современная модель контроллера защиты FOBOS-100GL (GE, GS) имеет следующие характеристики:

- скорость передачи информации – от 100 Мбит/с до 100 Гбит/с и более на один канал;
- количество каналов в одном оптическом волокне по технологиям WDM – до 96;



Контроллер FOBOS-100GL



Модель АПК-5

- стандарты передачи информации – любые, дальность передачи – от 0 до 100 км;
- порог обнаружения – от 0,003 до 0,02 дБ при среднем времени наработки на ложную тревогу не менее 10000 ч и вероятности обнаружения не менее 0,99999.

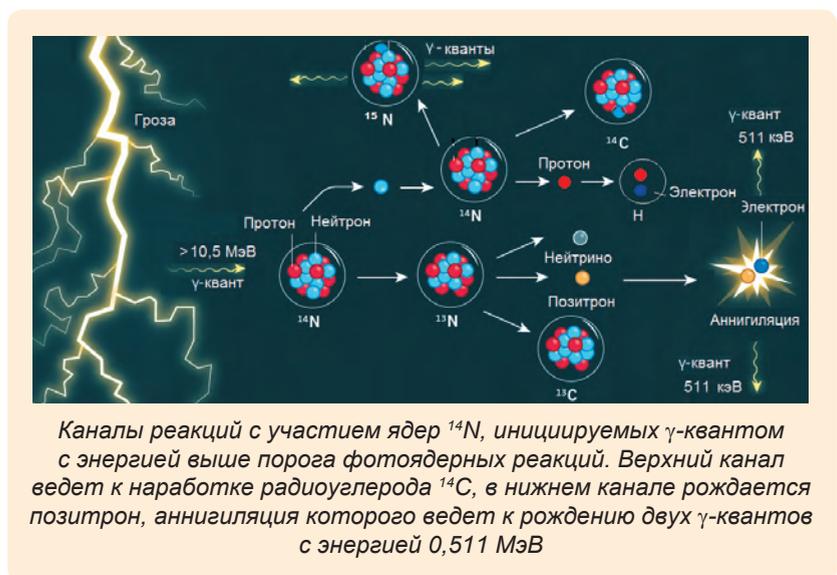
В 2018 г. заказчикам поставлено восемь аппаратно-программных комплексов (АПК) различных модификаций, созданных на базе компактных супер-ЭВМ, в том числе по одному АПК передано «Атомтехэнерго» (производительностью 10,0 Тфлопс),

НПО «Прибор» (производительностью 1,0 Тфлопс) и ОИВТ РАН (производительностью 1,0 Тфлопс). Два АПК производительностью 2,56 и 6,14 Тфлопс переданы в подразделения ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»; три АПК производительностью 4,3 Тфлопс каждый поставлены АО «СПМБМ «Малахит»», (г. С.-Петербург). Таким образом, с момента развертывания серийных работ по разработке и созданию образцов компактных супер-ЭВМ и до конца 2018 г. российским организациям и на предприятия поставлено 145 экземпляров компактных супер-ЭВМ различных моделей и модификаций с суммарной вычислительной мощностью 291,6 флопс.

ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ (ИЛФИ)

ГРОВОЫЕ НЕЙТРОНЫ, НАРАБОТКА РАДИОУГЛЕРОДА ГРОЗАМИ

Проанализировано современное состояние исследований грозových ядерных реакций. На основе наблюдений усиления потока нейтронов в грозových облаках и во время гроз сделан вывод о том, что усиление связано с фотоядерными реакциями за счет тормозного излучения лавин убегающих электронов высоких энергий, развивающихся в грозовом электрическом поле. Отмечена сложность селекции грозových нейтронов, обусловленная находением детекторов в смешанном поле различных



излучений, включающем не только нейтроны, но и первичные электроны высоких энер-

гий, и их тормозное излучение. Особое внимание уделено открытию в грозовой атмосфере

линии аннигиляции позитрона и электрона с энергией фотонов 0,511 МэВ, являющейся достоверным свидетельством как генерации нейтронов, так и их фотоядерного происхождения. Следствия этого открытия обсуждаются.

В связи с усилением потока нейтронов во время гроз выполнен анализ вклада грозовых нейтронов в наработку атмосферного радиоуглерода. Оценки флюенса грозовых нейтронов на один электромагнитный импульс молнии в областях с сильной грозовой активностью, обеспечивающего локальную скорость наработки радиоуглерода, сопоставимую с данными наблюдений, согласуются с измеренными значениями флюенса грозовых нейтронов. Доступные данные наблюдений об атмосферных нейтронах и вспышках первичного гамма-излучения, коррелированных с грозами, не позволяют сделать окончательный вывод о вкладе гроз в наработку радиоуглерода. Необходимы многочисленные исследования высокоэнергетических явлений в грозах, прежде всего в тропическом поясе, где грозовая активность особенно интенсивна и наработка радиоуглерода галактическими космическими лучами почти не зависит от активности Солнца, возмущающей геомагнитное поле, экранирующее Землю от космического излучения.

МИШЕНИ ПРЯМОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ЗАЖИГАНИЕ В УСЛОВИЯХ ОБЛУЧЕНИЯ ВТОРОЙ ГАРМОНИКОЙ НЕОДИМОВОГО ЛАЗЕРА

В 2018 г. исследовано инерционное зажигание криогенной мишени прямого облучения в виде тонкой двухслойной оболочки с аблятором из пластика при воздействии профилированного импульса излучения

второй гармоники неодимового лазера с энергией ~ 2 МДж. Параметры мишени выбирались таким образом, чтобы обеспечить достаточную для зажигания эффективность ускорения оболочки к центру в условиях повышенной гидродинамической устойчивости абляционного ускорения и сжатия вещества.

Мишени лазерного термоядерного синтеза прямого облучения в настоящее время рассматриваются в качестве перспективной альтернативы мишеням непрямого сжатия на уровне энергии лазера ~ 1 МДж. В этом подходе на первый план выступают вопросы симметрии сжатия и зажигания термоядерного топлива.

Проведены расчетно-теоретические исследования сжатия и термоядерного горения сферических мишеней прямого облучения в условиях пространственной неоднородности нагрева, обусловленной сдвигом мишени из центра наведения лазерных источников и возможного их энергетического дисбаланса, а также временным рассогласованием прихода лазерных пучков на мишень. Определен диапазон допустимых изменений параметров сжатия и горения мишени в зависимости от вариаций пространственной неоднородности ее нагрева многопучковой лазерной системой. Показано, что низкомодовые (длинноволновые) возмущения приводят к ухудшению характеристик центральной области за счет менее эффективного преобразования кинетической энергии оболочки мишени во внутреннюю энергию центра. При существенной несимметрии облучения наблюдается также локальное инициирование горения в нецентральных областях мишени. В этом случае, как правило, горение не распространяется на весь объем дейтерий-тритиевого топлива,

что существенно снижает термоядерный выход по сравнению со случаем сферической симметрии и центрального зажигания.

Исследования выполнены на основе численного моделирования по одномерным и двумерным кодам радиационной газовой динамики.

НЕСТАЦИОНАРНАЯ МОДЕЛЬ ЛАЗЕРА-ГЕНЕРАТОРА НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ ТРЕХМЕРНОГО ВОЛНОВОГО УРАВНЕНИЯ

Созданы физико-математическая и численная модели лазера-генератора для расчета одномодового и многомодового режимов генерации лазерного излучения на основе решения трехмерного волнового параболического уравнения. Так как резонансные частоты поперечных мод генератора отличаются друг от друга, то для расчета многомодового режима генерации предложено в резонаторе задавать совокупность независимых некогерентных полей. Кинетика населенностей лазерных уровней в работе рассматривается в двухуровневом приближении. При численном решении трехмерного волнового параболического уравнения использовалась конечно-разностная схема интегрирования и расщепление по физическим процессам и направлениям.

В расчетах получены следующие результаты:

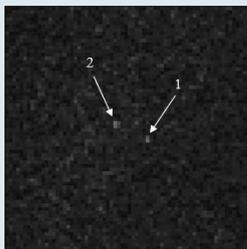
- продемонстрировано, что при размере активной среды меньше размера основной моды в резонаторе формируется одномодовый режим генерации (независимо от исходного модового состава), в обратной ситуации – многомодовый;
- получено уменьшение расходимости некогерентного многомодового лазерного излучения при компенсации тепловой линзы, которая может

возникать в результате нагрева оптических элементов генератора. Уменьшение расходимости происходит за счет затухания мод высших порядков и перекачки их энергии в моды низших порядков;

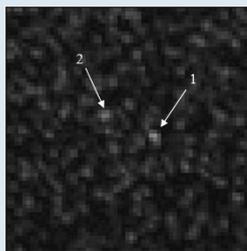
- найдено, что при наличии в активной среде оптического клина величиной α лазерный пучок из-за многопроходности лазерного излучения в резонаторе отклоняется на угол, заметно превышающий α . Для компенсации оптического клина глухое зеркало резонатора необходимо повернуть на угол 2α .

ДНЕВНОЕ НАБЛЮДЕНИЕ ЗВЕЗД СЛАБОЙ ЯРКОСТИ С РАВНИННОЙ МЕСТНОСТИ

Для мониторинга космического пространства с целью защиты от столкновения с космическим мусором и осуществления астронавигации по звездам весьма полезно освоить



а



б

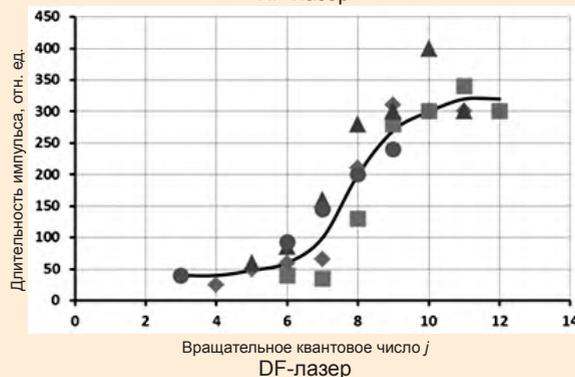
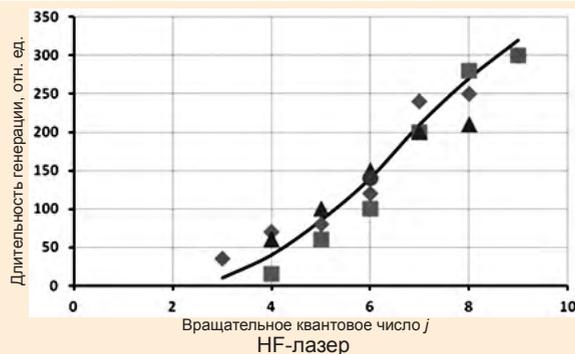
Звезды слабой яркости: 1 – звезда SAO 002556 (6,6m, съемка видеокамерой RT-1000DC), 2 – звезда SAO 002558 (8,4m, съемка видеокамерой BSA-304). Дата и время съемки: 14.10.2015 г., 14:29. Расстояние между звездами 0,5 угл. мин, размер снимка 3×3 угл. мин

круглосуточное наблюдение ближнего и дальнего космоса. В условиях наиболее трудной дневной визуализации звезд и космических объектов необходим оптимальный выбор матричного фотоприемника.

Исследования показали, что отношение сигнал/шум возрастает при увеличении глубины U потенциальной ямы пиксела фотоприемной матрицы. Лучшую проникающую способность визуализации продемонстрировали камеры RT-1000DC с наибольшей глубиной потенциальной ямы ($U = 170$ тыс. электронов) и BSA-304 ($U = 600$ тыс. электронов, получаемых за счет суммирования кадров). Такие камеры позволяют в условиях типично дневной турбулентности атмосферы на равнинной местности в северной полушере неба наблюдать звезды слабой яркости (7m–8m), которая в 5–10 раз ниже порога восприятия невооруженным глазом в условиях наблюдения на темном ночном небе.

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНО-ВРЕМЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОГО HF/DF-ЛАЗЕРА

Исследован спектр излучения HF/DF-лазера, состоящий из нескольких десятков отдельных спектральных линий, с целью использования лазера для мониторинга атмосферы. Детально изучены спектрально-временные параметры излучения лазера, определены зависимости энергии и мощности лазерного импульса от времени. Зарегистрированы интегральный спектральный состав излучения и состав излучения в различные моменты лазерного импульса. Определена задержка начала излучения на разных переходах относительно начала лазерного импульса. Длительность импульса излучения отдельной спектральной линии зависит, в первую очередь, от вращательного квантового числа и практически не зависит от колебательного квантового числа.



Зависимость длительности импульса генерации по уровню 0,5 амплитуды от вращательного квантового числа: ■ – 1–0, ◆ – 2–1, ▲ – 3–2, ● – 4–3

Экспериментальные данные помогут уточнить расчетно-теоретическую модель химического лазера, тем самым предоставив возможность более обоснованного подхода к созданию установок с повышенными выходными характеристиками излучения, а также послужат совершенствованию методов применения химических лазеров для мониторинга атмосферы.

СВЕРХМОЩНЫЕ ДИСКОВЫЕ ВЗРЫВОМАГНИТНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ВЫСОКИХ ПЛОТНОСТЕЙ ЭНЕРГИИ

В 2018 г. завершены работы по созданию дискового взрывомагнитного генератора (ДВМГ) малого класса с плоскими дисковыми модулями для исследований свойств веществ и моделирования физических процессов при высоких плотностях энергии и термоядерных исследований. Такие генераторы создают ток до



Дисковый взрывомагнитный генератор малого класса перед подрывом

60 МА за время 4 мкс при выходной энергии более 20 МДж. При сохранении выходных характеристик ДВМГ с профилированными дисками коэффициент преобразования внутренней энергии взрывчатого вещества в электромагнитную энергию ДВМГ с плоскими модулями в два раза выше. Эти ДВМГ более быстродействующие, технологичные и менее дорогостоящие.

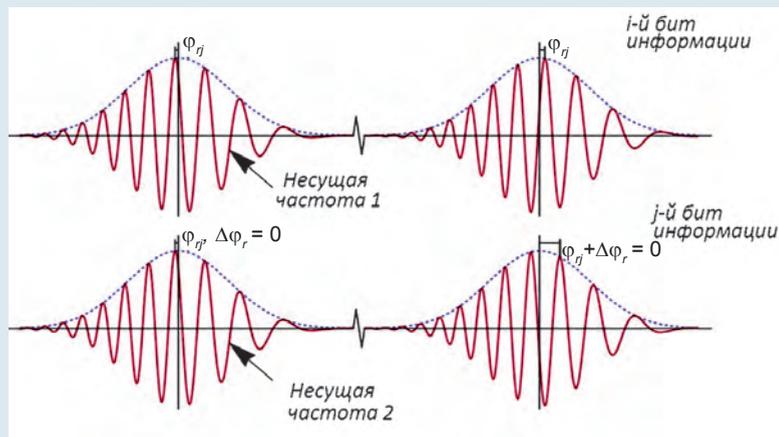
ОРГАНИЗАЦИЯ ЗАЩИЩЕННОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Предложен способ организации защищенной оптической связи в свободном пространстве, основанный на восстановлении информации из интерференции двух широкополосных chirпированных (упорядоченных по частоте) лазерных импульсов на поверхности приемника. Перехват информации через рассеянное излучение в данном случае становится невозможным, так как данные закодированы в разности фаз двух лазерных пучков, а интерференция возникает только при перекрытии коротких лазерных импульсов во времени. Таким образом, устройство

связи, работающее на описанном принципе, не нуждается в дополнительном канале для передачи ключа и способно осуществлять передачу данных со скоростью до 100 Мбит/с.

ПИКОСЕКУНДНАЯ РЕНТГЕНОГРАФИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СВЕРХПЛОТНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ

Предложена конструкция и проведен расчет оптимальных параметров источника рентгеновского излучения для диагностики сжатого состояния лазерной плазмы при условиях, необходимых для термоядерного синтеза. Такой источник, работающий в импульсном режиме, предназначен для определения пространственного распределения плотности лазерной плазмы с высоким временным разрешением путем многокадровой (импульсы проходят с заданным временным интервалом) просветки основной мишени рентгеновскими импульсами, получаемыми при облучении вторичной мишени лазерными импульсами пикосекундного диапазона длительности.



