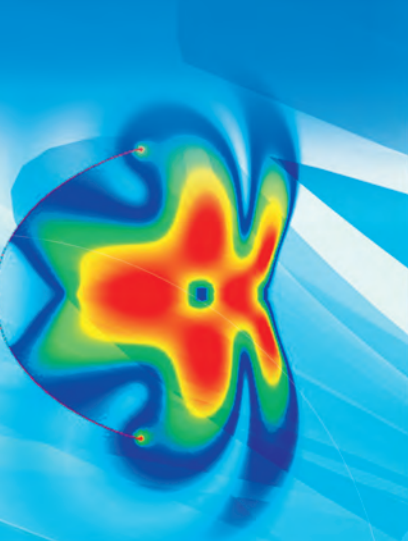
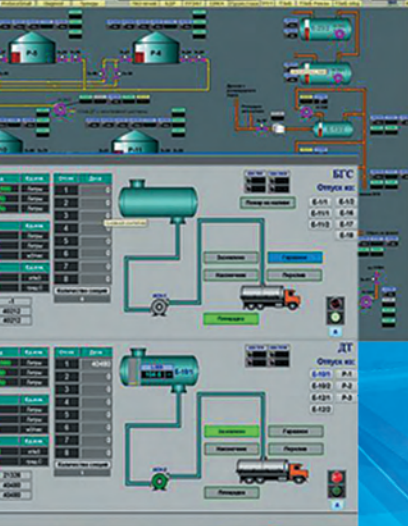




ОСНОВНЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ

РФЯЦ-ВНИИЭФ

2019



САРОВ
2020

ИЗДАТЕЛЬСКО-ПОЛИГРАФИЧЕСКИЙ ЦЕХ РФЯЦ-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.

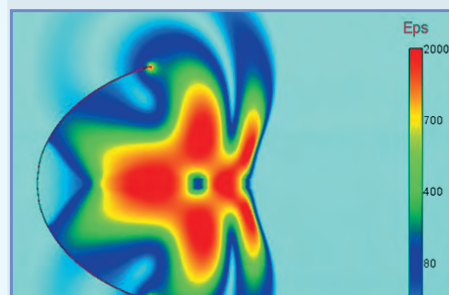
Заказать нашу продукцию можно:

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

СОДЕРЖАНИЕ

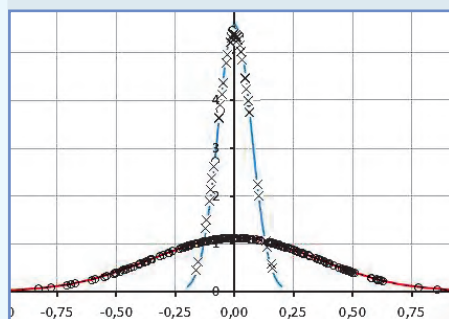
2

ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ
И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ
(ИТМФ)



17

ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ
ИССЛЕДОВАНИЙ (ИЛФИ)



19

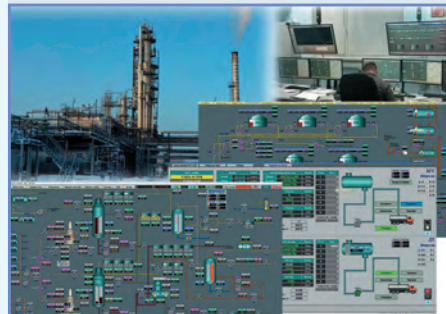
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ
ВЗРЫВА (ИФВ)



24

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ
И РАДИАЦИОННОЙ ФИЗИКИ (ИЯРФ)

31

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

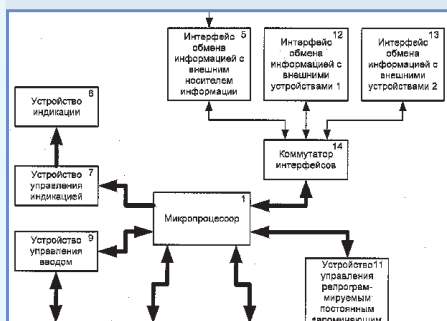
27

НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ
ЦЕНТР ФИЗИКИ (НПЦФ)**РЕДКОЛЛЕГИЯ ВЫПУСКА**

д-р физ.-мат. наук В. П. Соловьев
 академик РАН Р. И. Ильяев
 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. Шагалиев

РЕДАКТОР Н. Ю. Зимакова**КОМПЬЮТЕРНАЯ ПОДГОТОВКА
ОРИГИНАЛА-МАКЕТА** Е. Л. Соседко

29

КОНСТРУКТОРСКИЕ
БЮРО

Подписано в печать 18.03.2020 г., Формат 60×84/8.
 Печать офсетная. Усл. печ. л. 4,0. Уч.-изд. л. ~ 4,4.
 Тираж 1000 экз. Зак. тип. 306-2020.
 Отпечатано в ИПЦ ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»,
 607188, г. Саров Нижегородской обл.,
 ул. Силкина, д. 23

ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ (ИТМФ)

Одно из основных направлений производственной деятельности подразделений ИТМФ, определенных в момент формирования института, – это создание современной расчетно-теоретической базы моделирования сложных физических процессов прежде всего в задачах механики сплошных сред и физики высоких плотностей энергии, а также в других задачах, входящих в основную тематику деятельности РФЯЦ-ВНИИЭФ.

В рамках этого направления деятельности усилия специалистов математического отделения ИТМФ в 2019 г. были сосредоточены на разработке, создании и совершенствовании математических методик и программных комплексов для эффективного компьютерного моделирования широкого спектра прикладных задач в многомерной постановке на вычислительных системах нового поколения. Активно развивались технологии высокопроизводительных вычислений с целью их внедрения в высокотехнологичные отрасли российской промышленности.

МЕТОДИЧЕСКИЕ РАБОТЫ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И ИХ ВНЕДРЕНИЮ В КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

В пакет программ молекулярной динамики MoDyS внедрен новый бессеточный дискретный метод гамильтоновой механики.

В бессеточных методах (SPH, перидинамика, кластерная динамика) сплошная среда заменяется системой взаимодействующих мезочастиц.

Для методов этого класса не всегда удается сконструировать микроскопические взаимодействия так, чтобы получить заданные макроскопические свойства. Уравнения движения мезочастиц обычно записаны в интегро-дифференциальной форме, и не всегда устанавливается их связь с уравнениями гамильтоновой динамики.

В предложенном методе построение дискретной модели начинается с задания упругого потенциала (упругой энергии деформирования) системы частиц. Для изотропной среды эта энергия зависит от двух модулей упругости, т. е. получаем гамильтониан системы с разделяющимися переменными (координатами частиц и их импульсами). При построении дискретной модели используется процедура вычисления тензора дисторсии для системы частиц. В исходном виде модель не предполагает наличия диссипативных процессов и может использоваться только для решения ограниченного круга задач (акустики, сейсмики, динамики гипотупругих сред). Учет диссипации возможен в рамках диссипативной динамики частиц. При моделировании упругопластических течений система уравнений дискретной модели должна быть дополнена соотношениями для вычисления тензора пластической дисторсии.

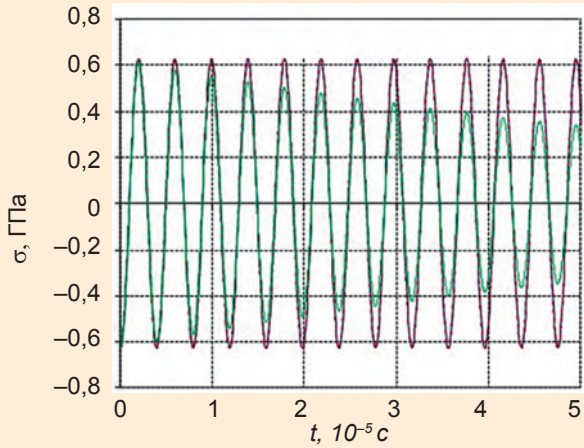
Программная реализация дискретной модели в рамках пакета молекулярной динамики MoDyS свелась к замене процедуры вычисления сил, основные счетные модули, программы пре- и постобработки практически не изменились. Применение дискретного метода (как и любого разностно-

го метода) в практически важных расчетах невозможно без распараллеливания вычислительных процессов. Несомненным преимуществом реализации нового метода на базе комплекса программ MoDyS является возможность проведения расчетов на современных многопроцессорных супер-ЭВМ с использованием интерфейсов MPI, OpenMP и технологии CUDA с высокой (более 80 %) эффективностью распараллеливания.