Фазовый сдвиг в chirпированном лазерном импульсе

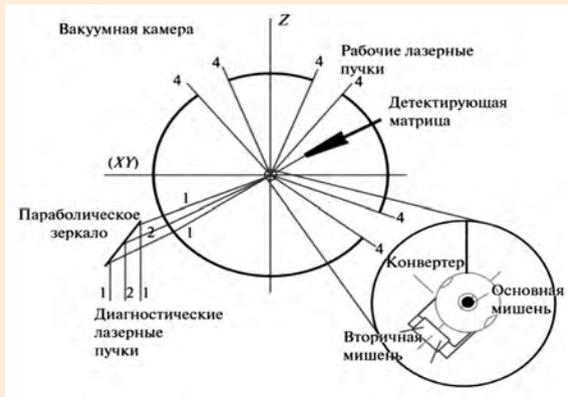
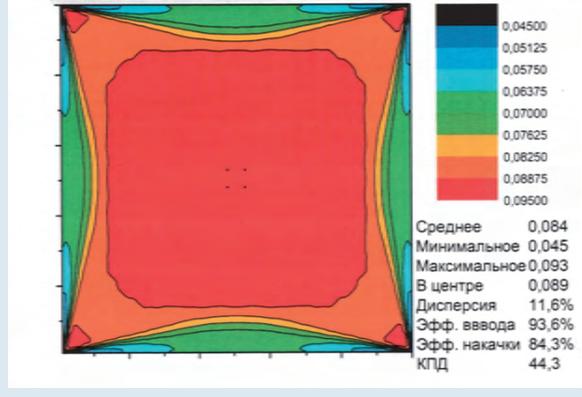


Схема рентгеновской диагностики сжатого состояния термоядерной мишени



Распределение усиления по поперечному сечению в активном элементе из фосфатного стекла размером 4,5×4,5 см²

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛЕНИЯ В ОБЪЕМЕ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО АКТИВНОГО ЭЛЕМЕНТА МОЩНОГО ЛАЗЕРА С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ

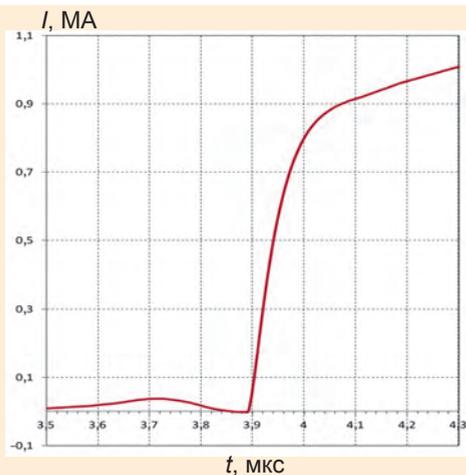
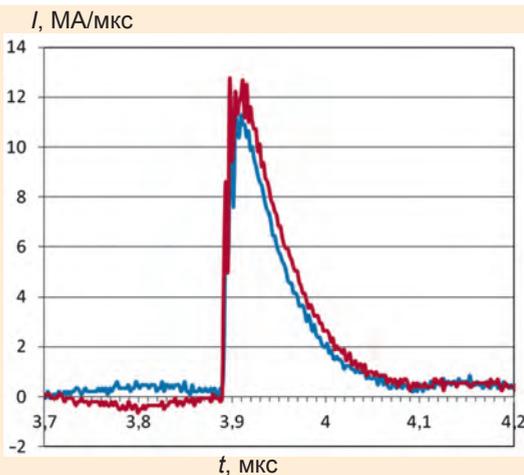
Предложена методика расчета пространственного профиля усиления в объеме твердотельного активного элемента высокоэнергетического лазера с накачкой диодными матрицами, учитывающая особенности диаграммы направленности излучения полупроводниковых лазеров. С помощью данной методики получен профиль усиления в активном элементе из неодимового стекла. На примере стерж-

ня прямоугольного сечения 4,5×4,5×25 см показано, что, варьируя параметры системы накачки, можно задавать профиль усиления, например, однородный по сечению (с уровнем неоднородности менее 2,5 %) с максимумом в центре или периферийных областях при удельном энергокладе ~1 Дж/см³.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ФОРМИРОВАНИЮ МЕГААМПЕРНОГО ИМПУЛЬСА ТОКА С ФРОНТОМ НАРАСТАНИЯ 100 НС

Отработана схема формирования импульса тока

с фронтом нарастания 100 нс на электрофизической установке КАСКАД. Основные элементы схемы: малоиндуктивный электровзрывной размыкатель тока (МЭВРТ) и твердотельный разрядник. Импульс напряжения на электроды разрядника подавался от МЭВРТ. Разрядник сработал при напряжении 120 кВ. В индуктивной нагрузке 10 нГн сформирован импульс тока с фронтом нарастания ~100 нс от нуля до 0,8 МА.

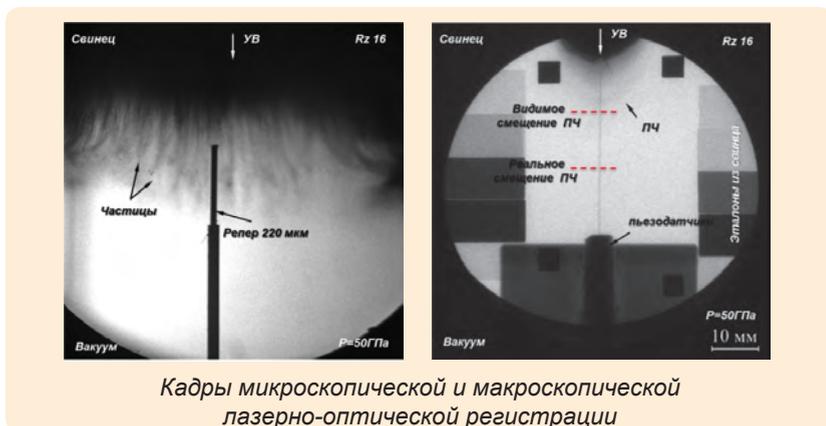


Производная импульса тока (а), ток в нагрузке (б) – интеграл по датчику Iw_2 ; — датчик Iw_1 (МА/мкс), — датчик Iw_2 (МА/мкс)

ИНСТИТУТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ГАЗОДИНАМИКИ И ФИЗИКИ ВЗРЫВА (ИФВ)

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА УДАРНО-ВОЛНОВОГО ПЫЛЕНИЯ

С целью обеспечения экологической безопасности при проведении исследований процесса ударно-волнового пыления при давлениях до ~ 50 ГПа в ИФВ создан испытательный комплекс на основе взрывозащитных герметичных камер (капсулы, малогабаритной взрывозащитной и защитной камеры), позволяющий проводить испытания с массой ВВ в нагружающем устройстве до ~ 200 г ТЭ. В 2018 г. с использованием комплекса проведена серия экспериментов с образцами из свинца и меди. В экспериментах для регистрации

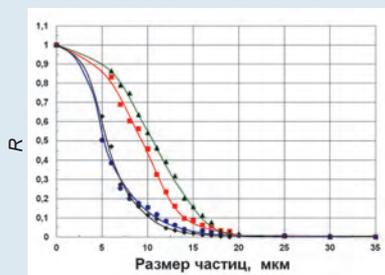


параметров выброса частиц использовали комплекс методик газодинамических измерений (лазерно-оптическая съемка, импульсная рентгенография, лазерно-оптическая методика гетеродин-интерферометра и пьезоэлектрических датчи-

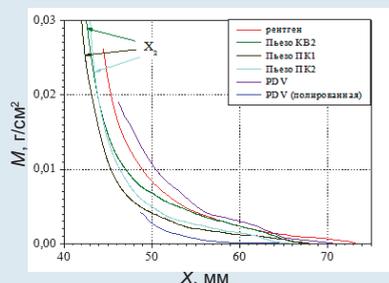
ков давления). Испытательный комплекс позволяет получить информацию о распределении скоростей и плотности потока частиц в направлении движения, удельной массе частиц в потоке и их характерных размерах.



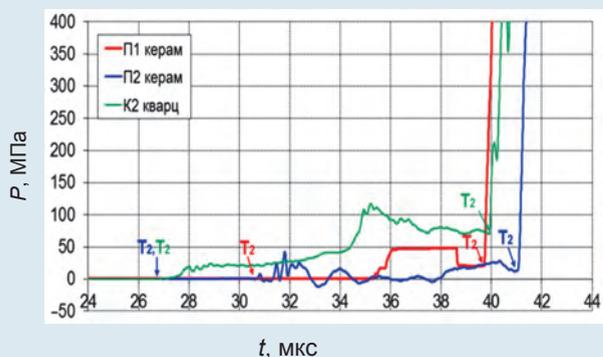
Внешний вид испытательного комплекса



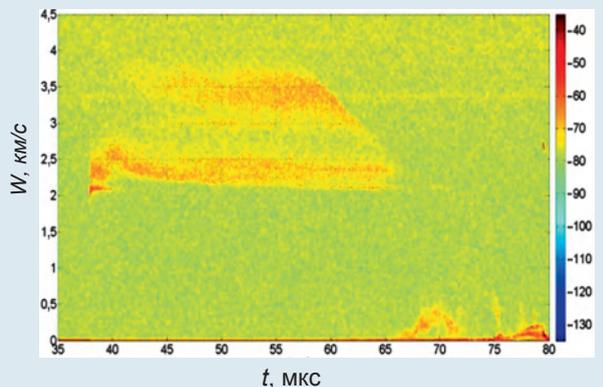
Распределение частиц по размерам



Распределение плотности потока частиц в направлении движения



Измерение давления пылевого потока пьезоэлектрическими датчиками



Спектрограмма скоростей движения ударника и пылевых потоков

ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВА БЕРИЛЛИЯ

Получены экспериментальные данные по продольной и объемной скорости звука, а также коэффициенту Пуассона бериллия различных марок в диапазоне давлений ударной волны (УВ) 6–61 ГПа методом обратного удара. Движущийся образец из бериллия толщиной ~2 мм тормозился на преграде из LiF. С помощью лазерных интерферометров VISAR регистрировался профиль скорости контактной границы Be–LiF. В опытах использовались взрывные нагружающие устройства и пороховая нагружающая установка калибром 100 мм (ПНУ-100).

Как видно из графика, зависимость коэффициент Пуассона от интенсивности УВ $\nu(\sigma_x)$ имеет характерный излом в области давления УВ 20 ГПа, что, возможно, указывает на наличие полиморфного α - β -фазового превращения. Похожий характер зависимости $\nu(\sigma_x)$ получен для бериллия марки S200F в работе M. D. Knudson (Сандийская национальная лаборатория). Совокупность результатов позволяет объяснить ранее наблюдавшиеся «аномалии» в поведении бериллия при ударно-волновом нагружении, а именно неоправданно высокую пластичность, аномально образование в режиме сдвиговой неустойчивости Кельвина – Гельмгольца, образование «кавитационных» отверстий в режиме цилиндрической фокусировки ударных волн.

На основании данных, полученных в 2018 г., разработана новая релаксационная модель сдвиговой прочности бериллия различных марок, учитывающая деформационное и компрессионное упрочнение, термическое разупрочнение,

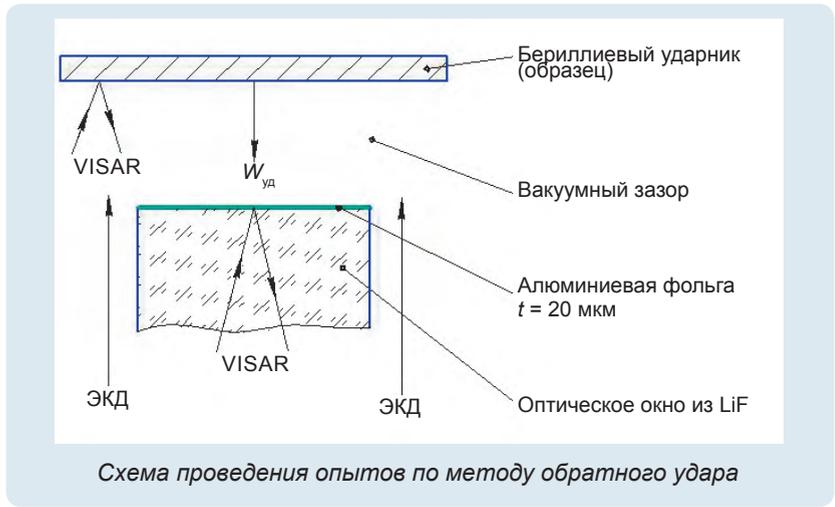
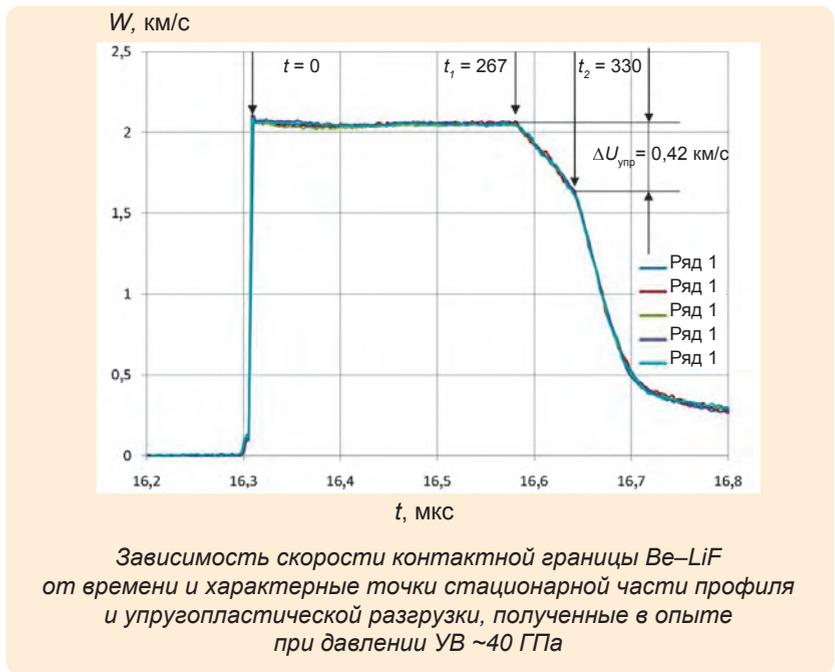


Схема проведения опытов по методу обратного удара



Зависимость скорости контактной границы Be–LiF от времени и характерные точки стационарной части профиля и упругопластической разгрузки, полученные в опыте при давлении УВ ~40 ГПа

скорость деформирования и релаксацию упругих напряжений. В отличие от известных моделей деформирования новая модель учитывает зависимость коэффициента Пуассона от текущей температуры и давления и кратковременное разупрочнение в сильных ударных волнах. Это позволило описать ряд экспериментов, проведенных в последние годы.

Основные уравнения модели:

- динамический предел текучести $Y_d = 3G\dot{\epsilon}_i - \frac{Y_d - Y_S}{\tau}$;
- время релаксации упругих напряжений

$$\tau = \frac{\tau_0(1 - \bar{T})}{\left(1 + \frac{\dot{\epsilon}_i}{\dot{\epsilon}_{i0}}\right)^{0,5}}, \tau_0 = 2 \cdot 10^{-6},$$

$$\dot{\epsilon}_{i0} = 1\bar{n}^{-1}, \bar{T} = T / T_m.$$

($\dot{\epsilon}_i$ – скорость деформации);
– стационарный предел текучести $Y_S = Y_S(1 + f_1)f_2(t) \frac{G}{G_0}$,

$$Y_0 = 0,36 \text{ ГПа}, G_0 = 156 \text{ ГПа},$$

(G – модуль сдвига);
– функция деформационного упрочнения

$$B1: \epsilon_0 = 0,$$

$$BB1: \epsilon_0 = 0,05;$$

– функция кратковременного разупрочнения

$$f_2(t) = \frac{1}{0,1} \varphi_2(\dot{\varepsilon}_i) \dot{\varepsilon}_i f_2 + \frac{1-f_2}{\tau_S},$$

$$\tau_S = 5 \cdot 10^{-7} \text{ с}$$

(τ_S – время установления гомогенной температуры),

$$\varphi_2 = 1 - e^{-\dot{\varepsilon}_i \tau_S}, \quad \dot{\varepsilon}_i = 2 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$$

– коэффициент Пуассона

$$\nu = 0,5 - 0,22 \cdot \left(1 + e^{-\left(0,3 \frac{T}{1+T_\Phi}\right)^4} \right) \times \left(1 - \left(\frac{T}{T_m} \right)^6 \right),$$

$T_\Phi = 1520 - 38,75P - 3,125P^2$ – линия фазового перехода в бериллии (P – давление).

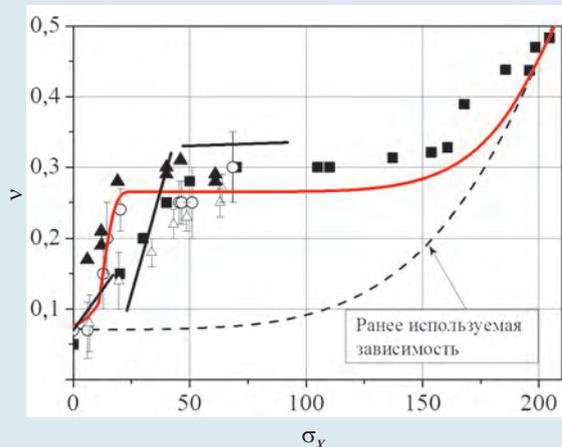
С использованием новой релаксационной модели сдвиговой прочности бериллия удалось также удовлетворительно описать полученные ранее данные по развитию заданных возмущений на нагружаемой границе ускоряемого бериллиевого лайнера в разных режимах нагружения. На графиках приведены расчетные зависимости амплитуды возмущений (A) от пройденного пути (S) и экспериментальные данные, полученные во ВНИИЭФ при ударном

и безударном нагружениях давлением ~ 50 ГПа.

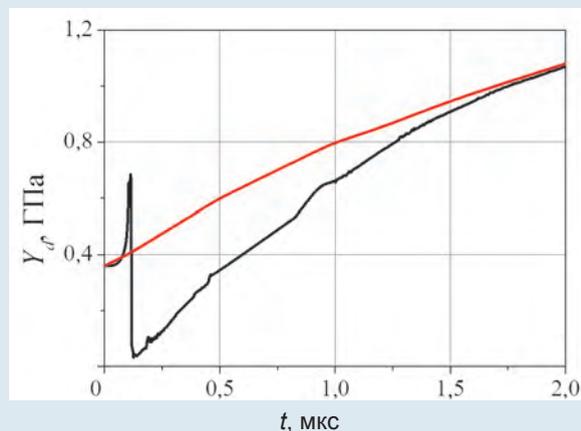
Ранее описать рост возмущений в бериллии при ударно-волновом и безударном нагружении с использованием одной модели не удавалось.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ПОРАЖАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ СНАРЯДОФОРМИРУЮЩЕГО ЗАРЯДА

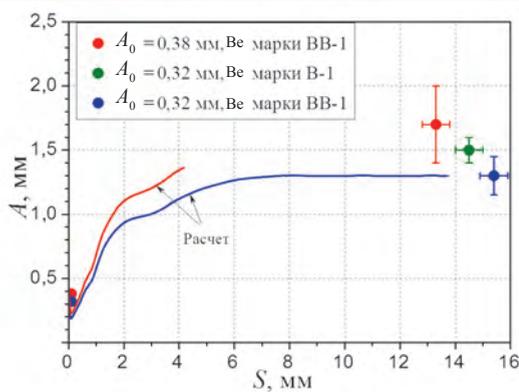
В 2018 г. в ИФВ разработана и внедрена в гидродинамический код широкодиапазонная релаксационная модель упругопластического деформирования меди. Данная модель



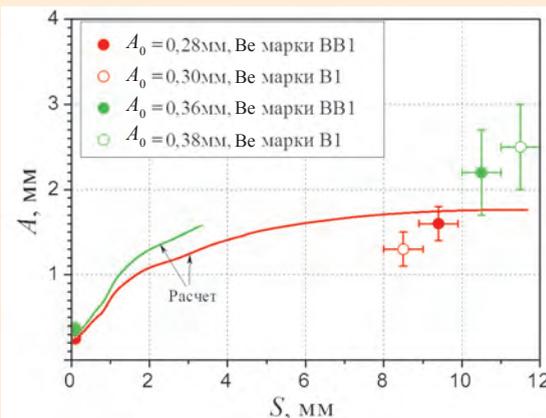
Зависимость коэффициента Пуассона от давления в УВ: — — расчетная зависимость; ○, △, ▲ — данные ВНИИЭФ; ■ — данные Сандийской национальной лаборатории (M. Knudson); — — данные ВНИИЭФ



Зависимость динамического предела текучести бериллия от времени при ударном нагружении бериллия до 50 ГПа с учетом (—) и без учета (—) кратковременного разупрочнения



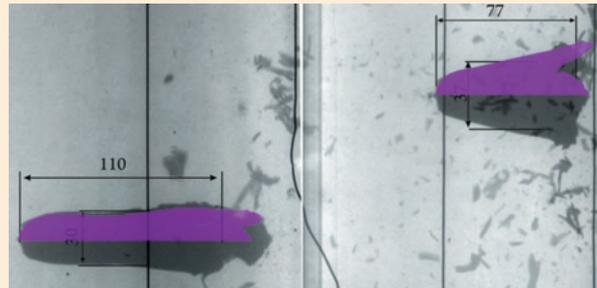
Ударно-волновое нагружение



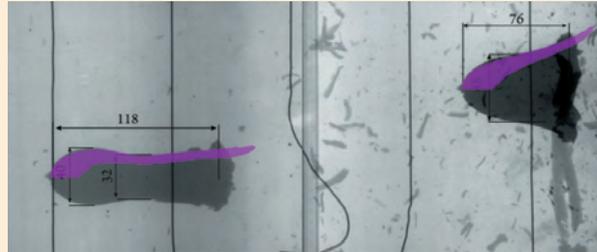
Безударное нагружение

Зависимость роста амплитуды возмущений на границе лайнера от пройденного пути

построена с учетом основных процессов, сопровождающих деформирование материалов: деформационного и компрессионного упрочнения, снижения прочности при гомогенном разогреве среды, временно-го разупрочнения за фронтом ударной волны, изменения механизма пластического деформирования, отжига при длительном воздействии повышенных температур. По результатам специализированных экспериментов подобраны параметры модели для меди марки М0. С помощью данной модели без дополнительных корректировок параметров удалось удовлетворительно описать сложный процесс формирования поражающего элемента снарядоформирующего заряда.



а



б

Экспериментальная и расчетная форма поражающего элемента в двух опытах: формирование поражающего элемента за счет процесса «натекания» материала оболочки (а) и за счет процесса «выворачивания» оболочки (б)

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПРОНИКАНИЯ ГАЗА В ДИСПЕРГИРОВАННЫЙ СВИНЕЦ

Исследован процесс сжатия ксенона свинцовым лайнером диспергированным после его нагружения нестационарной ударной волной амплитудой ~40 ГПа с градиентом давления за фронтом ~80 ГПа/см. При разгрузке свинец переходил в жидкое состояние, испытывал множественное откольное разрушение и диспергирование значительной части металла. Газ, сжимаемый диспергированным свинцом, может частично проникать в него.

Цель исследований – выяснение факта затекания газа внутрь диспергированного свинца и оценка массы газа, проникшего внутрь.

В экспериментах с помощью установки мягкого спектра гамма-квантов «Страус-Р» регистрировалось состояние свинцового образца после разгрузки в зазор шириной 25 мм при следующих условиях:

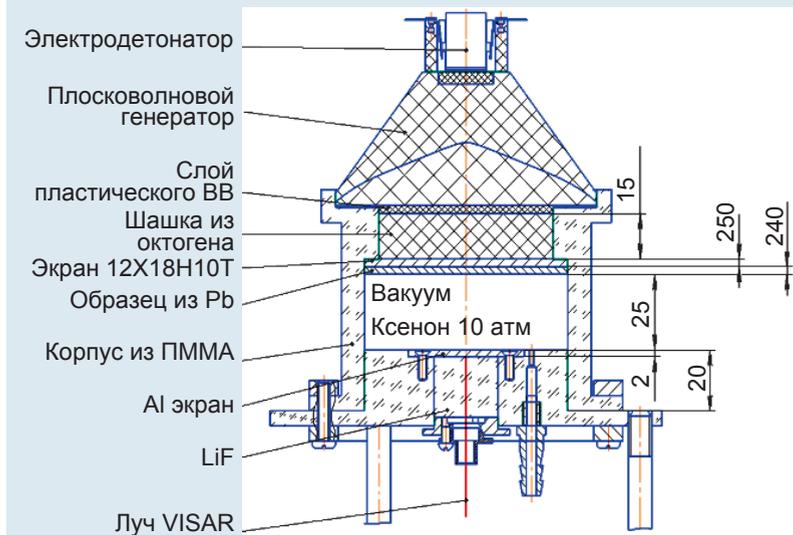


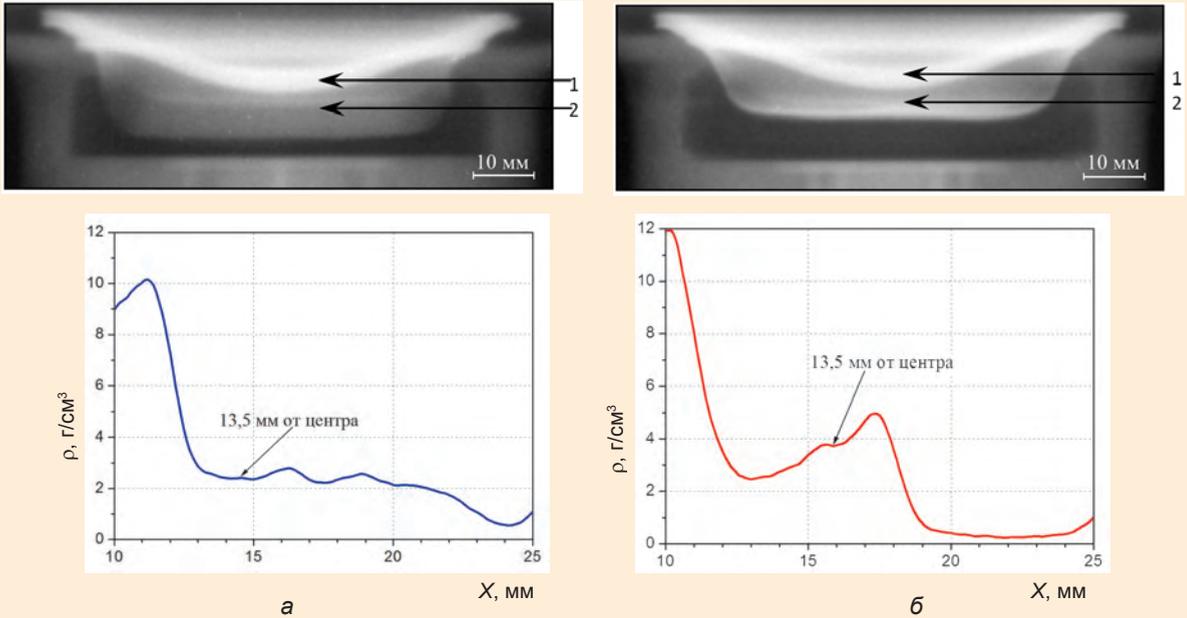
Схема экспериментальной сборки

- зазор вакуумировался до остаточного давления 0,1 атм.;
- зазор заполнялся ксеноном под давлением 10 атм.

На основании рентгеновских изображений оценивалось распределение плотности в диспергированном свинце.

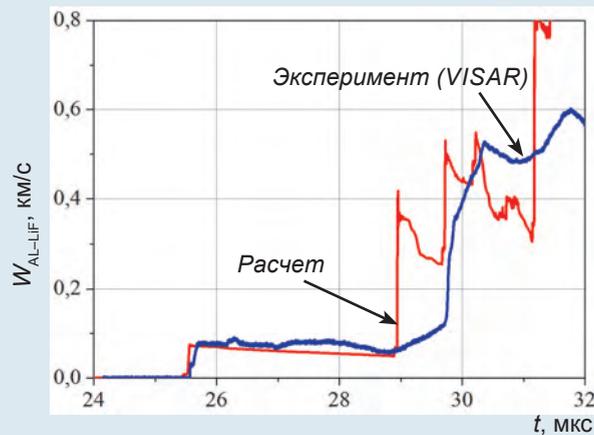
Рентгенографические измерения дополнялись измерением скорости свободной поверхности образца, скорости УВ

в ксеноне и скорости контактной границы Al–LiF с помощью лазерных доплеровских методов. Для сравнения были проведены аналогичные опыты с заменой свинцового лайнера на стальной. В этом случае сталь не плавилась после нагружения и не диспергировалась, поэтому затекания газа в этих экспериментах заведомо не происходило.

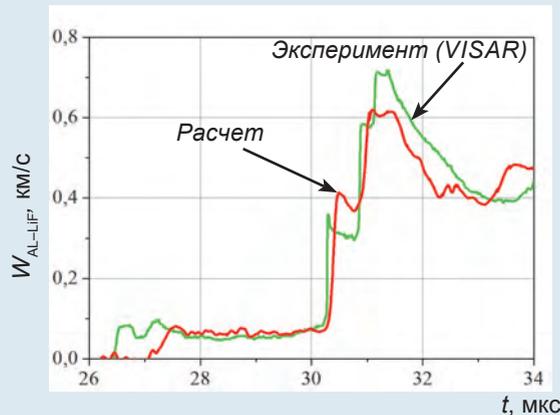


Результаты экспериментов (рентгеновские снимки и графики зависимости) при расширении свинца в вакуумированный зазор (а) и зазор, заполненный ксеноном при начальном давлении 10 атм (б):
1 – сталь + свинец, 2 – диспергированная часть свинцового образца

Как видно из графика, в опыте со стальным (недиспергированным) лайнером после первой ударной волны по алюминию проходят еще две волны, отраженные от границы Хе–Fe, что соответствует расчету. В опыте со свинцовым лайнером отраженных ударных волн не наблюдается и картина движения алюминиевого экрана сильно отличается от расчетной. Это обусловлено тем, что часть газа проникла в диспергированный свинец и четкой границы Хе–Pb не существует. Об этом же свидетельствуют результаты импульсного рентгенографирования состояния системы в момент сжатия ксенона диспергированным свинцом. Как видно из графиков распределения плотности, свинец не компактируется при взаимодействии с ксеноном до начальной плотности 11 г/см^3 , а представляет собой область с плотностью не выше 5 г/см^3 , что объясняется наличием ксенона между частицами диспергированного свинца. Численных методов расчета этого процесса пока не существует.



Экспериментальная и расчетная зависимости скорости движения границы Al–LiF от времени при сжатии ксенона диспергированным свинцом



Экспериментальная и расчетная ($\rho_0 = 0,055 \text{ г/см}^3$, $\gamma = 1,4$) зависимости скорости движения границы Al–LiF от времени при сжатии ксенона стальным лайнером

ВЗРЫВЧАТЫЕ ВЕЩЕСТВА

В 2018 г. отделом химии и технологии взрывчатого вещества (ВВ) ИФВ разработан способ неравновесной перекристаллизации ВВ из газовой фазы, позволяющий получать частицы ВВ в форме наноструктурированных кристаллитов, состоящих из большого числа кристаллов толщиной 200–800 нм.



На рисунке на примере ТЭНа показано изменение кристаллической формы в зависимости от условий кристаллизации. Видно, что увеличение степени неравновесности кристаллизации приводит к формированию более дискретной структуры, состоящей из множества мелких кристаллов.

Достоинство разработанного способа перекристаллизации ВВ – возможность управления размерами кристаллов путем изменения технологических параметров перекристаллизации ВВ. Способ обеспечивает получение поликристаллических частиц ВВ, состоящих из большого числа монокристаллов, что приводит к повышению детонационной способности ВВ и взрывчатых составов на его основе. Большое число границ раздела кристаллов в поликристаллической частице ВВ обеспечивает высокую реакционную способность, недостижимую при классической технологии перекристаллизации. С использованием поликристаллических ВВ возможно получение взрывчатых составов с уникальным сочетанием свойств. Так, пластичный взрывчатый состав, состоящий из гексогена с небольшим количеством инертной связки, имеет критическую толщину детонирующего слоя 1,5 мм, а такой же состав, но изготовленный из наноструктурированного поликристаллического гексогена, имеет критическую толщину менее 0,3 мм.

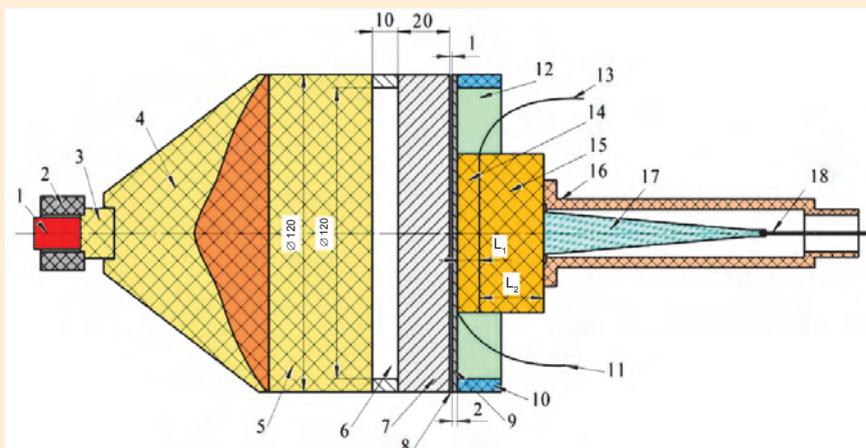
На изобретение «Способ управляемой перекристаллизации взрывчатых веществ» оформлено техническое реше-

ние. Изобретение может применяться во всех областях техники, где требуется получение взрывчатых веществ и взрывчатых составов на их основе с высокой детонационной способностью.

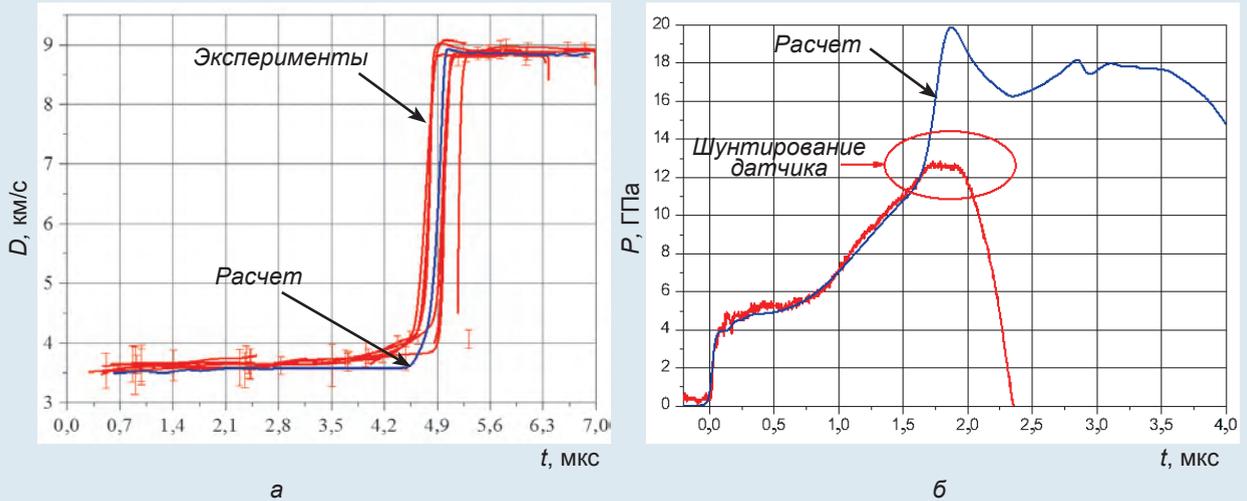
КИНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЕТОНАЦИИ С УЧЕТОМ РАЗОГРЕВА «ГОРЯЧИХ ТОЧЕК»

В 2018 г. разработана и внедрена в гидродинамический код кинетическая модель детонации состава на основе октогена с учетом разогрева «горячих точек». Именно расчет разогрева очага за счет объемной экзотермической реакции разложения является принципиальным отличием предложенной модели. По результатам специальных экспериментов подобраны параметры модели. Проведено численное моделирование опытов по исследованию возбуждения детонации ударными волнами малой интенсивности.

С помощью предложенной модели удалось в единой манере удовлетворительно описать результаты всех серий опытов, выполненных в разных постановках. Это дает основание сделать вывод о перспективности



Эскиз экспериментальной сборки: 1 – электродетонатор; 2 – розетки; 3 – запальная шашка; 4 – плосковолновой генератор; 5 – активный заряд ВВ; 6 – воздушный зазор; 7 – экран № 1; 8 – воздушный зазор; 9 – экран № 2; 10 – корпус; 11, 13 – манганиновый датчик; 12 – обложка; 14, 15 – исследуемые образцы; 16 – корпус; 17 – излучатель; 18 – диэлектрический волновод



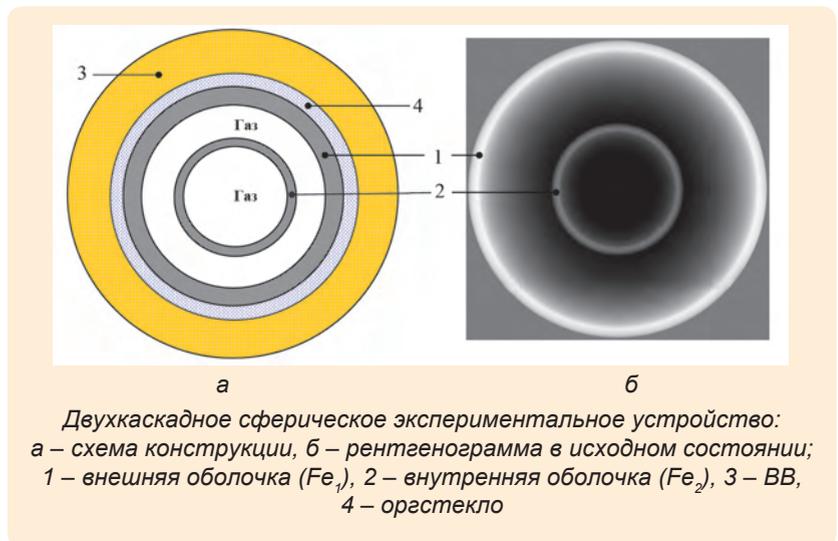
Сравнение экспериментальных и расчетных временных зависимостей скорости ударной волны (а) и давления в ВВ (б)

развития данной модели с точки зрения ее применения для численного моделирования возбуждения детонации в твердых взрывчатых веществах.

КВАЗИИЗОЭНТРОПИЧЕСКАЯ СЖИМАЕМОСТЬ ГАЗООБРАЗНОГО ГЕЛИЯ ПРИ ДАВЛЕНИИ ~ 10 ТПа

С использованием сферической двухкаскадной камеры и блока взрывчатого вещества (ВВ) массой 85 кг ТЭ проведены два эксперимента: в одном неидеальная плазма гелия сжималась давлением $P \sim 10000$ ГПа до плотности $\rho \sim 11$ г/см³, в другом неидеальная плазма дейтерия сжималась давлением $P \sim 18500$ ГПа до плотности $\rho \sim 14$ г/см³.