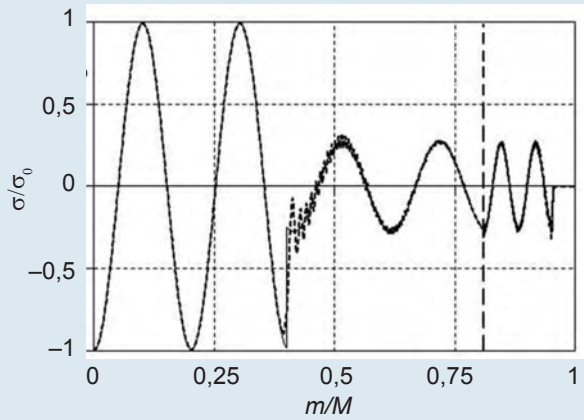
Для оценки точности дискретного метода гамильтоновой механики использовались достаточно простые, но показательные четыре задачи, имеющие эталонное решение.

Задача 1. Прохождение гармонических волн вдоль тонкого стержня. Расчеты тестовых задач проведены с использованием стандартной разностной схемы *крест* и метода, основанного на дискретной гамильтоновой механике, для которого амплитуда звуковых возмущений сохраняется на значительных пространственных (либо временных) интервалах. В расчетах с использованием разностных схем механики сплошных сред звуковые возмущения (гладкие и негладкие) быстро затухают, и это обстоятельство не позволяет проводить расчеты на больших пространственных (или временных) интервалах.

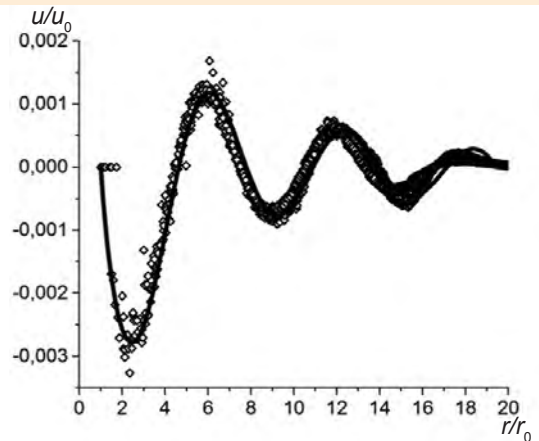
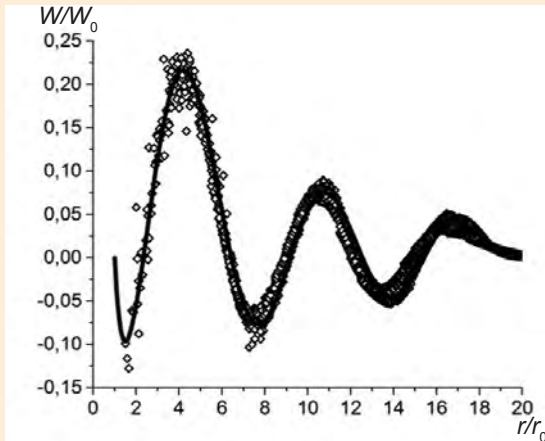
Задача 2. Взаимодействие гармонической волны с контактной границей Fe–Be. Расчеты, проведенные в рамках гамильтоновой механики, с хорошей точностью воспроизводят амплитуды и длины отраженной и преломленной волн. Однако



Задача 1. Зависимость нормального напряжения от времени в сечении $x = L$ для гладких начальных данных: — — эталонное решение; — — дискретный метод гамильтоновой механики; — метод сплошной среды (схема «крест»)



Задача 2. Профиль нормального напряжения. Расчет в рамках гамильтоновой механики с числом частиц $N = 2000$, момент времени $t = 0,1 \cdot 10^{-5}$ с: — — эталонное решение, — — дискретный метод, — — внутренняя граница



Задача 3. Профили смещения (а) и скорости (б) в момент времени $t = 3 \cdot 10^{-5}$ с; $u_0 = W_0 \omega$, W_0 — амплитуда гармонического источника; ω — частота гармонического источника; — — эталонное решение, $\diamond$ — дискретный метод

в расчетах отсутствует счетная диссипация, что приводит к появлению слабой немонотонности вблизи разрывов.

Задача 2. Профиль нормального напряжения. Расчет в рамках гамильтоновой механики с числом частиц $N = 2000$, момент времени $t = 0,1 \cdot 10^{-5}$ с.

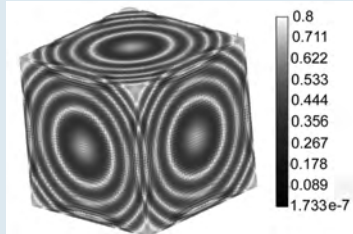
Задача 3. Сферически-симметричная расходящаяся упругая волна. В силу сферической симметрии все параметры течения зависят от одной пространственной ко-

ординаты $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$, поэтому на графиках нанесены значения сеточных функций для всех частиц.

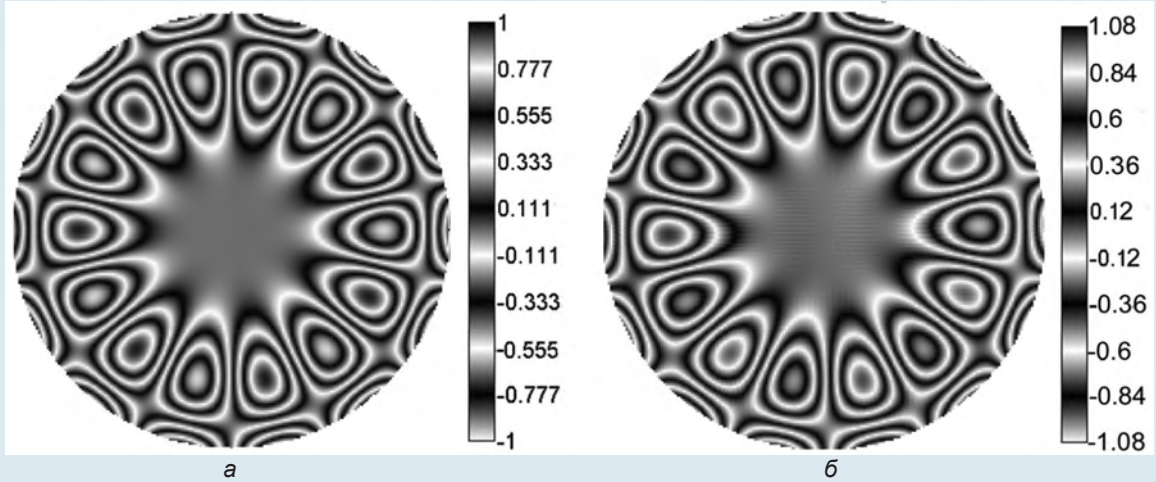
Растровая картина в естественном масштабе и шпирен-визуализация (в нелинейной шкале) показаны на рисунке. Оттенки цветов в шпирен-визуализации соответствуют величине

$$S = 0,8 \exp \left(-5 \left(\left(\frac{\partial W}{\partial r} + 2 \frac{W}{r} \right)_{\max} \right) \right)$$

Отметим хорошее сохранение сферической симметрии в представленных расчетах.



Задача 3. Растровая картина модуля скорости (шпирен-визуализация на внешней поверхности куба). Расчет в рамках гамильтоновой механики на момент времени $t = 7 \cdot 10^{-5}$ с



Задача 4. Растровая картина вертикальных смещений (W_z/W_0) для гармонической волны ($n = 7$) в момент времени $t = 5T/4$: а – эталонное решение, б – расчет в рамках гамильтоновой механики

Задача 4. Изгибные волны на круглой пластине.

В теории изгиба полубесконечных пластин хорошо изучено распространение вдоль прямолинейных границ локализованных волн Коненкова (аналога волн Рэлея). Обобщение этих результатов на пластины с криволинейными границами позволило исследовать другой тип поверхностных волн – волн с эффектом «шепчущей галереи», возникающим при движении звуковых волн вдоль изогнутых границ.

Рассматривались изгибные колебания круглой пластины радиуса R . В соответствии с теорией Кирхгофа вертикальные компоненты скорости и смещения не зависят от координаты z , а поперечные компоненты являются линейными функциями z .

Растровые картины вертикальных смещений в линейной шкале (фигуры Хладни) показаны на рисунках. Фигуры Хладни вращаются вокруг оси z с постоянной угловой скоростью ω . Результаты расчетов соответствуют эталонному решению.