В эксперименте с гелием теневое изображение границ оболочек, сжимающих исследуемый газ, получено при одновременном использовании тормозного излучения трех мощных бетатронов, работающих в режиме последовательной генерации трех импульсов рентгеновского излучения. В опыте использовалась индивидуальная оптико-электронная система детектирования,



Двухкаскадное сферическое экспериментальное устройство: а – схема конструкции, б – рентгенограмма в исходном состоянии; 1 – внешняя оболочка (Fe_1), 2 – внутренняя оболочка (Fe_2), 3 – ВВ, 4 – оргстекло

которая активируется синхронно с импульсами бетатрона.

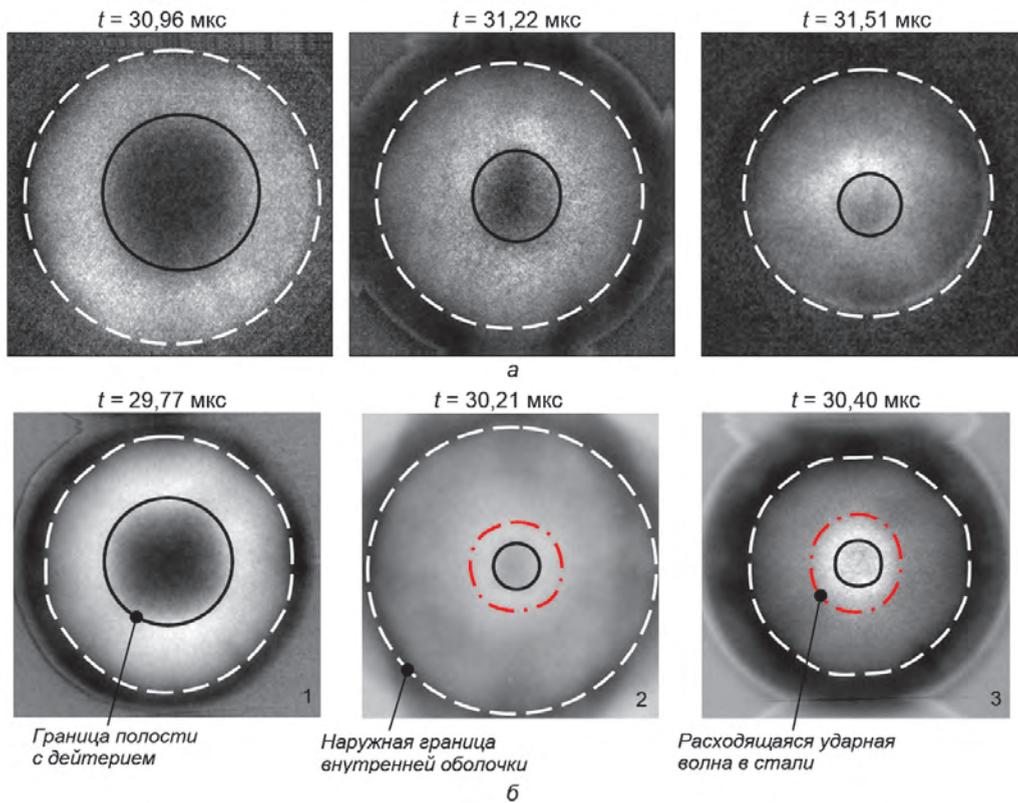
При исследовании сжимаемости дейтерия впервые в качестве источника излучения вместо одного из бетатронов применялся сильноточный ускоритель ЛИУ-Р-Т с граничной энергией электронов 12 МэВ и просвечивающей способностью объектов массовой толщиной до 280 г/см². Плотность неидеальной плазмы дейтерия и гелия определена по измеренному радиусу оболочки в момент ее «остановки». Давление сжатой плазмы получено на основе газодинамических расчетов, учитываю-

щих реальные характеристики экспериментального устройства.

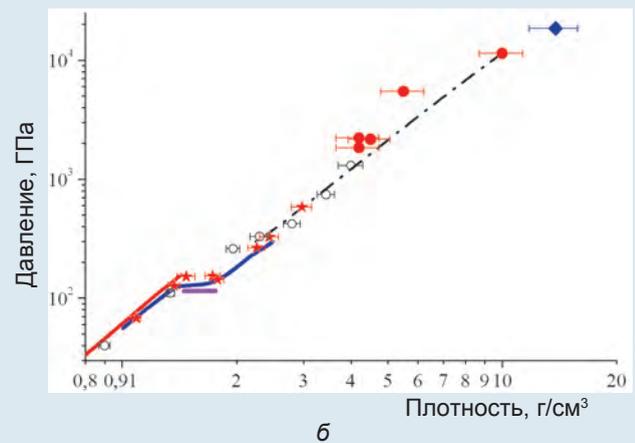
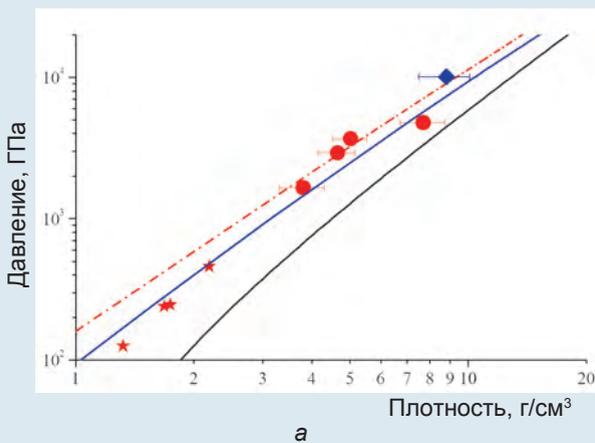
На основании газодинамических расчетов можно сделать следующие выводы:

- в момент максимального сжатия в гелиевой плазме реализуется давление $P_{вс} = 10062$ ГПа и температура $T = 94900$ К при измеренной плотности сжатой плазмы $\rho = (8,8 \pm 1,3)$ г/см³ и сжатии $\sigma = \rho/\rho_0 \approx 240$;

- в момент максимального сжатия в дейтериевой плазме реализуется давление $P_{вс} = 18500$ ГПа и температура $T = 56800$ К при измерен-



Результаты экспериментов по квазиизэнтропическому сжатию плазмы гелия и дейтерия давлением $P \sim 10000$ и 18500 ГПа соответственно: а – рентгенограммы сжатой полости оболочки (2) с плазмой гелия; б – рентгенограммы сжатой полости оболочки (2) с плазмой дейтерия; кадры № 1 и № 3 – источник излучения БИМ234.300, кадр № 2 – источник излучения ЛИУ-Р-Т



Квазиизэнтропическая сжимаемость плазмы гелия (а) и дейтерия (б).

Эксперименты: \blacklozenge – настоящая работа; \bullet , \star , \circ – данные ВНИИЭФ (устройства цилиндрической и сферической геометрии); — , — – теоретические расчеты, предсказывающие фазовый переход в плазме сжатого дейтерия. Изэнтропы: --- – $S = 23,5$ Дж/г·К, - - - – $S = 26$ Дж/г·К; относительная удельная энтропия: 1 – $S/R = 14,9$; 2 – $S/R = 16,3$; 3 – $S/R = 0$

ной плотности сжатой плазмы $\rho = (13,8 \pm 2,0)$ г/см³ и сжатии $\sigma = \rho/\rho_0 \approx 460$.

Критерием истинности приведенных значений давления

является хорошее совпадение экспериментальных данных и расчетных $R(t)$ -диаграмм.

В лабораторных экспериментах по многократному ударному сжатию газообразных дейтерия и гелия достигнуты состояния, превышающие

предполагаемые параметры в таких планетах-гигантах Солнечной системы, как Юпитер и Сатурн. Анализ разработанной методологии позволяет надеяться на возможность исследований квазиизоэнтропической сжимаемости неидеальной плазмы гелия во ВНИИЭФ до давлений $P \sim 20000$ ГПа.

РАДИОГРАФИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

Силами сотрудников ИФВ, ИЯРФ и НПЦФ введен в опытную эксплуатацию радиографический комплекс (РГК), предназначенный для решения задач диагностики динамических объектов массовой толщиной до 280 г/см^2 методом многокадровой и многоракурсной импульсной радиографии в жестком тормозном излучении ускорителей электронов.

В состав РГК входят три стационарных циклических ускорителя БИМ234.3000, линейный индукционный ускоритель ЛИУ-Р-Т, расположенный соосно с центральным бетатроном, и система регистрации радиографических изображений.

Повышенная по сравнению с бетатронами комплекса более чем в 20 раз доза тормозного излучения, полученная на ЛИУ-Р-Т, позволит принципиально изменить качество диагностики динамических объектов значительной массовой толщины. Изображение полости типа «ромб» (см. рисунок) получено в системах формирования изображений БИМ234.3000 и ЛИУ-Р-Т за преградами равной массовой толщины, являющейся предельной для бетатронов комплекса.

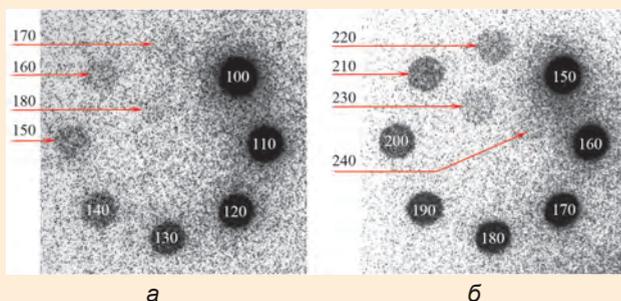
Несмотря на различную просвечивающую способность ускорителей РГК, их одновременное применение в однократном динамическом эксперименте позволит получить ин-

Технические характеристики РГК

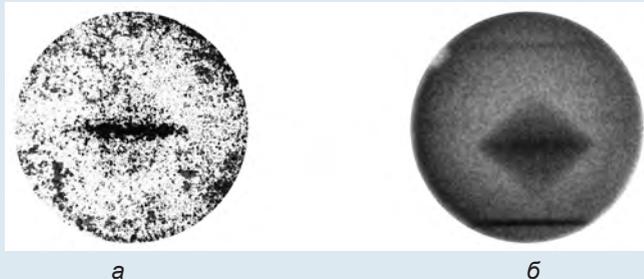
| Параметр | Значение |
|--|------------------------|
| Количество направлений просвечивания | 4 |
| Межракурсный угол | $0^\circ \pm 45^\circ$ |
| Количество импульсов излучения в одном ракурсе | 1–3 |
| Максимальное количество импульсов излучения в одном эксперименте | 10 |

Технические характеристики ускорителей РГК

| Параметр | БИМ234.3000 | ЛИУ-Р-Т |
|--|---------------|---------|
| Граничная энергия электронов, МэВ | 56 | 12 |
| Размер фокусного пятна, мм | 4×2 | ~4 |
| Длительность моноимпульса излучения, нс | ≤ 100 | ~48 |
| Длительность импульсов излучения в мультиимпульсном режиме, нс | 170, 160, 100 | – |
| Просвечивающая способность на 1 м, г/см | 230 | 280–290 |



Изображение свиного «дырочного» клина на расстоянии 4 м от мишеней в СФИ БИМ234.3000 № 3 (а) и ЛИУ-Р-Т (б). Система регистрации: сканер Agfa CR-30x, единственный фотохромный экран MS-3 + 2Pb по 1 мм, $S = 1600$ отн. ед.



Изображение полости типа «ромб» в шаре из ВНЖ $\varnothing 60$ мм за дополнительной преградой: а – БИМ234.300, б – ЛИУ-Р-Т. Суммарная массовая толщина объекта $\sim 190 \text{ г/см}^2$. Система регистрации: сканер Agfa CR-30x, единственный фотохромный экран MS-3 + 2Pb по 1 мм, $S = 1600$ отн. ед.

формацию, объем и ценность которой будут определяться сочетанием необходимых индивидуальных возможностей всех ускорителей комплекса.

Преимущества перед аналогами:

- получение до 10 рентгенографических изображений в трех ракурсах съемки в одном эксперименте;

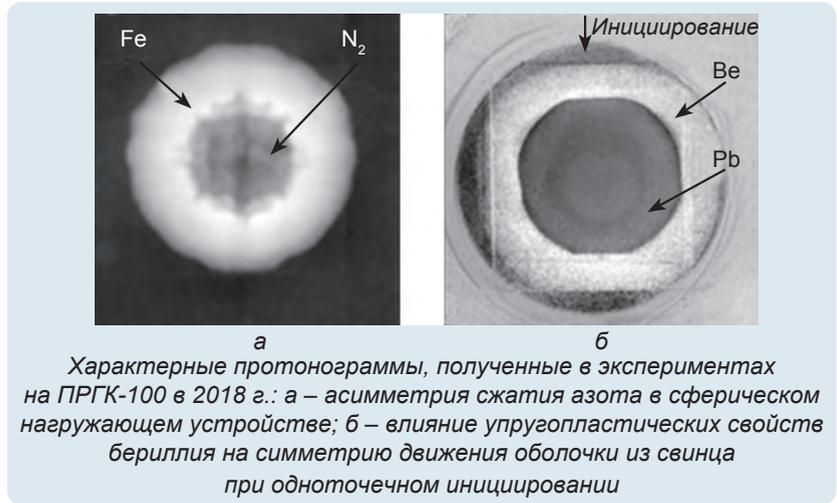
- просвечивание объектов массовой толщиной до 280 г/см² в ракурсе ЛИУ-Р-Т и до 230 г/см² в ракурсах бета-тронов;

- комплексная диагностика объекта с применением до 6 методик одновременно.

По совокупности параметров комплекс не имеет аналогов в ядерно-оружейном комплексе.

РАБОТЫ НА ПРОТОННОМ РАДИОГРАФИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ ПРГК-100

На протоннографическом комплексе ПРГК-100 проведены эксперименты, направленные на повышение функциональных возможностей комплекса, развитие методов регистрации и обработки протоннографических изображений, а также получение эксперимен-



Характерные протонограммы, полученные в экспериментах на ПРГК-100 в 2018 г.: а – асимметрия сжатия азота в сферическом нагружающем устройстве; б – влияние упругоэластических свойств бериллия на симметрию движения оболочки из свинца при одноточечном иницировании

тальных данных для совершенствования методик расчетов. С применением многокадровой протонной радиографии проведены исследования:

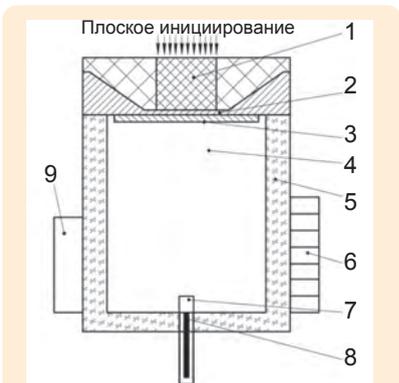
- количественных параметров потока частиц, выбрасываемых со свободной поверхности свинца при разгрузке в газ (ксенон);

- развития заданных возмущений и асимметрии сжатия газовой полости и применительно к задачам исследования квазиизоэнтропической сжимаемости газов и термоядерной плазмы в сферическом нагружающем устройстве;

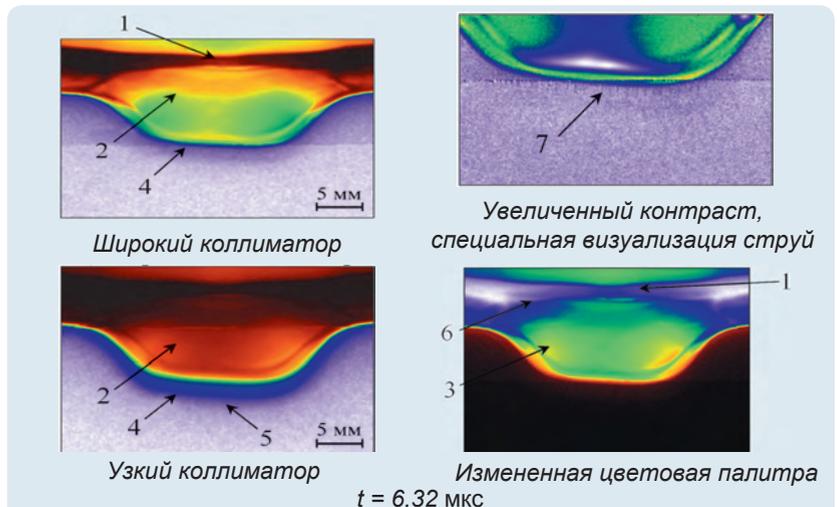
- струйного газодинамического течения;

- упругоэластических свойств бериллия в сферическом нагружающем устройстве при одноточечном иницировании.

На ПРГК-100 проведен опыт по исследованию ударно-волнового пыления с поверхности свинцового образца с заданной шероховатостью при разгрузке в газ (ксенон), находящегося в полости при атмосферном давлении. Для количественных измерений характеристик пылевого потока использовали три методики, работающие на разных физических принципах: радиографическую, пьезоэлектрическую и PDV. Получено удовлетворительное согласие



Эскиз сборки: 1 – заряд ВВ; 2 – сталь; 3 – образец из свинца; 4 – полость с ксеноном; 5 – корпус; 6 – оптический ступенчатый клин; 7 – пьезодатчики; 8 – датчики PDV; 9 – оптический клин, сектор

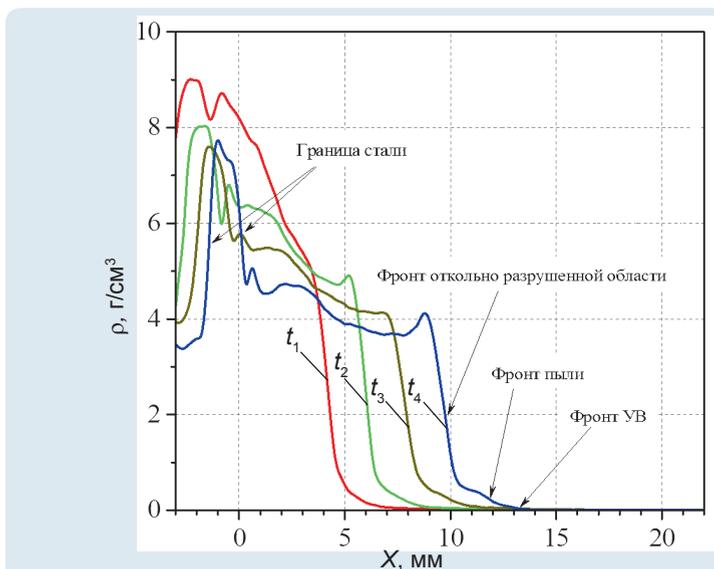


Фрагменты снимков взрывного процесса (псевдоцвет): 1 – сталь; 2 – откольно разрушенный образец; 3 – зона компактирования внутри откольно разрушенного образца; 4 – фронт пыли; 5 – фронт ударной волны в газе; 6 – свинец; 7 – струя

экспериментальных данных. В эксперименте зафиксировано полное диспергирование образца с образованием двух характерных областей: первая – область выброса со свободной поверхности частиц, взаимодействующих с газом; вторая область – диспергированный образец, образовавшийся в результате откольного разрушения.