Разработана новая трехмерная численная методика ELGEN для расчетов характеристик электромагнитного



Задача 4. Форма пластины для гармонической волны ($n = 7$) при $t = T$. Вертикальные размеры увеличены в 80 раз. Расчет в рамках гамильтоновой механики

излучения (ЭМИ) от эллиптического источника. Методика основана на численном интегрировании однородных уравнений Максвелла с поверхностными источниками в эллиптических координатах во временном представлении. При получении разностной аппроксимации уравнений Максвелла по пространственным переменным использовались интегральные следствия этих уравнений, записанные для ячеек разностной сетки; разностная аппроксимация по времени получена на основе схемы покоординатного расщепления.

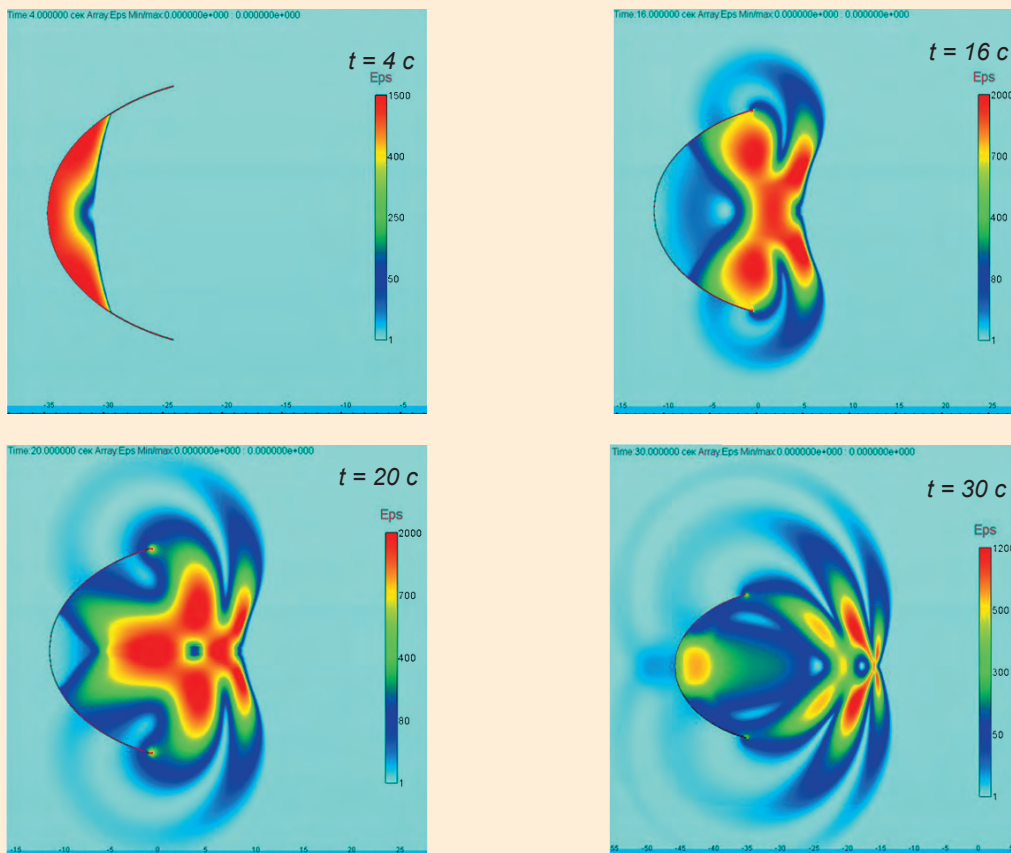
В рассчитываемой конструкции, представляющей собой эллиптический источник

излучения сверхширокополосного ЭМИ, реализуются следующие особенности и возможности, характерные для такого типа излучателей:

а) фокусировка сверхширокополосного ЭМИ в локальной области вблизи фокуса, что необходимо в ряде применений генераторов, прежде всего в медицинских целях;

б) пространственная конфигурация излучения на выходе, соответствующая точечному источнику, оптимальная для получения направленного излучения при использовании фокусирующей антенной системы;

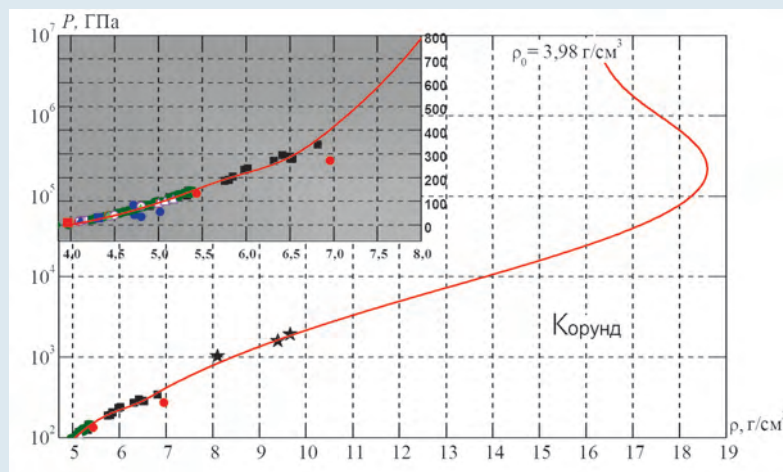
в) возможность каналирования сверхширокополосного ЭМИ для использования



Распределение плотности электромагнитной энергии

в конструкциях с большой площадью поверхности (большой электрической ёмкостью) и сравнительно небольшой выходной апертурой, что важно для решения технологических проблем создания образцов.

С использованием полуэмпирической модели для описания термодинамических свойств веществ в широкой области изменения плотности, температуры и давления (РОСА-МИ) разработаны новые широкодиапазонные уравнения состояния двух минералов – корунда (Al_2O_3) и периклаза (MgO). При построении этих уравнений учитывались имеющиеся в настоящее время экспериментальные и расчетные данные, характеризующие термодинамические свойства этих минералов. Разработанные уравнения состояния описывают как экспериментально исследо-

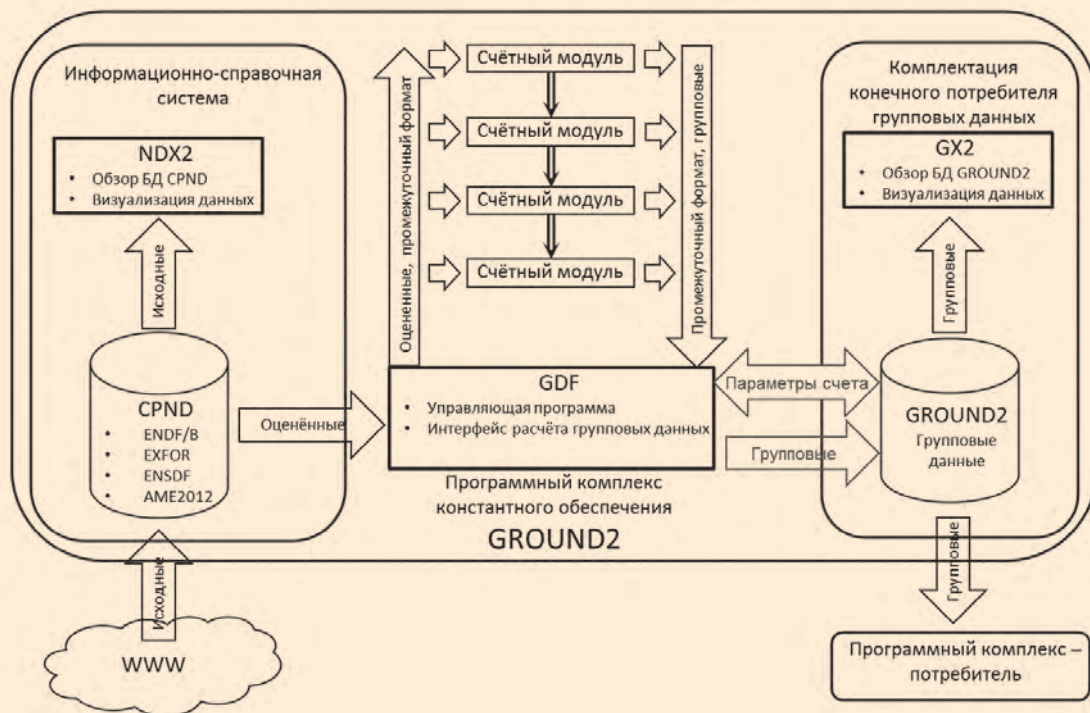


Зависимость давления от плотности на ударной адиабате Al_2O_3

ванные области, так и области высоких давлений и температур, в настоящее время доступные только для расчетов по теоретическим моделям.