РАЗРАБОТКА ВЗРЫВНЫХ РЕЖУЩИХ УСТРОЙСТВ

Завершены комплексные испытания взрывных режущих устройств, предназначенных для подводного демонтажа свайных опор морских нефтегазодобывающих платформ. Оработана принципиально новая схема взрывной резки стальной трубчатой конструкции с внешней стороны при условии наличия водной среды как снаружи, так и внутри трубы. На фотографиях показаны



Распределение плотности в различные моменты времени от выхода ударной волны на свободную поверхность: $t_1 = 2,36$ мкс; $t_2 = 3,35$ мкс; $t_3 = 4,35$ мкс; $t_4 = 5,33$ мкс

стадии зачетного эксперимента по наружной резке фрагмента свайной опоры – трубы $\varnothing 762 \times 45$ мм, размещенной в емкости с водой.

Основным преимуществом взрывных режущих устройств разработки ФГУП «РФЯЦ-

ВНИИЭФ» по сравнению с зарубежными аналогами является высокая эффективность реза, т. е. способность взрывным способом осуществлять демонтаж стальных толстостенных конструкций с использованием меньшего количества ВВ.



Сегментные заряды на трубе



Процесс заполнения водой



Общий вид кромки реза нижней части



Общий вид кромки реза верхней части

Эксперимент по взрывной резке трубы

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ И РАДИАЦИОННОЙ ФИЗИКИ (ИЯРФ)

ОПЫТНАЯ ОТРАБОТКА И ВВОД В ЭКСПЛУАТАЦИЮ РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКОГО УСКОРИТЕЛЯ ЛИУ-Р-Т

Проведена опытная отработка и осуществлен ввод в эксплуатацию сильноточного линейного индукционного ускорителя электронов ЛИУ-Р-Т в составе многолучевого радиографического комплекса. Оптимизирован режим работы и обеспечена требуемая стабильность выходных параметров ускорителя. В номинальном режиме функционирования установки граничная энергия электронов пучка составляет ~ 12 МэВ, амплитуда импульса тока 10–15 кА, длительность импульса тока на половине максимума 55–60 нс, длительность импульса тормозного излучения на полувысоте 45–50 нс. Доза тормозного излучения на расстоянии 1 м от мишени варьируется в пределах 150–300 Р при диаметре фокусного пятна источника излучения 3–5 мм.

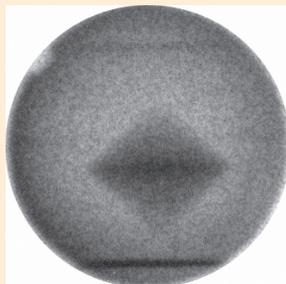
Отработан режим совместного функционирования ускорителя ЛИУ-Р-Т с бетатронами БИМ234.3000 для определения временных характеристик генерируемых рентгеновских импульсов и разброса момента срабатывания относительно запускающего импульса. Разброс срабатывания ускорителя ЛИУ-Р-Т с момента его запуска от стартового генератора пульта управления до появления импульса тормозного излучения не превышает ± 10 нс, а разброс его срабатывания относительно общего для всех установок и систем радиографического комплекса пускового импульса – не более ± 20 нс. Эксперименты по сравнению просвечивающей способности ускорителя ЛИУ-Р-Т и бета-



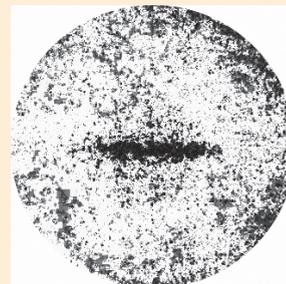
Ускоритель ЛИУ-Р-Т



Пульт управления установкой



а



б

Рентгено снимки тест-объекта с полостью типа «ромб» в шаре из сплава ВЖ при просвечивании в одной позиции: а – ускорителем ЛИУ-Р-Т (доза 200 Р/имп. на расстоянии 1 м от мишени), б – бетатроном БИМ234.3000 (доза 20 Р/имп. на расстоянии 1 м от мишени)

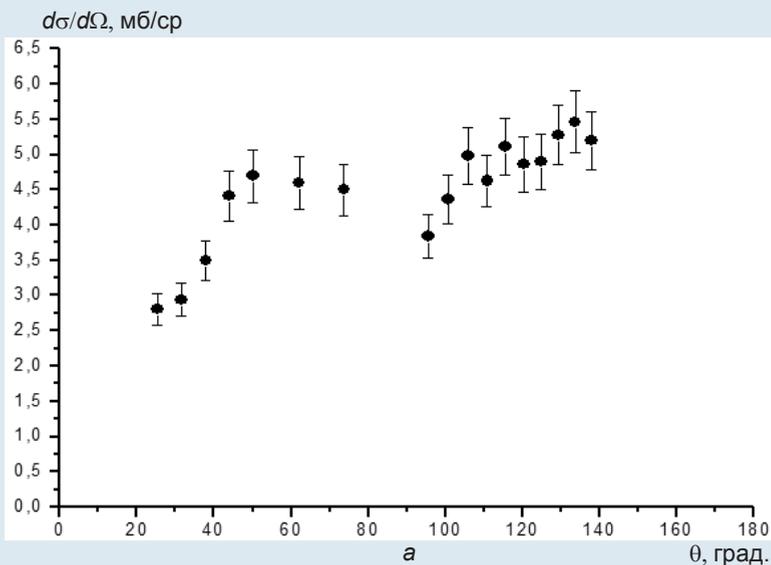
трона БИМ234.3000 продемонстрировали качественное улучшение возможностей метода импульсной рентгенографии в результате применения новой мощной рентгенографической установки.

ИЗМЕРЕНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ СЕЧЕНИЙ ОБРАЗОВАНИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ПРОТОНА С ЯДРОМ ${}^9\text{Be}$

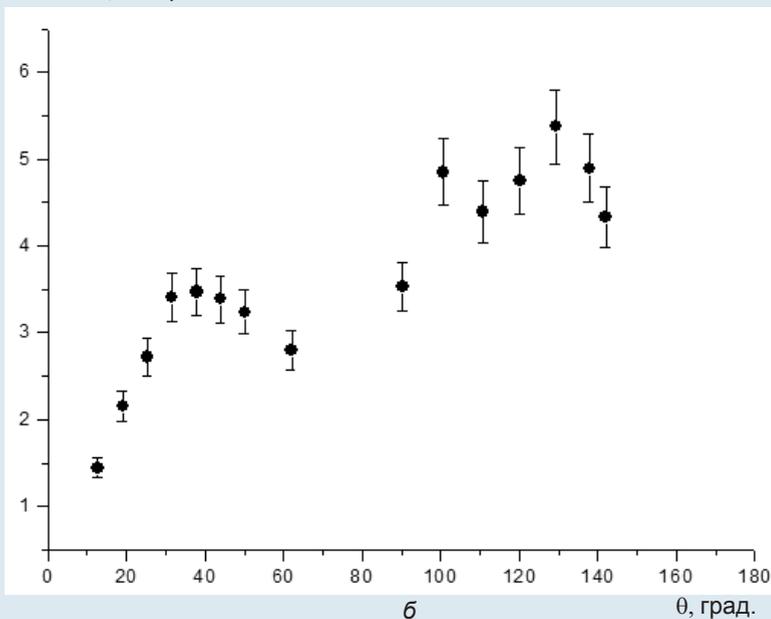
На ускорителе ЭГП-10 при энергии протонов $E_p = 7, 8, 9, 10$ МэВ в интервале углов от 15 до 160° с шагом $5-10^\circ$ с помощью « $\Delta E-E$ »-детекторов выполнены измерения спектров заряженных частиц, образующихся в реакции ${}^9\text{Be} + p$. Для измерений использованы мишени из ${}^9\text{Be}$ толщиной $250-400$ мкг·см $^{-2}$ на углеродной и алюминиевой подложках. Цель измерений – получение дифференциальных (по углу) сечений образования заряженных частиц реакций ${}^9\text{Be}(p, p_0){}^9\text{Be}$, ${}^9\text{Be}(p, p_2){}^9\text{Be}^*(2,43\text{МэВ})$, ${}^9\text{Be}(p, d_0){}^8\text{Be}$, ${}^9\text{Be}(p, \alpha_0){}^6\text{Li}$, ${}^9\text{Be}(p, \alpha_1){}^6\text{Li}^*(2,185\text{МэВ})$. Систематическая погрешность данных не превышает $8,6\%$, случайная – $4-8\%$. Данные по реакции ${}^9\text{Be}(p, \alpha_1){}^6\text{Li}^*(2,185\text{МэВ})$ при энергии протонов 8 и 9 МэВ получены впервые.

СОЗДАНИЕ САРОВСКОГО РЕСУРСНОГО ЦЕНТРА ПО ОБРАБОТКЕ ФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ В СОСТАВЕ ГЛОБАЛЬНОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ CERN LHC GRID

Начиная с 1997 г. РФЯЦ-ВНИИЭФ в составе международной коллаборации в CERN ведет научно-исследовательские работы по созданию, эксплуатации и модернизации электромагнитного калориметра PHOS эксперимента ALICE. Целью эксперимента



$d\sigma/d\Omega$, мб/ср



Дифференциальные сечения реакции ${}^9\text{Be}(p, \alpha_1){}^6\text{Li}^*(2,185\text{МэВ})$ при энергии протонов 8 МэВ (а), 9 МэВ (б)

ALICE является решение одной из фундаментальных задач современной физики – получение информации о структуре, происхождении и эволюции барионной материи Вселенной.

Опыт многолетнего и успешного сотрудничества РФЯЦ-ВНИИЭФ и CERN показал, что неперенным условием участия в подобных международных проектах является создание в РФЯЦ-ВНИИЭФ распределенного информационно-вычислительного комплекса

(ИВК). Такие ИВК работают в ведущих научных центрах России: НИЦ «Курчатовский институт», ОИЯИ (г. Дубна), МГУ, НИЯУ «МИФИ», ИЯИ РАН (г. Троицк), СПбГУ. В 2012 г. РФЯЦ-ВНИИЭФ инициировал работы по созданию аналогичного ИВК – Саровского ресурсного центра по обработке уникальных физических данных, поступающих с Большого адронного коллайдера, в составе глобальной вычислительной сети CERN LHC GRID.

В 2018 г. Саровский ресурсный центр на базе СарФТИ НИЯУ «МИФИ» введен в эксплуатацию. Он обеспечивает непрерывный и бесперебойный режим работы со скоростью обмена данными не хуже 1 Тбит/с. Саровский ИВК включает 9 расчетных серверов, 4 сервера для хранения информации и 18 рабочих мест суммарной мощностью более 500 ядер и объемом дискового пространства 400 Тбайт. Саровский ИВК вошел в состав российского консорциума RDIG (Russian Data Intensive GRID) и интегрирован в крупнейшую мировую сеть распределенных компьютерных вычислений WLCG с учетом всех требований CERN. Кроме того, Саровский ресурсный центр предоставил возможность специалистам РФЯЦ-ВНИИЭФ удаленно контролировать и управлять параметрами калориметра PHOS, находящимися в зоне непосредственной ответственности РФЯЦ-ВНИИЭФ.

В 2018 г. специалисты РФЯЦ-ВНИИЭФ участвовали в 44 сменах в качестве операторов эксперимента ALICE (контроль работоспособности и управление детекторами).

На конец октября 2018 г. по результатам работ в составе сообщества ALICE ученые и специалисты РФЯЦ-ВНИИЭФ являются соавторами более 190 публикаций в европейских научно-технических журналах, имеют один из самых высоких показателей индекса Хирша в Госкорпорации «Росатом».

СОЗДАНИЕ КОМПЛЕКСА ПО НАРАБОТКЕ ^{99}Mo МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ПЛОЩАДКЕ ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»

В соответствии с решениями Совета по развитию и глобализации Госкорпорации «Росатом» и НТС ЯОК во ВНИИЭФ



Телекоммуникационные шкафы с оборудованием



Рабочее место пользователя с оборудованием



Информационный сайт глобальной вычислительной сети CERN LHC GRID, отражающий текущие работы во входящих в сеть ИВК (на выноске – Саровский ресурсный центр: апрель–май – режим тестовой эксплуатации, с июля – работа в режиме нон-стоп)



реализуется проект «Аргус-М», целью которого является создание опытного образца производственного комплекса (ОО ПК) по наработке изотопа ^{99}Mo медицинского назначения, который включает исследовательскую ядерную установку (ИЯУ

типа «Аргус») на растворном топливе с технологической петлей для извлечения ^{99}Mo и радиохимическую лабораторию.

^{99}Mo – это короткоживущий радиоизотоп с периодом полураспада 66 ч, применяется для питания медицинской

аппаратуры – генераторов $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$, широко используемых при проведении однофотонной эмиссионной компьютерной томографии.

Особенностью проекта является наработка изотопа ^{99}Mo не в мишенных устройствах, а в самом топливном растворе реактора. ИЯУ должна обеспечить производство ^{99}Mo в количестве не менее 1200 Ки в неделю в виде изотопа, осажденного на сорбционной колонке реакторного устройства, что, в свою очередь, гарантирует получение в радиохимическом производстве ОО ПК препарата радионуклида ^{99}Mo в виде азотнокислого или водного раствора молибдата натрия с производительностью не менее 250 Ки/неделю (после шестидневной калибровки в аэропорту клиента с учетом не менее суток на доставку потребителю).

После работы в течение 6 суток реактор останавливают; топливный раствор выдерживается некоторое время для охлаждения и распада короткоживущих осколков деления, после чего поступает в сорбционную установку, где прокачивается через сорбционную колонку, заполненную селективным сорбен-

том типа «Термоксид-Т5», и возвращается в активную зону, при этом на сорбенте происходит осаждение ^{99}Mo .

Широкомасштабные эксперименты показали, что технология сорбции, первоначально заложенная в проекте, имеет следующие недостатки:

- низкую эффективность выделения ^{99}Mo из топливного раствора, не обеспечивающую требуемую производительность комплекса;
- высокую активность сорбционной колонки (~8000 Ки), в связи с чем предъявляются очень жесткие требования к «горячим» камерам и транспортному контейнеру;
- большой объем образующихся жидких и твердых радиоактивных отходов.

Для устранения этих недостатков в радиохимическом отделе ИЯРФ была разработана альтернативная технология, характеризующаяся:

- существенно меньшим объемом сорбента в сорбционной колонке;
- наличием этапа дополнительной промывки колонок в сорбционной установке раствором серной кислоты;
- передачей ^{99}Mo из сорбционной установки в радиохимическую лабораторию в виде

раствора по «транспортной» трубке и т. д.

Сопутствующий ^{99}Mo йод в «транспортной» трубке улавливается специальным фильтром. Часть осколков деления поступает в радиохимическую лабораторию с десорбирующим раствором, а основная масса – после промывки сорбционной колонки кислотой в сорбционной установке. После выдержки жидкие отходы переводят в твердую форму и утилизируют. Оставшаяся на сорбционной колонке активность осколков деления после небольшой выдержки спадает до уровня, безопасного для перевозки сорбционной колонки в защитном контейнере в радиохимическую лабораторию с целью подготовки к ее повторному использованию.

Внедрение разработанной технологии не только позволит решить проблему высокоактивных продуктов деления, но и обеспечит более высокие параметры выделения ^{99}Mo по сравнению с проектной технологией.

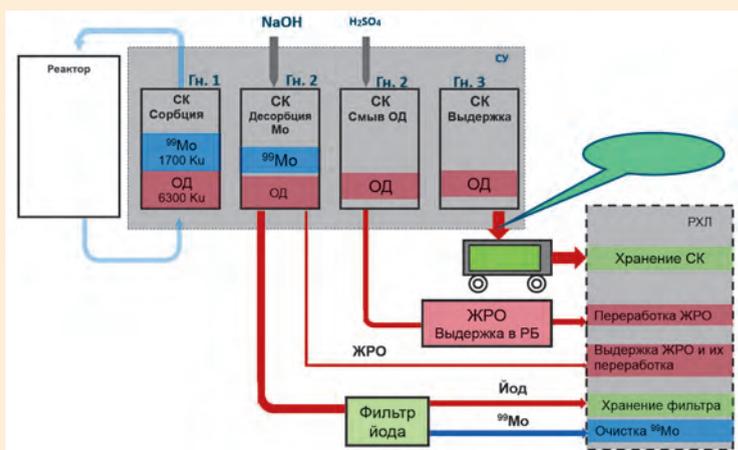


Схема радиохимической технологии наработки и выделения ^{99}Mo в ОО ПК: СК – сорбционная колонка, ОД – осколки деления, ЖРО – жидкие радиоактивные отходы, РХЛ – радиохимическая лаборатория



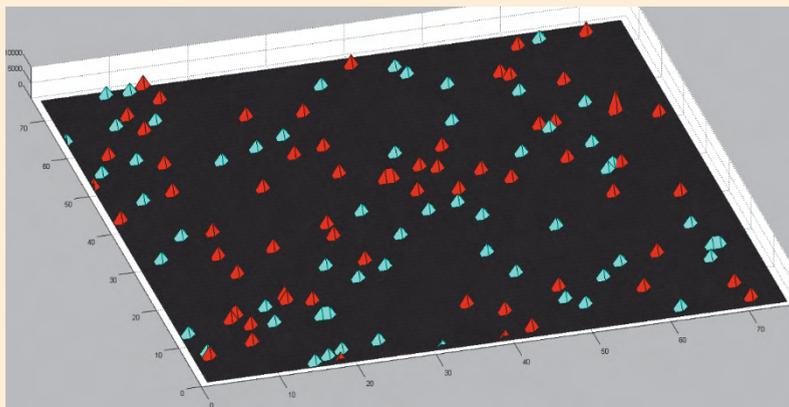
Генератор $^{99\text{m}}\text{Tc}$



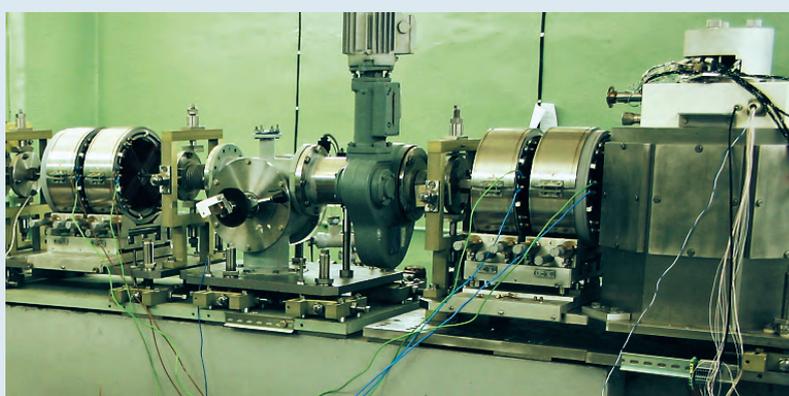
Реактор «Аргус» (макет)

ПРОБЛЕМА РАДИАЦИОННОЙ ЭРОЗИИ КАТОДОВ СТРИПОВЫХ КАМЕР, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА БОЛЬШОМ АДРОННОМ КОЛЛАЙДЕРЕ

В ИЯРФ на установке «Микронзонд» исследованы образцы медных катодов стриповых камер, подвергнутых искусственному радиационному старению на стенде имитационного старения Петербургского института ядерной физики. В результате исследований для образцов катодов впервые были получены элементные карты с цветовым кодированием каждого присутствующего в материале соединения меди. Данные ядерно-сканирующего микрозондирования были дополнены рентгенофазовым и микроструктурным анализом. Совокупность результатов позволяет установить причину возникновения спонтанных самоподдерживающихся токов (Мальтер-эффект). Данные, полученные в ходе исследований, будут использованы при разработке новых газовых детекторов, а также для оценки ресурса существующих катодов.



Карта поверхностного распределения соединений меди в образце катода: красный цвет – Cu_2O ; черный цвет – CuO , бирюзовый цвет – Cu



Установка «Микронзонд»

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ (НИИИС) им. Ю. Е. Седакова

РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНЫХ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ С НАНОРАЗМЕРНЫМИ КОМПОНЕНТАМИ ДЛЯ СВЧ- И КВЧ-ПРИБОРОВ

Разработано радиопоглощающее покрытие РПП-У с коэффициентом отражения менее 10 % (коэффициент поглощения более 90 %) в диапазоне частот 4–10 ГГц и 20–60 % (коэффициент поглощения 40–80 %) в диапазоне частот 1–4 ГГц. Радиопоглощающее

покрытие представляет собой композиционный материал на основе эпоксидной смолы, наполненной углеродными нанотрубками, который возможно наносить кистью на поверхности толщиной до 1 мм (послойно). Диапазон рабочих температур РПП – от –60 до 125 °С. Коэффициент отражения РПП-У остается в указанных пределах после воздействия климатических факторов, имитирующих 18-летнее складское хранение и трехлетнее хранение под нагрузкой.

Разработанное покрытие предназначено для нанесения на металлические поверхности с целью снижения уровня отражения падающего электромагнитного излучения.

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС НА БАЗЕ БЕСПИЛОТНЫХ ВЕРТОЛЕТОВ «ГОРИЗОНТ ЭЙР S-100»

Измерительный комплекс состоит из беспилотного вертолета «Горизонт ЭЙР S-100»

(3 шт.), наземного пункта управления и приемно-регистрирующей аппаратуры и предназначен для приема информации с воздушных и наземных объектов в радиочастотном диапазоне волн.

Комплекс способен выполнять задачи в диапазоне высот 0–3000 м при максимальной дальности управляемого полета до 100 км с возможностью передачи зарегистрированной информации на расстояние до 100 км (при наличии прямой радиовидимости).

Достоинства комплекса:

- выполнение задач в условиях повышенной опасности;
- нахождение в заданной точке воздушного пространства в режиме зависания в течение времени полета;
- возможность взлета и посадки на неподготовленную площадку.

ИМИТАТОР ПОМЕХ БОРТОВЫХ СЕТЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА ИБС27-300

Завершены работы по созданию имитатора помех бортовых сетей постоянного тока ИБС27-300.

Имитатор предназначен для проведения испытаний аппаратуры, работающей от сетей электроснабжения постоянного тока с номинальным напряжением 27 В, на стойкость к воз-



Имитатор ИБС27-300

действию электрических помех по цепям электропитания.

Достоинства имитатора:

- не требует применения внешних лабораторных источников электропитания;
- простой интерфейс управления;
- низкие временные затраты на подготовку и проведение испытаний.

Функциональные возможности имитатора:

- формирование типовых помех в соответствии с требованиями ОСТ В95 2494-86, ОСТ В95 1979-78, ОСТ В95 2422-83;
- формирование установленных, переходных напряжений, пульсаций напряжения в соответствии с требованиями ГОСТ Р 54073-2017.

ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ВЕРХНЕГО УРОВНЯ АСУ ТП УСТАНОВКИ ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТИ

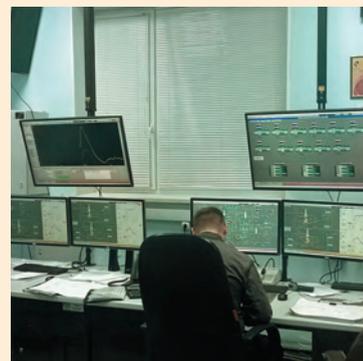
Разработан и сдан в промышленную эксплуатацию программно-технический комплекс верхнего уровня (ПТК ВУ) автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) установки переработки нефти (УПН-2) в ООО «Нижневартовское нефтеперерабатывающее объединение» (г. Нижневартовск).



Беспилотный вертолет в полете



Установка переработки нефти



Программно-технический комплекс верхнего уровня УПН-2

ПТК ВУ АСУ ТП предназначен для автоматизированного контроля и управления технологическим процессом УПН-2.

В состав ПТК ВУ УПН-2 входят пять многомониторных автоматизированных рабочих мест, серверный шкаф с коммуникационным оборудованием, шкаф бесперебойного питания.

Программное обеспечение ПТК ВУ АСУ ТП создано на базе платформы «СКАДА-НН» разработки НИИИС, работающей под управлением операционной системы Astra Linux.

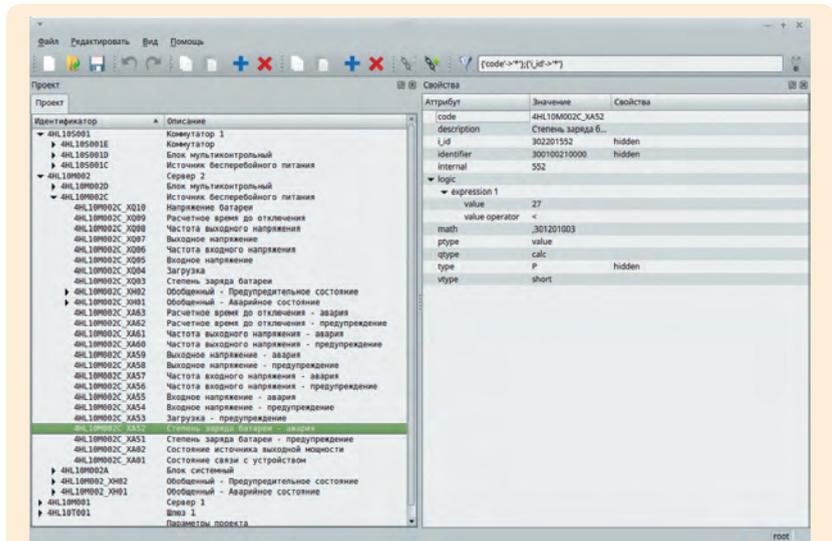
Реализация данного проекта позволила заключить соглашение по совместному сотрудничеству между государственной корпорацией по атомной энергии «Росатом» и ПАО «Нефтяная компания «Роснефть».

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИАГНОСТИКИ

Программное обеспечение предназначено для сбора, обработки и передачи в SCADA-систему диагностической информации о состоянии программно-технических средств (ПТС) автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) на этапе эксплуатации. Создана объектная модель прикладного проекта и набор унифицированных программных компонент, что обеспечивает поддержку широкого набора операционных систем, а также несколько способов интеграции информации в SCADA-системы. Все программные компоненты имеют открытый исходный код собственной разработки.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНЫМИ МАГНИТНЫМИ ПОДШИПНИКАМИ (АМП) ДЛЯ ТУРБОКОМПРЕССОРА-ГЕНЕРАТОРА ГАЗОТУРБИНОЙ СИСТЕМЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ

Создан стендовый образец системы управления на



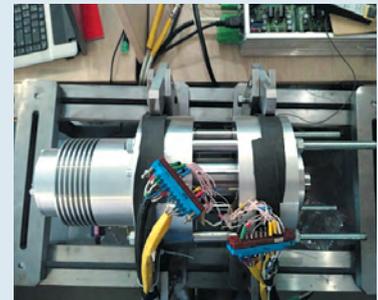
Компонента создания прикладного проекта

отечественной радиационно стойкой элементной базе; разработан и изготовлен испытательный стенд для отработки алгоритмов, состоящий из двух стоек с коническим и радиально-осевым подвесами, обеспечивающий вращение турбины

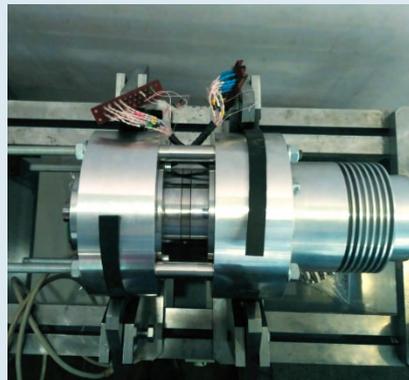
до 60000 об./мин. Разработаны уникальные математические алгоритмы, позволяющие осуществлять управление магнитным подвесом на аппаратных платформах, не требовательным к вычислительным ресурсам.



Система управления активными магнитными подшипниками



Конический подвес с электроприводом



Радиальный подвес с электроприводом



Стенд для отработки алгоритмов

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ АППАРАТУРОЙ ДИАГНОСТИКИ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Разработана система автоматического управления аппаратурой диагностики выходных параметров лазерного излучения для многоканальной лазерной установки. Система предназначена для юстировки, сбора данных в режиме эксперимента и диагностики технологического оборудования. Работоспособность алгоритмов автоматического и автоматизированного управления была подтверждена как на специально разработанном имитаторе с использованием математической модели оптической схемы, так и в ходе пусконаладочных работ на объекте эксплуатации с подключенным оборудованием.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫХ МИКРОПЛАТ С МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫМИ ПЕРЕХОДНЫМИ ОТВЕРСТИЯМИ

Разработана и внедрена в производство технология изготовления сверхвысоко частотных микроплат с переходными металлизированными отверстиями, которые являются новым классом тонкопленочных микрорезистивных изделий.

Переходные отверстия в керамических подложках формируются на прецизионной лазерной машине МЛП1-015ЛД с импульсным волоконным лазером YLR-150/1500-QCW с диодной накачкой. Для металлизации отверстий применяется «сухой» метод – метод вакуумного магнетронного распыления, который обеспечивает высокую адгезию пленок

к подложке за счет большой энергии частиц и полное пропыление отверстий за счет применения планетарной системы вращения подложек. За один цикл откачки одновременно осуществляются металлизация отверстий и напыление проводящих структур лицевой и обратной сторон подложки, что снижает трудоемкость изготовления. В качестве материала проводящих структур применяется композиция на основе меди с подслоем ванадия, напыляемая на установке магнетронного распыления «Оратория-5» с последующим гальваноосаждением слоев меди и золота через фоторезистивную маску.

Разработанная технология заменит традиционную технологию соединения элементов лицевой и обратной сторон микроплат с помощью ленточных золоченых перемычек, позволив в среднем в 5 раз уменьшить длину «заземляющих шин», что, в свою очередь, даст возможность увеличить верхнюю рабочую частоту устройств с 2–3 до 10–15 ГГц, повысит надежность за счет сокращения сварных соединений, уменьшит массу и габариты плат.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ LTCC-ПЛАТ ИЗ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Исследована отечественная система материалов (керамики и проводниковых паст) для изготовления по технологии низкотемпературного совместного обжига (Low Temperature Cofire Ceramics (LTCC)) многослойных керамических плат (МКП) сантиметрового и миллиметрового диапазона длин волн.

В ходе исследований получены сравнительные характеристики применяемых материалов отечественного и импортного производства, разработан комплект технологического оборудования производственного участка LTCC с учетом особенностей маршрута и технологических режимов изготовления МКП из отечественных материалов.

Новые технологические процессы обеспечивают изготовление МКП с заданными характеристиками в условиях производства филиала РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю. Е. Седакова».

СИСТЕМА РАСЧЕТА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ РАСПИСАНИЙ

Система расчета производственных расписаний обеспечивает решение задач объемно-календарного и оперативного планирования с учетом особенностей производственных процессов. Результат ее работы – графики выполнения заказов, обеспеченные ресурсами с учетом сроков выполнения.

Система предназначена для предприятий с единичным, мелкосерийным, серийным видами производства. Она применяется для расчета сроков производственных заказов и оптимального распределения работ по производственным подразделениям, а также оперативного управления при расчете оптимальных производственных заданий по оборудованию, персоналу и расписаний комплектования материально-технических ресурсов.

КОНСТРУКТОРСКИЕ БЮРО

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПОСЛОЙНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ ПОРОШКОВ

В настоящее время в мире интенсивно развивается метод изготовления сложных трехмерных деталей – метод послойного лазерного сплавления порошков металлов (аддитивные технологии). Однако свойства полученных таким методом материалов при взаимодействии с изотопами водорода (водородопроницаемость, растворимость, водородное охрупчивание) неизвестны. В РФЯЦ-ВНИИЭФ впервые исследованы перечисленные свойства для стали 316L и сплава Inconel 718, полученных методом послойного лазерного сплавления. Установлено, что механические характеристики, водородопроницаемость, растворимость водорода для стали 316L одного порядка с характеристиками стали 12X18H10T, изготовленной традиционным методом. На прочностные свойства сплава Inconel 718 водород также не оказал существенного влияния. Таким образом, метод послойного лазерного сплавления порошков стали применим для изготовления сложных деталей, работающих в среде водорода при высоком давлении.

ФИЗИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ ИНИЦИИРОВАНИЯ ВСПЫШЕК И ВЗРЫВОВ

При обращении с изделиями, содержащими взрывчатые вещества (ВВ), на них могут возникать механические нагрузки, в том числе аварийные, способные приводить (и приводящие, как показывает практика) к взрыву ВВ. Причины генерации вспышек и взрывов, осо-

бенно при малых нагрузках, не вполне ясны. Предложено множество физических механизмов инициирования (действие контактного давления, разогрев ВВ трением за счет сдвиговой прочности, разогрев воздуха в порах, прямой механический разрыв химических связей и др.) и критериев взрыва на их основе, но все они носят частный характер и не объясняют совокупность наблюдаемых фактов, а критерии применимы только для определенных видов нагружения. Поэтому для принятия обоснованных решений по обеспечению взрывобезопасности необходимо знать базовые принципы общего механизма, чтобы получать правильные зависимости.

Предложен и обоснован физический механизм инициирования вспышек и взрывов, согласующийся с имеющимися экспериментальными данными не только по ВВ, но и по пиротехническим составам и другим горючим материалам. Суть его заключается в следующем: после превышения нагрузки сдвиговой прочности в материале (или на границе с внедряющимся ударником) возникает слой сдвига, в котором материал разогревается (но только до температуры потери прочности) и пластифицируется. Если при этом вдоль слоя сдвига существует перепад давления, то вещество выдавливается из слоя и нагревается за счет вязкости до высоких температур, при которых ВВ быстро разлагается (а горючее зажигается) и возникает высокое давление. При достаточно большой толщине слоя сдвига это инициирует взрыв соседнего со слоем ВВ. Получено критериальное выражение для инициирования вспышки:

$$\int (dp/ds)^2 dt > 48\eta_0/5\alpha h^2,$$

где dp/ds – производная давления вдоль слоя сдвига, h – начальная толщина слоя сдвига, η_0 – начальная вязкость, α – показатель экспоненты уменьшения вязкости с ростом разогрева, t – время. Известный, критериальный критерий Уокера $\int p^2 dt > \text{const}$ декларируемый как критерий взрыва, а по сути являющийся критерием вспышки, есть частный случай полученного критерия.

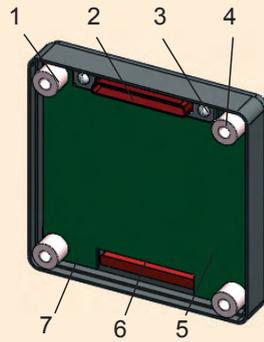
Для инициирования взрыва ВВ в результате вспышки получено критериальное соотношение, связывающее газодинамические характеристики ВВ, толщину слоя сдвига и скорость разложения ВВ (параметры кинетики разложения). В перспективе открывается возможность управлять чувствительностью и характеристиками безопасности разрабатываемых взрывчатых составов.

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ

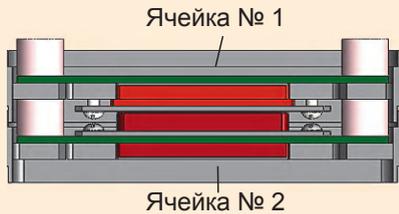
Впервые осуществлен успешный физический пуск преобразователя (конвертера) тепловой энергии в электрическую на основе двигателя Стирлинга и электрического генератора мощностью 1 кВт. Стирлинг-конвертер изготовлен полностью из отечественных материалов. Эта разработка открывает возможность существенного (в разы) повышения КПД преобразования тепловой энергии среднетемпературных источников (600–800 °С) в электрическую, что особенно важно для автономных и удаленных источников электроэнергии.