Для обработки оцененных ядерных данных и расчета систем групповых констант во

ВНИИЭФ широко используется комплекс программ GROUND, созданный в 2011 г.; в 2019 г. разработана его вторая версия. Вторая версия комплекса программ GROUND построена по модульному принципу: она разделяется на информационно-справочную систему ядер-



Структура комплекса константного обеспечения GROUND2

но-физических данных NDX2 и программную платформу GDF. Программная платформа является оболочкой управления расчетом единых согласованных систем групповых констант, объединяющих данные о взаимодействии частиц (нейтронов, гамма-квантов, быстрых заряженных частиц) с ядрами выбранного множества изотопов. Групповые данные для каждого типа взаимодействия (пары налетающая частица – ядро) согласованы между собой посредством групповых разбиений как по энергии налетающих, так и рождающихся в реакциях частиц рассматриваемых типов.

База данных (БД) GROUND также разделена на два логических блока: БД CPND – исходные данные (оцененные, экспериментальные, справочные и др.) и БД GROUND2 – результирующие групповые константы.

База данных CPND (Collection of Preprocessed Nuclear Data) служит источ-

ником оцененных данных при подготовке систем групповых констант для задач моделирования переноса частиц, а также содержит полный набор данных для визуализации их в информационно-справочной системе NDX2:

- скалярные интегральные характеристики ядер (массы и энергии реакций);
- данные по уровням возбуждения и переходам ядер ENSDF;
- оцененные данные из библиотек в формате ENDF/B;
- экспериментальные данные EXFOR.

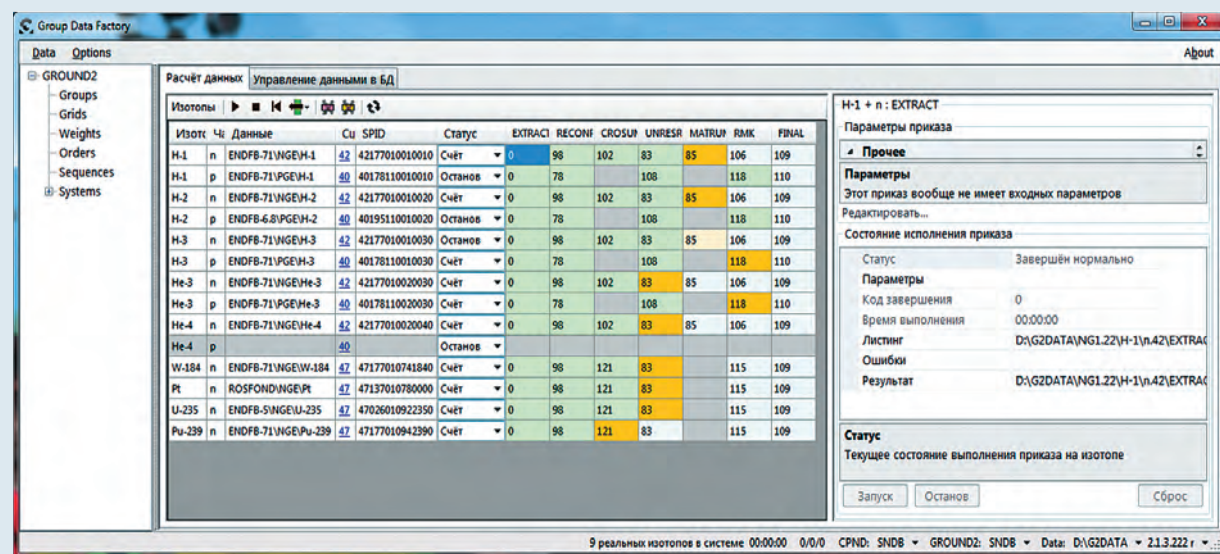
Ввод данных всех классов в БД CPND из источников в сети Интернет осуществляется посредством специализированных утилит – конверторов данных.

База данных GROUND2 предназначена для хранения рассчитанных групповых микроконстант взаимодействия частиц с ядрами изотопов совместно с параметрами их расчетов, что продиктовано

потребностями технологии их подготовки и необходимостью отслеживания и возможного воспроизводства всех этапов обработки оцененных ядерных данных и расчета групповых констант. БД GROUND2 является источником групповых данных для программных комплексов – потребителей многогрупповых констант, а также программы визуализации групповых ядерных данных GX2.

Обработка оцененных ядерных данных и расчет согласованных единых систем групповых констант взаимодействия нейтронов, гамма-квантов и быстрых заряженных частиц осуществляется в программной оболочке GDF.

Программу GDF можно классифицировать как клиентское приложение БД CPND и БД GROUND2, одновременно являющееся управляющей оболочкой для внешних счетных программ. Оно обладает модульной архитектурой для формирования входных дан-



Программная оболочка GDF в режиме управления расчетом групповых констант

ных и передачи их счетным программам комплекса.

Принципиальным новшеством комплекса GROUND2 является гибкое задание последовательности выполняемых программ для каждого типа взаимодействия (пары частица – изотоп), включенного в систему групповых констант, а также возможность гибкого задания входных параметров расчета для каждого счетного модуля этой последовательности.

При численном моделировании в эйлеровых переменных движения малодеформируемых тел (ударников) в упругопластических средах (преградах) возникает ряд проблем, связанных с точностью описания контактных границ между различными веществами. Одним из способов решения этих проблем является использование для описания ударника приближения абсолютно твердого тела. Ранее в методике ЭГАК был предложен и реализован соответствующий метод BODY-3D. В 2019 г. выполнена валидация метода BODY-3D на модельной задаче и в двух сериях экспериментов по пространствен-

ному движению малодеформируемых (жестких) ударников в упругопластических средах. Метод BODY-3D основан на использовании для описания ударника приближения абсолютно твердого тела и расчете течения окружающей среды в неинерциальной системе отсчета, связанной с неподвижным ударником. Численное моделирование процесса проникновения проводилось по методике ЭГАК на неподвижной счетной сетке.

В расчетах модельной задачи о внедрении по нормали стальных ударников в алюминиевую полубесконечную преграду получены следующие результаты:

- использование для описания малодеформируемого ударника приближения сплошной деформируемой среды приводит к росту ускорения торможения ударника на всем протяжении внедрения, что противоречит теоретическим представлениям и результатам расчетов в лагранжевых переменных. Это связано с эффектом «прилипания» контактирующих материалов, возникающим в расчетах на неподвижной счетной сетке;

- эффект «прилипания» отсутствует в случае использования для описания ударника приближения абсолютно твердого тела. Это позволяет в расчетах на неподвижной счетной сетке получать результаты, хорошо согласующиеся с данными численного моделирования этого процесса в лагранжевых переменных.

В расчетах опытов по движению конических ударников в пластине получены следующие результаты:

- численно воспроизведены различные типы траекторий движения проникающих в преграду в зависимости от величины угла атаки α , наблюдавшиеся в опытах;