РАДИОЭЛЕКТРОННЫЙ БЛОК

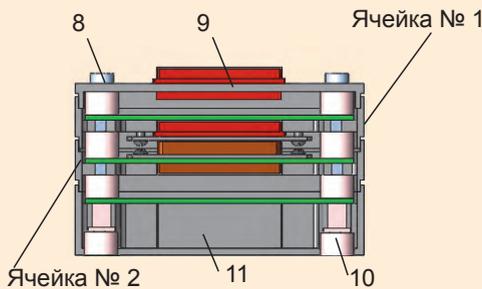
Изобретение (патент РФ № 2513121) автор Иванов



Конструкция радиоэлектронной ячейки: 1 – втулка, 2 – электрический соединитель (розетка), 3 – планка, 4 – винт, 5 – корпус, 6 – электрический соединитель (вилка), 7 – печатная плата



Соединение радиоэлектронных ячеек электрическими соединителями



Радиоэлектронный блок с ячейками: 8 – винт, 9 – крышка, 10 – блок питания, 11 – втулка

Соединение радиоэлектронных ячеек в составе блока с помощью электрических соединителей

Алексей Валерьевич представляет собой радиоэлектронный блок пакетного типа, в котором металлическая рамка электронного модуля является частью корпуса радиоэлектронного блока, и может применяться при изготовлении радиоэлектронной аппаратуры, реализуемой на основе однотипных электронных модулей, например бортовых приборов и систем, которые эксплуатируются в условиях воздействия интенсивных механических нагрузок и ограниченного объема. В результате применения радиоэлектронного блока повышается надежность, упрощается технология сборки и расширяются функциональные возможности радиоэлектронной аппаратуры.

Радиоэлектронный блок содержит корпус, состоящий из соединенных в па-

кет минимум одной металлической рамки, крышки и основания, а также разъемные соединители; в каждой рамке закреплен по крайней мере один печатный узел; на торцах каждой рамки по внешнему и внутреннему контурам выполнены соответственно охватывающий и охватываемый ступенчатые выступы, причем высота охватываемого выступа меньше высоты охватываемого. Разъемные соединители закреплены непосредственно на рамках, крышка и основание выполнены с возможностью закрепления в них печатных узлов; при этом на крышке и/или основании закреплен как минимум один дополнительный разъемный соединитель для соединения с внешними устройствами. За счет установки разъемных соединителей непосредственно на металлическую рамку и жесткой

фиксации элементами крепления сокращается время регулировки совместимости ответных частей соединителей.

Расположенный на крышке и/или основании дополнительный разъемный соединитель радиоэлектронного блока с внешними устройствами используется вместо жгутов. Возможность размещения печатных узлов на крышке и основании позволяет повысить количество устанавливаемых электрорадиоизделий (ЭРИ), не снижая надежности устройства увеличением количества радиоэлектронных ячеек.

Применение дополнительных втулок, установленных в отверстиях со стороны внешней поверхности основания, позволяет жестко закрепить радиоэлектронный блок на опоре. Это обеспечивает жесткость и прочность конструкции в условиях

воздействия внешних механических факторов и дополнительно повышает ее надежность.

Предложенный способ соединения ячеек радиоэлектронного блока непосредственно электрическими соединителями, винтами, и резьбовыми втулками может применяться при сборке радиоэлектронных комплексов, состоящих из нескольких радиоэлектронных блоков, например бортовых телеметрических комплексов.

Сборка радиоэлектронных систем при помощи электрических соединителей осуществляется следующим образом (см. рисунок):

1) радиоэлектронные блоки 1, 3 имеют в своем составе электрические соединители 5, 6. В блоке 3 электрический соединитель 5 установлен на верхней панели 2, которая крепится к корпусу блока втулками 8. Электрический соединитель крепится к верхней панели с помощью планки 7 и винтов 4. Аналогично на корпус блока 1 устанавливается электрический соединитель 6;

2) радиоэлектронные блоки 1, 3 непосредственно соединяются электрическими соединителями и фиксируются винтами 9.

Работоспособность конструкции подтверждена испытаниями:

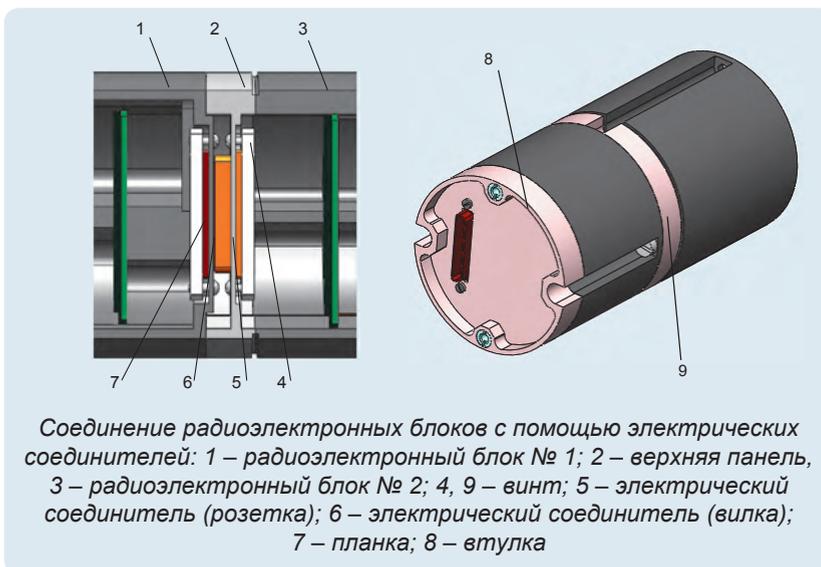
- на воздействие синусоидальной вибрации в диапазоне частот 10–2000 Гц с заданным значением ускорения 15g;

- на воздействие ударной нагрузки с амплитудой ускорения 4300g и длительностью 0,36 мс.

В конструкции использовались электрические соединители СНП339.

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ УДАРОВ И ВИБРАЦИЙ

Изобретение (патент РФ № 2608897) позволит рассчитать статическую осадку и по-



Соединение радиоэлектронных блоков с помощью электрических соединителей: 1 – радиоэлектронный блок № 1; 2 – верхняя панель, 3 – радиоэлектронный блок № 2; 4, 9 – винт; 5 – электрический соединитель (розетка); 6 – электрический соединитель (вилка); 7 – планка; 8 – втулка

добрать размер нивелирующих прокладок без использования защищаемого объекта. Конструкция позволяет значительно снизить уровень вибрации в бортовой аппаратуре и защитить ее от ударных воздействий.

Средство защиты бортовой аппаратуры от механических дестабилизирующих факторов является весьма перспективной конструктивной схемой многостороннего упора, образованного элементами виброзащиты и упругопластичными вставками. Устройство защиты от ударов и вибраций (см. рисунок) содержит упругие элементы 2 и 7, расположенный между ними опорный элемент 4 с отверстием, демпфирующую втулку 5, крепежный элемент 8, крепежную втулку 6 с фланцами, дополнительную крепежную гайку 1 и шайбу 10, прокладки 9 – 2 шт.

Крепежная втулка 6 установлена в отверстии опорного элемента 4. Крепежный элемент 8, проходящий через отверстия упругих элементов 2, 7 и демпфирующей втулки 5, и крепежная втулка с фланцами, установленная в отверстии опорного элемента между крепежным элементом, упругими элементами и демпфирующей втулкой, отличаются тем, что в отверстии опорного элемента

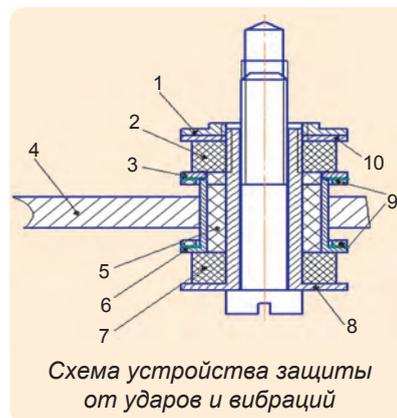


Схема устройства защиты от ударов и вибраций

между демпфирующей втулкой, упругими элементами и опорным элементом установлена дополнительная крепежная втулка с фланцами, на обращенных к опорному элементу поверхностях которых закреплены прокладки 9, а крепежная втулка с фланцами установлена с возможностью осевого перемещения.

Опорный элемент 4 выполнен из алюминиевого сплава Д16; упругие элементы 2, 7 и демпфирующая втулка – из смеси резиновой ИРП-1354 НТА; гайка 1, шайбы 3, 10, крепежная втулка 6 с фланцами, крепежный элемент 8 – из стали 30ХГСА; прокладки 9 – из пенопласта полистирольного плиточного ПС-1-200. Резиновые элементы обеспечивают защиту в осевом (работа на растяжение/сжатие) и поперечном

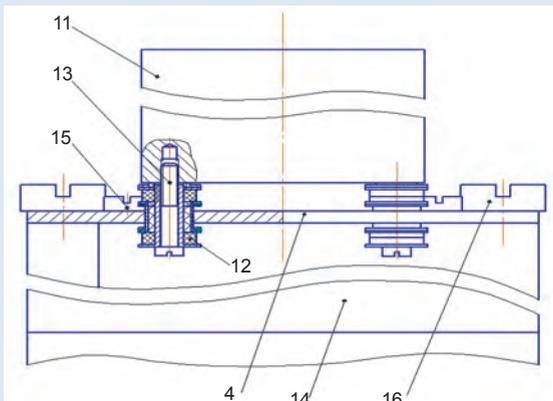


Схема установки устройства защиты от ударов и вибраций на испытательное оборудование

(работа на сдвиг) направлены, образуя двухсторонний упор между опорой. Для защиты от ударов в конструкции установлены прокладки и амортизатор на опору по тугой посадке (при больших уровнях ускорений одиночного удара амортизатор сдвигается относительно платформы, что обеспечивает дополнительное снижение динамичности конструкции).

На схеме установки устройства защиты от ударов и вибраций на испытательное оборудование показан защищаемый объект 11, установленный на платформу, состоящую из опоры 4 и амортизатора 12. Защищаемый объект 11 крепится к платформе при помощи вин-

тов 13. Платформа устанавливается на кронштейн 14 при помощи винтов 15. Кронштейн с объектом испытаний при помощи винтов 16 устанавливается на испытательное оборудование.

Применение изобретения позволило сместить резонансную частоту в низкочастотную область и уменьшить амплитуду вибрационного воздействия на 25 %.

Было проведено испытание изобретения на удар 1500г длительностью 1 мс. Значение ударного ускорения выбрано исходя из предельной стойкости большинства ЭРИ, используемых в бортовой радиоэлектронной аппаратуре.

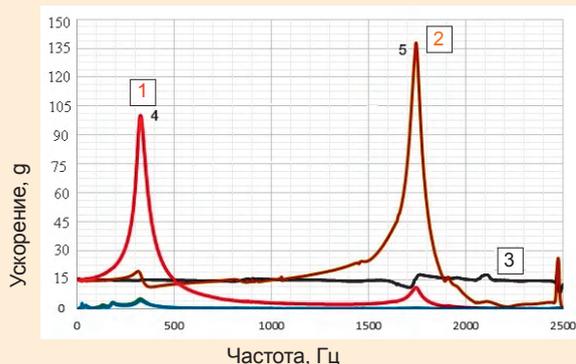
Снижение длительности нагрузки на защищаемом объекте при ударном воздействии составило 22 %.

Устройство защиты работает следующим образом: при воздействии на защищаемый объект ударной нагрузки, по значению меньшей усилия сдвига крепежной втулки 6 относительно крепежного элемента 8, при котором происходит смещение упругого элемента 2, деформируется демпфирующая втулка 5. При дальнейшем увеличении нагрузки происходит сдвиг крепежной втулки 6 относительно крепежного элемента 8 с деформацией дополнительных демпфирующих втулок 2, 7.

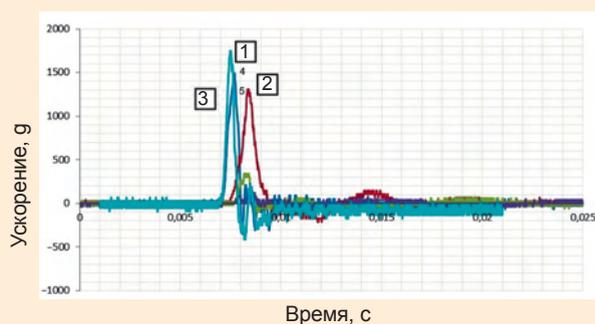
СПОСОБ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОИСКА БЛОКА ИНФОРМАЦИИ ПО СЛУЧАЙНОЙ ВЫБОРКЕ ВХОДНЫХ ДАННЫХ

Разработан способ динамического поиска блока информации, обеспечивающий:

- формирование траектории поиска с использованием метода перераспределения неявных адресов признака поиска с использованием факториальной системы счисления;
- использование многоуров-



Экспериментальная амплитудно-частотная характеристика (внешнее воздействие – синусоидальная вибрация с амплитудой ускорения 15g в диапазоне частот 10–2500 Гц): 1 – датчик на макете; 2 – датчик на основании; 3 – датчик, задающий нагрузку; точка 4 – 327 Гц, 102g; точка 5 – 1740 Гц, 137g



Экспериментальная амплитудно-временная характеристика (внешнее воздействие – одиночный удар с амплитудой ускорения 1500г длительностью импульса 1 мс): 1 – датчик на макете; 2 – датчик на основании; 3 – датчик, задающий нагрузку; точка 4 – 1492g, точка 5 – 1308g

невого контроля истинности найденного блока с применением оригинального метода скрытого идентифицирующего подобию, увеличивающего вероятность правильного выбора блока информации до теоретически возможного значения (устранение коллизий).

Преимущества способа динамического поиска по сравнению с аналогами:

- повышенная безопасность хранения данных благодаря исключению роста априорной вероятности их

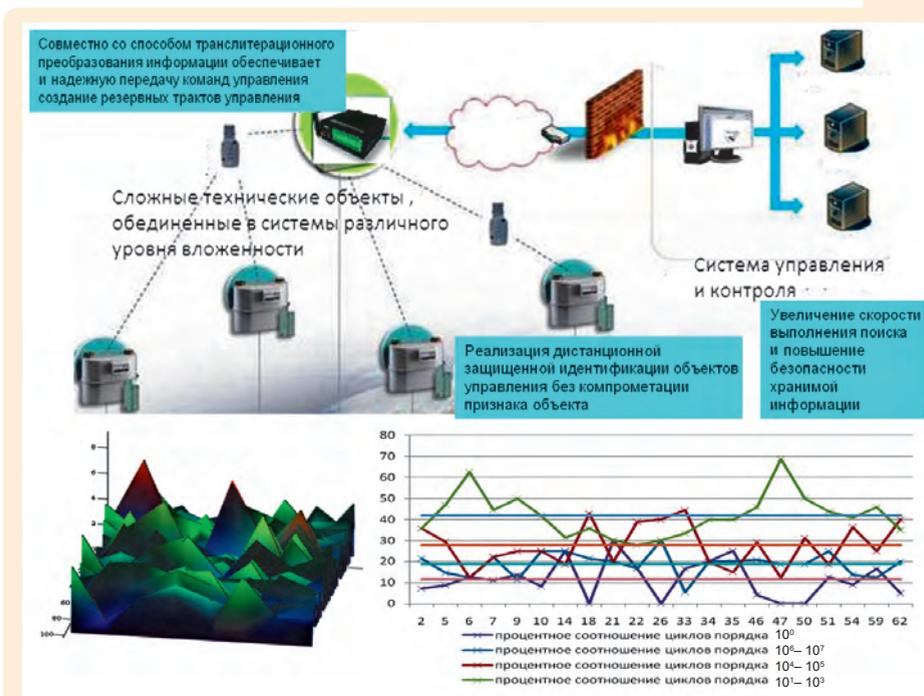
компрометации после ввода запроса на поиск или его передачи по каналам связи (устранение прямой зависимости входной и хранимой информации);

- возможность встраивания данного способа в любые алгоритмы поиска информации и базы данных (гибкая настройка алгоритма управления в зависимости от содержания и размера хранимой информации);

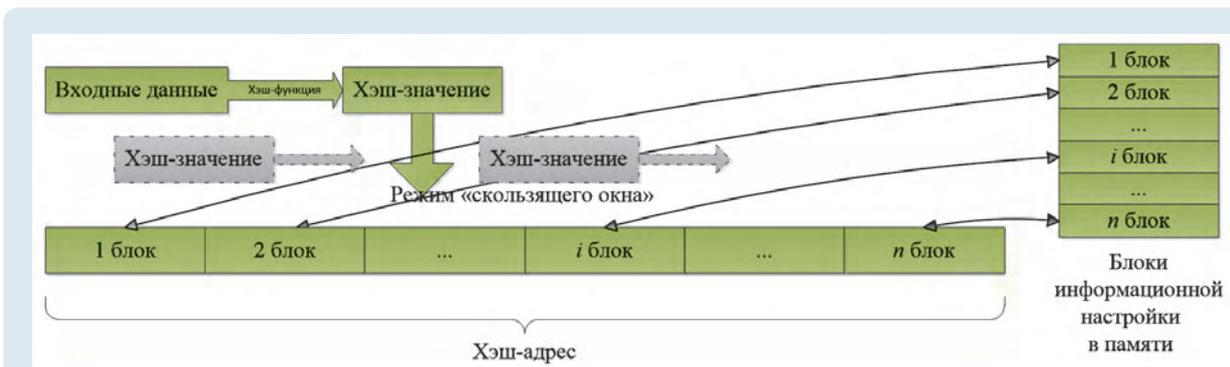
- высокое быстродействие при программной и аппаратной реализации (ско-

рость выполнения поиска увеличивается на 25–50 % в зависимости от варианта реализации).

Способ динамического поиска блока информации по случайной выборке входных данных внедрен в не имеющем аналогов программно-техническом комплексе управления и контроля сложными техническими объектами с многоуровневой иерархической структу-



Программно-технический комплекс управления и контроля сложными техническими объектами с многоуровневой иерархической структурой управления, адаптирующейся к изменяемым внешним факторам, и результаты его моделирования



Реализация способа динамического поиска по случайной выборке входных данных

рой управления, адаптирующей к изменяемым внешним факторам.

КОМПЛЕКС ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ

Разработан, прошел полный цикл испытаний и принят Министерством обороны РФ единый комплекс технических средств защиты оружия ВМФ. Данный комплекс предназначен для интеграции в структуру комплексов оружия на строящихся и модернизируемых надводных кораблях и подводных лодках ВМФ; он обеспечивает применение оружия, имеет возможности для обучения персонала и преподавателей учебных центров Министерства обороны РФ и проведения необходимых работ в процессе эксплуатации.



Проект «Борей»



Проект «Буревестник»



По результатам выполненных работ получены:

- сертификат соответствия № 2024 Минобороны РФ;
- патент № 2415461 «Пульт управления»;
- патент № 2524491 «Учебно-тренировочный комплекс»;
- патент № 2400805 «Устройство управления и связи» и др.

ЭЛЕКТРОННЫЕ УЧЕБНЫЕ ПОСОБИЯ С ИНТЕРАКТИВНОЙ ДЕМОНСТРАЦИЕЙ РАБОТЫ ИЗДЕЛИЙ

В рамках реализации технологий управления полным жизненным циклом изделий построена модель электронных учебных пособий на основе цифровых двойников приборов и радиоэлектронной аппаратуры. Разрабатываются программные приложения для электронных учебных пособий, демонстрирующие работу указанных приборов, с применением средств, обеспечивающих возможность их использования на операционных системах различных семейств (Microsoft Windows, Unix и др.). Внедрение в электронные учебные пособия кроссплатформенных программных элементов интерактивной демонстрации работы изделий позволяет повысить уровень подготовки и квалификации специалистов в связи с открывающейся возможностью моделирования широкого круга задач, возникающих в процессе эксплуатации приборов и радиоэлектронной аппаратуры.

ПОДГОТОВКА ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ

В 2018 г. в рамках совместной научной деятельности ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» и кафедры «Радиофизика и электроника» СарФТИ НИЯУ «МИФИ» были подготовлены монография и четыре учебных пособия, предна-

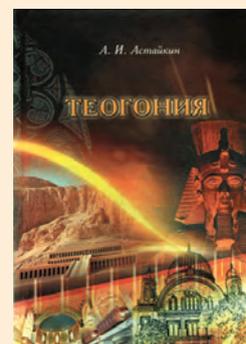


Рабочие окна электронного учебного пособия

значенные для обучения студентов, аспирантов, инженеров и научных работников.

По итогам Всероссийского конкурса на лучшую научную книгу удостоены звания лауреата конкурса учебное пособие «Теория поля и защита информации» (авторы Мартынова И. А., Машин И. Г., Фомченко В. Н.) и монография «Теогония. От Древнего мира до эпохи Возрождения» (автор Астайкин А. И.),

а по итогам Межрегионального конкурса вузовских изданий «Университетская книга-2018» победителем признано пособие «Аналитические исследования характеристик информационной составляющей автоматизированных систем управления и контроля» (авторы Волков К. О., Мартынов А. П., Марунин М. В., Николаев Д. Б.).

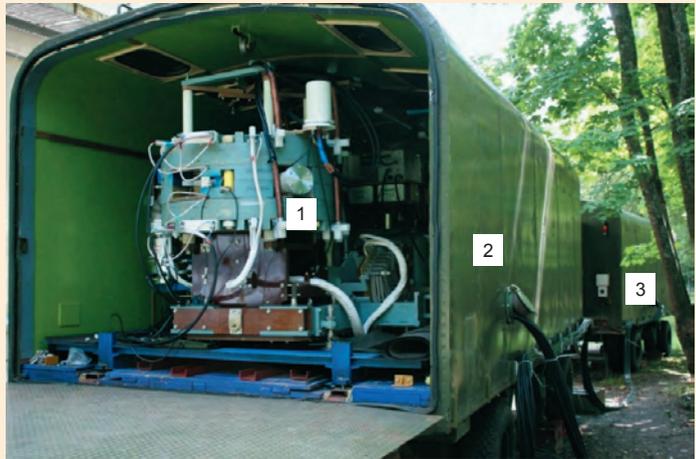


НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЦЕНТР ФИЗИКИ (НПЦФ)

МОБИЛЬНЫЙ ЦИКЛИЧЕСКИЙ УСКОРИТЕЛЬ НА БАЗЕ БЕЗЖЕЛЕЗНОГО ИМПУЛЬСНОГО БЕТАТРОНА

В 2018 г. продолжались работы по созданию макета мобильного циклического ускорителя (МЦУ БИМ) на базе БИМ-1500, являющегося составной частью мобильного рентгенографического комплекса, предназначенного для радиографирования динамических объектов большой оптической толщины.

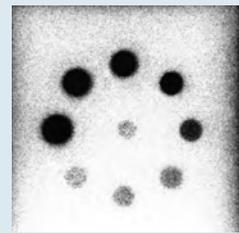
В прошедшем году проведены тестовые включения МЦУ БИМ в однокадровом режиме. Ёмкость накопителя системы импульсного питания электромагнита бетатрона, определяющая граничную энергию электронного пучка, составила 1800 мкФ. По результатам тестовых включений толщина просвеченного свинцового тест-объекта на расстоянии 4 м от танталовой мишени составила 140 мм, длительность выходного гамма-импульса на полувысоте – 120 нс (размеры источника излучения 6×3 мм, размеры танталовой мишени 6×6 мм).



Однолучевой трехкадровый мобильный циклический ускоритель на экспериментальной площадке ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»: 1 – бетатрон типа БИМ, 2 – ускорительный модуль, 3 – модуль импульсного питания электромагнита бетатрона

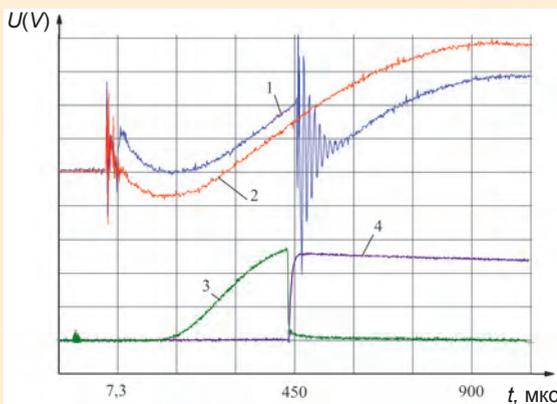


а

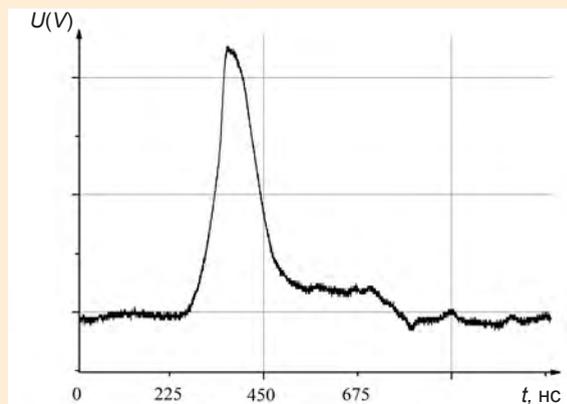


б

Фотография сборки для определения просвечивающей способности установки МЦУ БИМ (а): 1 – тест-объект, 2 – кассета с рентгеночувствительными пластинами на запоминающих люминофорах; рентгенограмма свинцового тест-объекта (б)



а



б

Оциллограммы сигналов датчиков МЦУ БИМ, зарегистрированные во время тестовых включений (а): 1 – сигнал датчика «0 поля» при отсутствии тока электронов в камере, 2 – сигнал датчика «0 поля» при наличии тока электронов в камере, 3 – сигнал оптического датчика синхротронного излучения, 4 – уровень интенсивности тормозного излучения; оциллограмма сигнала датчика γ -излучения (б)

МОЩНЫЕ ЭФФЕКТИВНЫЕ ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ МОДУЛЯТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ

Разработан новый класс электровакуумных приборов – газоразрядные модуляторы напряжения. Принцип действия этих приборов аналогичен механизму генерации на основе диодов Ганна. Наличие участка вольтамперной характеристики с отрицательным дифференциальным сопротивлением превращает диод Ганна в эффективный модулятор тока. Вольтамперная характеристика газового разряда также содержит участки с отрицательным дифференциальным сопротивлением; это позволяет создавать эффективные модуляторы напряжения на основе газоразрядных камер. Напряжение, падающее на газовом разряде, достигает единиц кВ, что позволяет создавать на основе газоразрядных модуляторов эффективные, компактные импульсные ВЧ-, СВЧ-, СВЧ-генераторы мощностью до 1 МВт.

На сегодняшний день разработано несколько вариантов отпаянных газоразрядных камер (модуляторов напряжения). Эти приборы уникальны и не имеют аналогов в мире.



Внешний вид отпаянных газоразрядных камер

АППАРАТ ДЛЯ ТЕРАПИИ ОКСИДОМ АЗОТА «ТИАНОКС»

Аппарат предназначен для производства, мониторинга и подачи оксида азота в дыхательный контур пациента непосредственно при проведении терапии. Синтез оксида азота осуществляется в импульсно-периодическом диффузном разряде из окружающего воздуха. Аппарат не имеет аналогов в мире. В настоящее время изготовлена партия опытных образцов аппарата. Пройдены государственные технические испыта-

ния, токсикологические испытания, получено разрешение Росздравнадзора на проведение клинических испытаний с участием человека. Аппарат защищен четырьмя патентами РФ и проходит апробацию в ведущих клиниках России.



Аппарат для ингаляционной терапии оксидом азота ТИАНОКС

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЛАВА $Ti_{50}Pd_{40}Ni_{10}$ С ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМ ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ

При создании новых реакторных установок на быстрых нейтронах необходимо учитывать их сложность и опасность, поэтому установки должны оснащаться дополнительными устройствами безопасно-

сти, в том числе основанными на применении высокотемпературных сплавов с памятью формы (ВСПФ).

На созданной в технологическом отделении ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» экспериментально-методической базе, занимающей лидирующее положение в России, проведены исследования свойств ВСПФ состава $Ti_{50}Pd_{40}Ni_{10}$ (ат. %) на образцах,

изготовленных из полосы толщиной 2,04 мм. Средние значения концентраций элементов, полученные при измерении общего элементного состава на сканирующем автоэмиссионном электронном микроскопе MIRA LMU, соответствуют составу заказанного для изготовления сплава. Рентгеноструктурные исследования сплава (фазовый анализ, параметры

кристаллической решетки, кинетика фазовых превращений) проводили на рентгеновском дифрактометре с мощным генератором (18 кВт) рентгеновского излучения и вращающимся CuK_α -анодом, полной автоматизацией процессов съемки, широким набором прикладных программ. Температуру фазовых превращений сплава определяли методом дифференциально-термического анализа на термоанализаторе SETARAM. По результатам механических испытаний образцов сплава на растяжение на испытательной машине UTS-100K предел прочности $\sigma_b = 910$ МПа, относительное удлинение $\delta = 10$ %. Наведение деформации образцам проводили путем их растяжения на машине UTS-100K с помощью самостоятельно разработанного приспособления Л351. Термомеханические характеристики (ТМХ) сплава при проявлении эффекта памяти формы исследовали с помощью разработанного стенда Р1288. Стенд позволяет определять температуру превращений ВСПФ в диапазоне от 20 до 1200 °С. ТМХ,

Общий элементный состав образцов сплава $\text{Ti}_{50}\text{Pd}_{40}\text{Ni}_{10}$ (ат. %)

| Параметры статистической обработки | Массовая концентрация, % | | | Атомная концентрация, % | | |
|------------------------------------|--------------------------|------|-----|-------------------------|------|-----|
| | Ti | Pd | Ni | Ti | Pd | Ni |
| Состояние поставки | | | | | | |
| Среднее значение | 32,9 | 59,3 | 7,8 | 49,8 | 40,5 | 9,7 |
| СКО | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0,1 | 0,2 |
| $K_{\text{вар}}, \%$ | 0,3 | 0,2 | 1 | 0,4 | 0,2 | 2 |
| Объем выборки, n | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 |

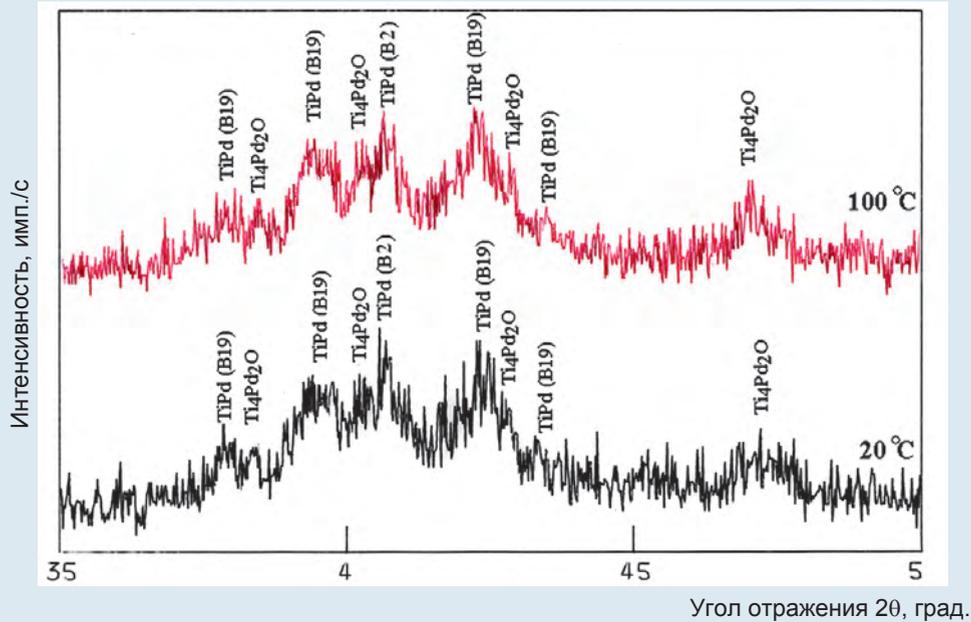
Определение температуры мартенситно-аустенитных превращений в образцах сплава $\text{Ti}_{50}\text{Pd}_{40}\text{Ni}_{10}$ (ат. %) методом дифференциально-термического анализа

| Параметры статистической обработки | Обратное мартенситное превращение (при нагреве сплава) | | Прямое мартенситное превращение (при охлаждении сплава) | |
|---|--|-----------------------|---|-----------------------|
| | $A_s, ^\circ\text{C}$ | $A_r, ^\circ\text{C}$ | $M_s, ^\circ\text{C}$ | $M_r, ^\circ\text{C}$ |
| Отжиг в вакууме при 600 °С, 1 ч, охлаждение с печью | | | | |
| Среднее значение, °С | 408,5 | 437,0 | 382,5 | 371,5 |
| СКО, °С | 0,7 | 0,6 | 1,1 | 0,4 |
| $K_{\text{вар}}, \%$ | 0,2 | 0,1 | 0,3 | 0,1 |
| Объем выборки, n | 2 | 2 | 2 | 2 |

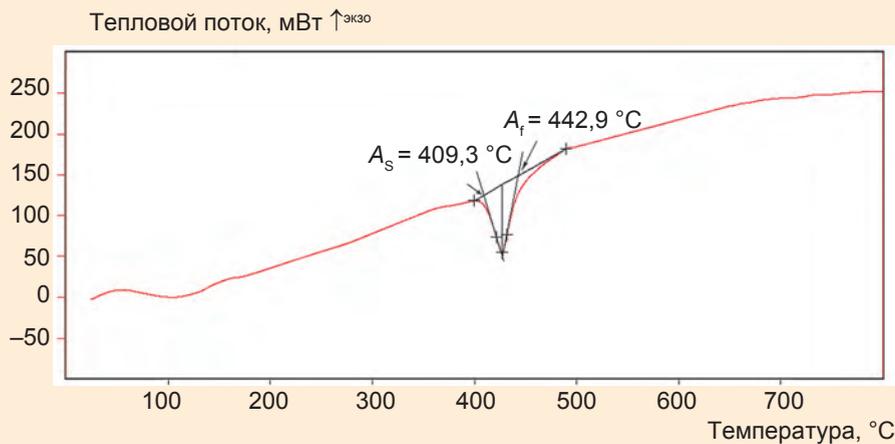
Термомеханические характеристики образцов сплава $\text{Ti}_{50}\text{Pd}_{40}\text{Ni}_{10}$ (ат. %) после отжига в вакууме (600 °С, 1 ч) при проявлении эффекта памяти формы (ЭПФ) после предварительно наведенной деформации растяжением со скоростью $\dot{\varepsilon} \approx 3,1 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$

| № образца | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--|-----|---------|-----|---------|-----|-----|
| Температура наведения деформации, °С | 25 | 150–160 | 25 | 380–370 | | |
| $\varepsilon_o, \%$ | 11 | 9 | 9 | 9 | 10 | 11 |
| $\varepsilon_p, \%$ | 7,2 | 4,2 | 5,9 | 6,4 | 7,9 | 8,1 |
| $A_{s\text{ЭПФ}}^H, ^\circ\text{C}$ | 425 | 417 | 423 | 416 | 415 | 397 |
| $A_{s\text{ЭПФ}}^A, ^\circ\text{C}$ | 429 | 418 | 426 | 419 | 427 | 420 |
| $A_{f\text{ЭПФ}}^H, ^\circ\text{C}$ | 437 | 425 | 432 | 433 | 443 | 437 |
| $A_{f\text{ЭПФ}}^K, ^\circ\text{C}$ | 442 | 426 | 438 | 446 | 459 | 486 |
| $\varepsilon_{\text{ЭПФ}}, \%$ | 1,8 | 0,7 | 1,1 | 3 | 3,9 | 4,6 |
| $\eta_{\text{ЭПФ}}, \%$ | 25 | 17 | 19 | 47 | 49 | 57 |
| Интервал $A_{s\text{ЭПФ}}^H - A_{f\text{ЭПФ}}^K, ^\circ\text{C}$ | 17 | 9 | 15 | 30 | 44 | 89 |
| Интервал $A_{s\text{ЭПФ}}^A - A_{f\text{ЭПФ}}^H, ^\circ\text{C}$ | 8 | 7 | 6 | 14 | 16 | 17 |

П р и м е ч а н и е : образцы № 4–6 сначала нагревали до 450 °С с целью перевода в аустенитное состояние, а затем охлаждали до 380–370 °С и при этой температуре наводили деформацию.



Дифрактограммы образца сплава $Ti_{50}Pd_{40}Ni_{10}$ (ат. %) в состоянии поставки



Типичная термограмма обратного мартенситного превращения (при нагревании) для образца сплава $Ti_{50}Pd_{40}Ni_{10}$ (ат. %) в состоянии поставки

полученные после наведения деформации при различных условиях (см. таблицу), показывают, что максимальные значения эффекта памяти формы

$\epsilon_{ЭПФ}$ и степени восстановления формы $\eta_{ЭПФ}$ составили 4,6 и 57 % соответственно.

Результаты данных исследований используются при раз-

работке различных устройств безопасности для объектов атомной энергетики.

2018