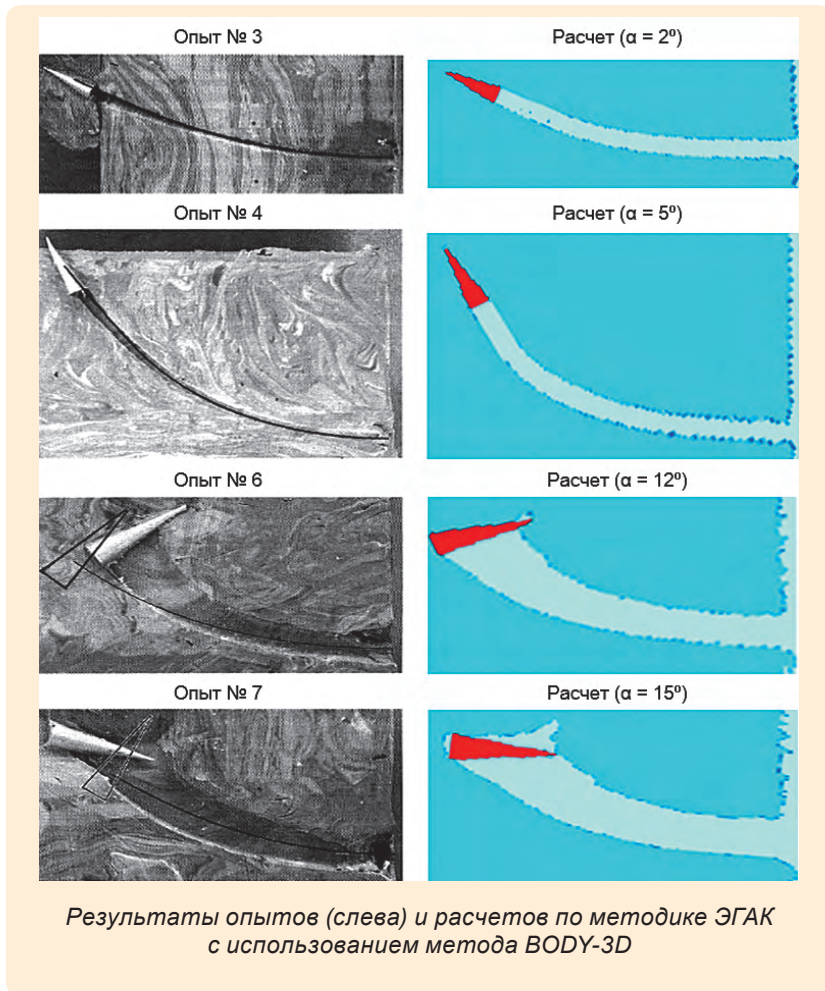
- количественное сравнение результатов опытов и расчетов по форме каверны, положению в ней проникающего, а также по траектории движения центра масс ударника показало их хорошее согласие.

Таким образом, продемонстрирована адекватность результатов численного моделирования пространственного движения малодеформируемых ударников в упругопластических средах, полученных по эйлеровой методике ЭГАК с использованием метода BODY-3D.

Как и в опытах, при численном моделировании процесса внедрения при небольших углах атаки $\alpha = 2^\circ$ и 5° проникатель движется по окружностям большого радиуса, а к моменту его остановки траектория постепенно выпрямляется. При больших значениях угла атаки $\alpha = 12^\circ$ и 15° проникание завершается «кувырком» ударника. После остановки углы разворота ударника относительно оси стрельбы в опытах и расчетах оказались близки. Например, в опыте № 6 проникатель совершил «кувырок», но его вершина осталась заглубленной в стенке каверны. А в опыте № 7 вершина располагалась в самой каверне, без контакта с ее стенками. Причем в стенке каверны от нее осталась вмятина.

Многие классы прикладных задач численно решаются с помощью уравнения переноса частиц, учитывающего взаимодействие частиц со средой в кинетической постановке. Некоторые задачи существенно отличаются по оптическим свойствам подобластей в исходной области решения.

Как известно, в задачах с резко меняющимися градиентами решения схемы аппроксимации существенно повышаются требования к качеству сеточных методов решения задач переноса. Осцилляции, нарушающие физические представления о гладкости и монотонности решения, являются характерными для линейных сеточных методов второго и более высоких порядков аппроксимации, в том числе для схем типа DSn-метода. Кроме того, подобные ситуации могут приводить к появлению отрицательных потоков. Поэтому особенно актуальна задача построения новых классов разностных схем, которые обеспечивали бы одновременно положительность и монотонность решения ис-



ходной задачи, второй или более высокий порядок аппроксимации, логически и арифметически простые алгоритмы расчета ячейки, возможность построения эффективных итерационных методов ускорения.

Специалистами ИТМФ предложен подход к построению таких схем под названием «нелинейная реберная схема». Основные особенности подхода: введение расширенного сеточного шаблона для искомых функций скалярного потока и потока в фазовом пространстве, включающего значения как в центрах ячеек разностной сетки, так и на ее сторонах; применение в качестве замыкающих соотношений дифференциальных нелинейных уравнений с коэффициентами и правыми частями, полученными с помощью специального алгоритма.

Рассматривалось применение нелинейной реберной схемы к одномерному и двумерному случаям стационарного уравнения переноса частиц в декартовой системе координат. В одномерном случае численные исследования показывают, что НР-схема при сохранении второго порядка точности обеспечивает монотонное и положительное решение. В случае решения двумерного уравнения переноса НР-схема также продемонстрировала монотонность и положительность. Установлено, что при измельчении сетки результаты, полученные с использованием DD- и НР-схем, сводятся к одному решению. Во всех рассмотренных задачах отличие численных результатов НР- и DD-схем в интегральной норме составляет не более 2 %.

Таким образом, можно сделать вывод о перспективности

применения нелинейной ре-берной схемы аппроксимации уравнения переноса в расчетах. В дальнейшем планируется обобщение и численное обоснование НР-схемы применительно к случаям записи двумерного уравнения переноса в цилиндрической системе координат и трехмерного уравнения переноса в декартовой системе координат.

С целью повышения точности моделирования численных методик, использующих лагранжево-эйлеров подход к решению задач механики сплошных сред, создан консервативный по полной энергии глобальный алгоритм пересчета величин на эйлеровом этапе счета шага по времени в разностных схемах газовой динамики на регулярной четырехугольной лагранжево-эйлеровой пространственной сетке. Значения газодинамических величин на новой сетке в данном алгоритме вычисляются из условия сохранения соответствующих интегральных величин. Вычисление новых значений удельной внутренней энергии осуществляется на основе сохранения интегральной внутренней энергии с учетом поправок, обеспечивающих сохранение полной энергии. Доказаны следующие утверждения:

- добавки к интегральной внутренней энергии каждой ячейки сетки неотрицательны;
- удельная внутренняя энергия, вычисленная по интегральным вкладам внутренней энергии, и удельная внутренняя энергия, вычисленная по интегральным энергиям с учетом поправок, отличаются на величину второго порядка малости по некоторому линейному размеру ячейки новой сетки;
- на постоянном по пространству поле скоростей добавки к интегральной внутренней энергии равны нулю.

Представленный алгоритм консервативного пересчета величин можно использовать в паре с любой консервативной по полной энергии разностной схемой лагранжева этапа счета шага по времени. В совокупности получается полностью консервативная разностная схема газодинамики на лагранжево-эйлеровой сетке.

Глобальный характер алгоритма пересчета, во-первых, не ограничивает величину смещения узлов сетки при ее перестроениях и, во-вторых, позволяет подключать программу пересчета величин не на каждом шаге по времени, а через заданное число шагов или автоматически по некоторым критериям. Это позволит сэкономить затраты времени на расчет. Кроме того, обеспечивается возможность единовременного консервативного пересчета величин со «старой» сетки на «новую» даже при несовпадении количества ячеек.

В настоящее время в ряде программных комплексов, применяемых в РФЯЦ-ВНИИЭФ для решения задач математической физики, широко используется библиотека PMLP/Parsol. Она предназначена для решения больших разреженных линейных систем (СЛАУ) в последовательном и параллельном режимах итерационными методами. В состав библиотеки входят предобусловленные итерационные решатели и предобуславливатели.

Распараллеливание решения СЛАУ осуществляется как на распределенной памяти (MPI-интерфейс), так и на общей (OpenMP-интерфейс).

Наличие большого числа параметров решателей и предобуславливателей (в дальнейшем – просто решателей), входящих в состав библиотеки,

с одной стороны, вызывает у пользователя затруднение при выборе наиболее подходящего решателя. С другой стороны, сделанный однажды выбор решателя, эффективного в каких-то задачах, может оказаться неэффективным в других задачах или даже в одной задаче на разных участках счета. Поэтому должна существовать возможность смены решателя в процессе счета. Для этого необходимо освободить пользователя, во-первых, от первоначального выбора оптимального решателя под задачу и, во-вторых, от замены решателя на более подходящий к изменившимся свойствам СЛАУ. То есть необходим механизм автоматического подбора решателя под задачу, а также под конкретный этап развития моделируемого физического процесса. Это позволит добиться уменьшения времени счета задач, повысит надежность решения СЛАУ и облегчит использование библиотеки.

Можно выделить несколько этапов работы адаптивного выбора метода решения СЛАУ: чтение параметров и подготовка к работе, испытание назначенных к работе методов, выбор оптимального метода для дальнейшего счета, обработка особой ситуации, т. е. реакция на решение очередной СЛАУ с недостаточной точностью.

Для задания параметров метода решения потока СЛАУ используется структура **parsol**, в которой перечислены набор испытываемых предобуславливателей и их параметры, передаваемая в библиотеку PMLP/Parsol для решения потока СЛАУ одним из заданных в ней методом. Программа адаптивного выбора метода решения после оценки результатов решения СЛАУ текущим методом на предыдущем шаге по времени может испытать

другой метод решения и продолжить счет наискорейшим из двух.

Проведение испытаний – это замеры времени полного и/или частичного (на основе ранее выполненного полного) построения предобуславливателя и времени решения СЛАУ, запись числа итераций и количество решенных СЛАУ на шаге по времени. После решения каждой СЛАУ в ходе испытаний вычисляются времена построения в зависимости от признака неизменности «портрета» матрицы и времени, затраченного на одну итерацию (цены итерации). После решения всех СЛАУ испытываемым методом на последнем шаге по времени выбирается метод для следующего шага по времени. Испытания заканчиваются, когда собрана информация обо всех допущенных к испытаниям методах (предобуславливателях), пока текущий оптимальный метод не дал сбой или резко не изменились его затраты на решение СЛАУ.

Механизм адаптивного выбора решателя был опробован в расчетах теплопроводности по двумерной методике МЕДУ-ЗА и трехмерным методикам МИМОЗА, МРС, ЛОГОС-Тепло. Расчеты проводились в последовательном и параллельном режимах и показали, что применение механизма адаптивного выбора решателя уменьшает время решения СЛАУ по сравнению с вариантом задания конкретного решателя, и в ряде случаев существенно.

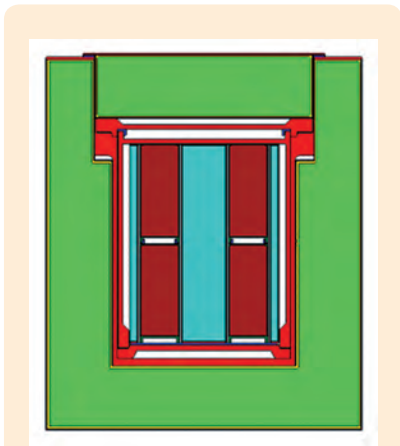
Разработанная в ИТМФ программа TDMCC в 2018 г. была аттестована Ростехнадзором и принята для расчетов ядерной и радиационной безопасности. С помощью этой программы специалисты РФЯЦ-ВНИИЭФ провели исследование по обеспечению ядерной и радиационной безопасности при пере-

возке ураносодержащих материалов (с обогащением до 20 % по ^{235}U) в созданном в РФЯЦ-ВНИИЭФ конкретном образце транспортного упаковочного контейнера ТУК-159. Исследовалась возможность безопасной перевозки загруженного ТУК-159 всеми видами транспорта, включая воздушный.

Конструктивно ТУК-159 состоит из пяти основных элементов: деревянного демпфера, силового корпуса, внутреннего корпуса, чехла и 10 ёмкостей для размещения радиоактивного содержимого. Согласно требованиям МАГАТЭ по обеспечению безопасности упаковок с ядерными делящимися материалами при воздушных перевозках ядерная безопасность ТУК-159 должна подтверждаться как для исходного состояния упаковки, так и для двух серий усиленных аварийных воздействий.

По нормам МАГАТЭ предельно допустимым значением $K_{эф}$ для одиночного ТУК считается 0,95. По итогам исследования оказалось, что с учетом погрешностей максимальные значения $K_{эф}$ для одиночной и группы упаковок ТУК-159 составили:

- в нормальных условиях эксплуатации $K_{эф} = 0,421$,
- в аварийных ситуациях $K_{эф} = 0,912$.



Продольное сечение ТУК-159

Таким образом, по результатам численных исследований ТУК-159 соответствует требованиям МАГАТЭ и пригоден для транспортировки ураносодержащих материалов. Количество упаковок на одном транспортном средстве ограничено 50 штуками. Как показали результаты расчетов, даже при более чем пятикратном превышении допустимого количества упаковок в нормальных условиях и более чем двукратном превышении – в аварийных системах остается подкритичной и, следовательно, ТУК-159 удовлетворяет всем требованиям по обеспечению ядерной безопасности.

МЕТОДИЧЕСКИЕ РАБОТЫ В ИНТЕРЕСАХ РАЗВИТИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ БАЗЫ РФЯЦ-ВНИИЭФ

Одной из основных целей экспериментов на лазерных установках РФЯЦ-ВНИИЭФ является исследование процессов переноса рентгеновского излучения в полостях мишеней различного типа, включая мишени с термоядерными капсулами. Численный анализ результатов экспериментов – необходимый этап на стадии выбора сценария постановки экспериментов, прогнозирования их результатов и оценки полученной информации. Численный анализ осуществляется с помощью двумерных и трехмерных математических комплексов, основанных на различных физических моделях и математических методах, что объясняет тесное сотрудничество между физиками-экспериментаторами и специалистами математического отделения РФЯЦ-ВНИИЭФ.

Примером такого сотрудничества могут служить результаты расчетов тестовой двумерной осесимметричной

задачи переноса излучения в вакуумной области, моделирующей внутреннюю полость мишени лазерного и тяжелоионного термоядерного синтеза. В этом исследовании использовались различные методики: «вакуумное» приближение с использованием угловых коэффициентов видимости, диффузионное приближение, многогрупповое кинетическое приближение, метод Монте-Карло. Все методики обеспечивают хорошую точность численного решения задачи (отличие не более 0,1 %).

В рамках исследования особенностей формирования сигнала времяпролетного детектора при измерении излучения плазменного фокуса в замкнутом пространстве проанализированы результаты измерений выхода ДД-нейтронов в экспериментах с плазмодиффузионной (ПФ) камерой мейзеровского типа. Проведены расчеты формирования сигнала применительно к регистрации излучения ПФ-камеры сцинтилляционными детекторами (СД) методом времени пролета для конкретных условий измерений в экспериментальном зале, а именно трехмерной геометрии среды, окружающей источник излучения и детектор, заметного вклада в регистрируемый сигнал нейтронного и гамма-излучения, обусловленного взаимодействием нейтронов с окружающей средой.

Для объяснения особенностей, наблюдаемых на экспериментальных осциллограммах, была предложена гипотеза о влиянии анизотропии выхода нейтронов из источника на форму сигнала СД. Для обоснования этого предположения были проведены модельные расчеты по методике на основе метода Монте-Карло, в которых угловое распределение источника нейтронов задавалось

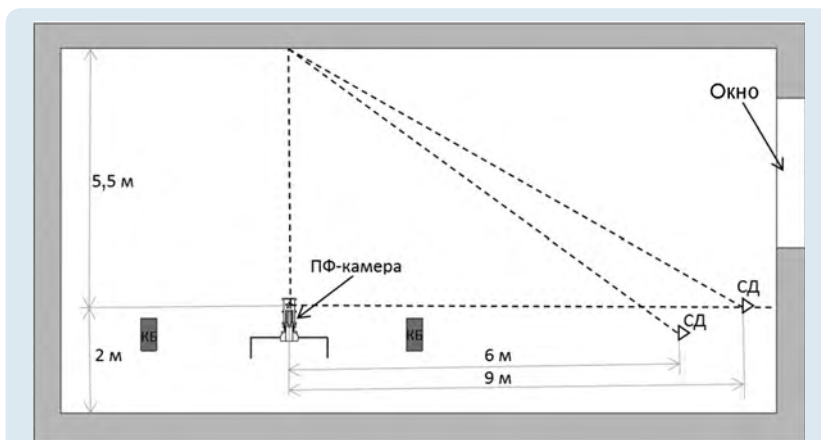


Схема расположения ПФ-камеры и сцинтилляционных детекторов в экспериментальном зале

изотропным и мононаправленным по оси камеры (крайняя степень анизотропии). Для более наглядной интерпретации процессов генерации рассеянного излучения источник нейтронов задавался мгновенным, с энергией 2,5 МэВ. Как общая картина, так и временное положение характерных пиков на экспериментальных осциллограммах в целом соответствуют расчетной картине и подтверждают гипотезу заметного влияния на формирование сигнала детектора рассеянного излучения вкуче с анизотропией потока нейтронов из источника.

Результаты расчетов такого типа могут в дальнейшем применяться для анализа экспериментов, в том числе для оценки анизотропии выхода нейтронов в конкретном разряде.

В настоящее время в РФЯЦ-ВНИИЭФ эксплуатируется и постоянно совершенствуется многомерный программный код ЛАСМ, предназначенный для численного моделирования физических процессов, происходящих в высокоэнергетической плазме, создаваемой в условиях экспериментов на современных лазерно-физических установках. Основное предназначение кода — проверка предсказательных теорий, прогнозирование

экспериментов, отработка конструкций сферических и цилиндрических боксов и мишеней с варьированием их геометрических размеров, толщины, составов и физических свойств.

На текущий момент существует возможность моделирования по комплексу ЛАСМ следующих физических процессов:

- лазерного энерговыделения;
- распространения излучения в многогрупповом кинетическом приближении;
- электронной (с коэффициентом ограничения по потоку) и ионной теплопроводности с электронно-ионной релаксацией;
- неравновесной газовой динамики;
- термоядерной кинетики и энерговыделения;
- переноса нейтронов в многогрупповом кинетическом приближении;
- переноса быстрых заряженных частиц;
- учета неравновесной кинетики ионизации вещества в приближении «среднего» иона.

В рамках численной оценки возможности зажигания ДТ-капсулы в сквозных расчетах распространения излучения в цилиндрическом боксе-конверторе в условиях работы лазерно-физических

установок по многомерному программному коду ЛАСМ было выполнено имитационное моделирование сжатия и энерговыделения ДТ-капсулы, находящейся в боксе установки NIF.

Итоги исследования:

- получена оценка влияния полиамидной мембраны на характеристики обжата криогенной мишени;
- по результатам двумерных расчетов констатируется отсутствие зажигания, однако были замечены и получены оценки энерговыделения и нейтронного выхода;
- на основе термодинамических данных рассчитаны сжатие и энерговыделение сферически-симметричной ДТ-капсулы. Получено полномасштабное термоядерное горение мишени.

В целом по итогам численного исследования можно с уверенностью констатировать, что в РФЯЦ-ВНИИЭФ создан и реально существует предсказательный программный инструмент, позволяющий моделировать процессы лазерного термоядерного синтеза – многомерный программный код ЛАСМ.

РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ВЫСОКОПРОИЗВОДИ- ТЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ, СУПЕРКОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ, ИХ ПРОМЫШЛЕННОЕ ВНЕДРЕНИЕ

В 2019 г. продолжалось развитие отечественного прикладного программного обеспечения.

В Москве состоялась презентация тиражируемого коммерческого цифрового программного продукта ЛОГОС-Аэро-Гидро, предназначенного для решения инженерных задач в области течения жидкости и газа, а также много-

фазных реагирующих потоков и акустики.

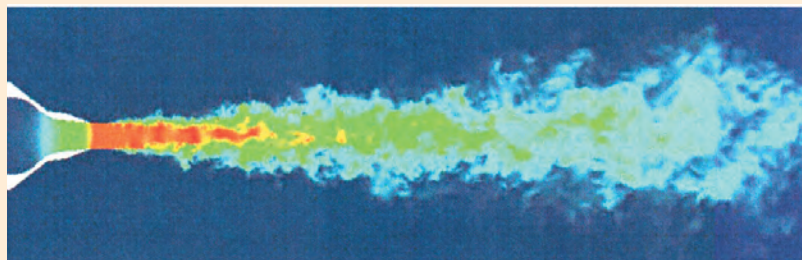
Фактически ЛОГОС-Аэро-Гидро стал первым коммерческим решением, входящим в число модулей пакета программных продуктов ЛОГОС. Его расширенный функционал в настоящий момент позволяет решать различные прикладные и исследовательские задачи в области течения жидкостей и газов с использованием широкого набора математических моделей и алгоритмов. Основные физические процессы, моделируемые сегодня при помощи ЛОГОС-Аэро-Гидро: ламинарные и турбулентные течения; многокомпонентные и многофазные течения; течения дисперсных сред; течения со свободной поверхностью; кинематика и динамика твердого тела в потоке; горение и химическая кинетика; акустика дальнего поля; теплокомфорт; обледенение.

Для вывода на рынок первого тиражируемого коммерческого цифрового программного продукта необходимо было предварительно создать коммерческую версию пакета программных продуктов ЛОГОС для массового потребителя; совместно со специалистами Госкорпорации «Росатом» усилить коммерческую привлекательность продукта; создать многоуровневую систему технической поддержки, центры обучения работе с данным пакетом программ и т. д. Одно-

временно продолжалась работа по передаче коммерческой версии пакета программных продуктов ЛОГОС в опытную эксплуатацию на предприятия ОПК и высокотехнологичных отраслей промышленности.

С этими задачами специалисты математического подразделения ИТМФ успешно справились. На VI Международном технологическом форуме «Инновации. Технологии. Производство», проходившем в апреле 2019 г. в Рыбинске, Объединенная двигателестроительная корпорация подписала дорожную карту по верификации и внедрению пакета программных продуктов ЛОГОС в российском двигателестроении в сотрудничестве с Госкорпорацией «Росатом» и РФЯЦ-ВНИИЭФ. Экспертный совет общероссийской премии «Проектный лидер-2019», направленной на поддержку лучших инициатив в области национальных проектов, экспорта и импортозамещения, присудил коммерческому цифровому программному продукту ЛОГОС-Аэро-Гидро звание лауреата в номинации «Интеграция цифровых технологий». Церемония награждения прошла 12 сентября в Москве в рамках 5-й выставки «Импортозамещение-2019».

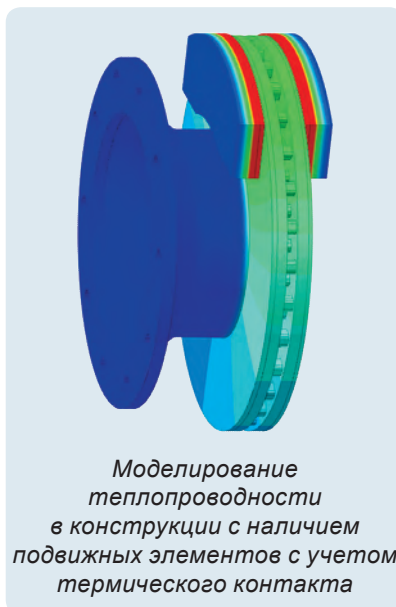
Новые функциональные возможности в 2019 г. получил модуль пакета программ ЛОГОС-Тепло, ориентированный на решение задач ста-



Возможности ЛОГОС-Аэро-Гидро: моделирование нестационарного истечения струи вихреразрешающими методами



*Диплом лауреата
общероссийской премии
«Проектный лидер-2019»*



*Моделирование
теплопроводности
в конструкции с наличием
подвижных элементов с учетом
термического контакта*

ционарной и нестационарной теплопроводности в твердых телах и неподвижных средах с возможностью учета процессов излучения, терморазложения и фазовых переходов. В нем был реализован ряд новых физико-математических моделей и методов, позволяющих решать задачи моделирования теплопроводности конструкций:

- с наличием подвижных элементов с учетом термического контакта. Здесь также реализованы алгоритмы быстрого поиска контактирующих граней в параллельном режиме;
- с теплообменом излучением в симметричных конструкциях.

Данные методы позволяют существенно снизить требования к вычислительным ресурсам.

В 2019 г. в модуль пакета программ ЛОГОС-Тепло была введена пользовательская библиотека теплофизических характеристик материалов, наиболее часто используемых при проектировании изделий и систем на предприятиях ОПК и стратегических отраслей промышленности.

Завершается аттестация модуля пакета программ ЛОГОС-Тепло для моделирования

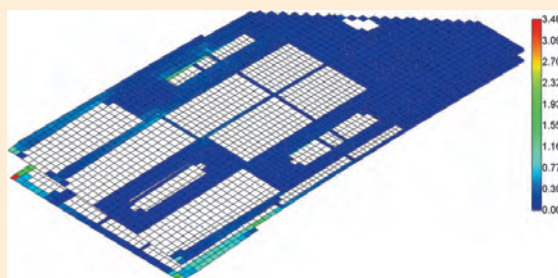
теплопроводности на объектах использования атомной энергии и транспортных упаковочных контейнеров с учетом нелинейности различной природы и теплообмена излучением.

В целом существующий функционал модуля пакета программ ЛОГОС-Тепло позволяет ему получить статус тиражируемого коммерческого цифрового программного продукта. В случае успешного прохождения необходимых для этого процедур он станет вторым коммерческим цифро-

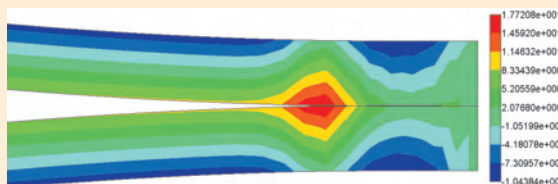
вым программным продуктом сводного пакета программных продуктов ЛОГОС. Выход третьего продукта запланирован на 2020 г. Ожидается, что им станет модуль пакета программ ЛОГОС-Прочность. В 2019 г. велись активные работы по развитию всех основных составляющих этого модуля, в том числе моделирования процессов статического, квазистатического и динамического деформирования конструкций, а также процессов вибрационной стойкости.

Отметим следующие направления функционального развития модуля ЛОГОС-Прочность для решения квазистатических задач деформирования конструкций в 2019 г.:

- моделирование разрушения элементов конструкций из композиционных материалов;
- метод когезионных зон для моделирования процесса трещинообразования;
- технология субмоделирования – двухэтапная схема проведения расчета, обеспечивающая уточнение решения в выделенном регионе расчетной модели без увеличения вычислительной нагрузки.



Распределение индекса разрушения по критерию Хилла в расчете напряженно-деформированного состояния панели летательного аппарата из композитного материала



Распределение интенсивности напряжений в задаче о раскрытии трещины в консольной балке (DCB-тест)

Для решения задач динамического деформирования конструкций развивались такие направления развития, как:

- расширение библиотеки конечных элементов и граничных условий (дискретные элементы, шарнирные соединения, новые типы жестких преград);

- введение новых типов сглаживания эффекта «песочных часов»;

- ведение новых моделей материалов и уравнений состояния (усовершенствованные модели композитных материалов, пенопласта и бетона);

- специализированный функционал для моделирования крэш-теста автомобиля (модели газонаполненных объемов для моделирования подушек безопасности, элементы для моделирования ремней безопасности).

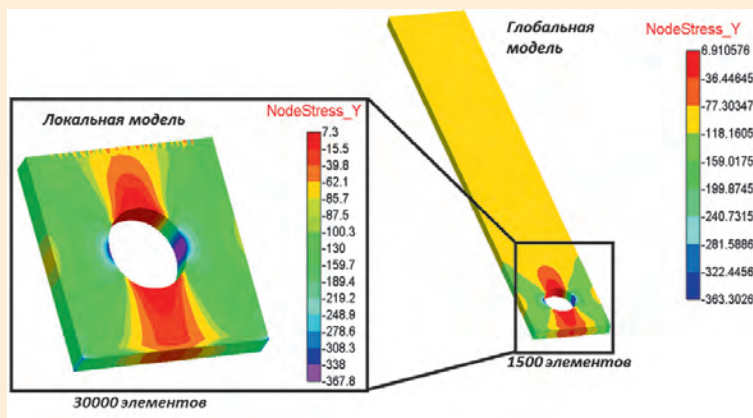
В области решения задач вибрационного анализа по итогам 2019 г. следует указать следующие новые направления:

- адаптация учета контактного взаимодействия при проведении различных типов вибрационного анализа;

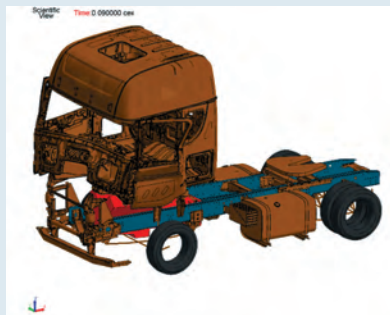
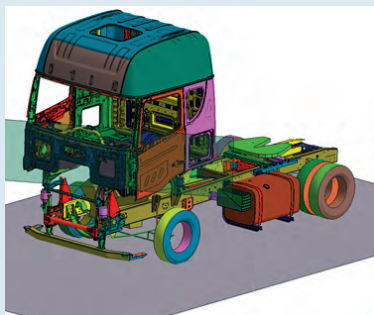
- существенное расширение функциональных возможностей модального анализа, предназначенного для поиска собственных частот и форм колебаний конструкций (модальный анализ с учетом демпфирования, поиск частот в заданном диапазоне, расчет факторов вовлеченности для мод, расчет векторов невязки);

- значительное усовершенствование реализации гармонического анализа (библиотека демпфирований, заданных для материалов; поддержка всех основных видов демпфирования; нагрузки, зависящие от частоты; комплексно заданные нагрузки с учетом фазы);

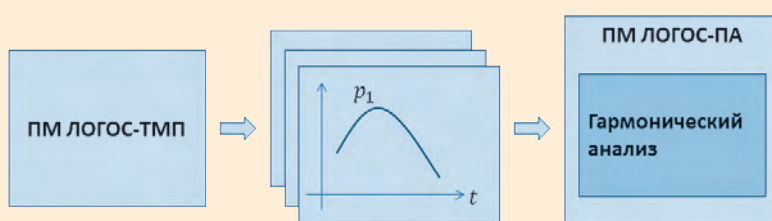
- развитие возможностей по описанию модели (амортизаторы, гибкие вставки);



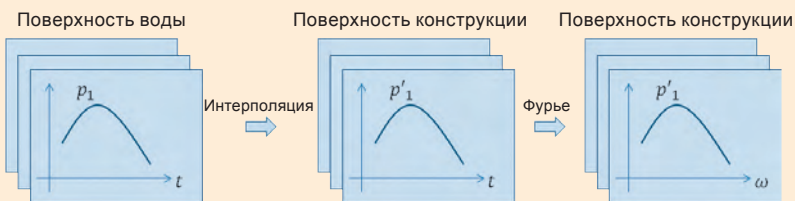
Уточнение решения в зоне концентратора напряжений по технологии субмоделирования



Моделирование крэш-теста прототипа автомобиля-тягача, движущегося со скоростью 30 км/ч



Процесс передачи нагрузок после гидродинамического расчета в прочностную часть для расчета вибропрочностных характеристик



Преобразование нагрузок в процессе передачи после гидродинамического расчета

– импорт гидродинамических нагрузок для проведения вибрационного анализа.

К имевшимся ранее возможностям Постпроцессора, входящего в сводный пакет программных продуктов ЛОГОС, в 2019 г. добавлены новые:

– экспорт 3D-сцен с результатами постобработки. Экспортированные сцены занимают гораздо меньший объем дискового пространства по сравнению с изначальными данными для постобработки. Кроме того, в отличие от готовых изображений, также являющихся результатом постобработки, экспортированные сцены допускают редактирование (смена ракурса просмотра отображаемых объектов,

цветовая заливка и др.), т. е. являются более функциональным объектом представления результатов постобработки по сравнению с традиционными изображениями;

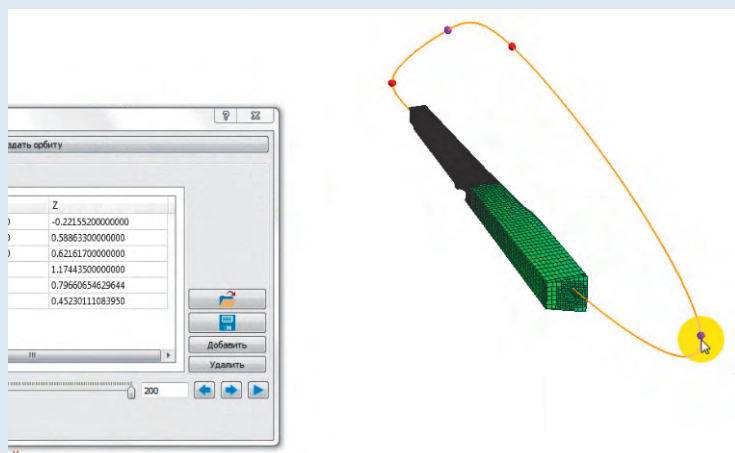
– постобработка результатов моделирования с возможностью задания ракурса просмотра с помощью виртуальной камеры для упрощения настройки необходимого пользователю вида. Камера позволяет оперировать непосредственно пространственными координатами для установления позиции наблюдателя (камеры) и целевой (фокальной) точки, а также задавать сложные траектории «облета» при формировании презентационных материалов;

– постобработка с помощью воксельной (объемной) и стереографики в режиме клиент – сервер для обеспечения эффекта погружения пользователя в сцену. Воксельная графика обеспечивает комбинацию цветовой интерпретации расчетных величин и уровней полупрозрачности не только для поверхностных полигонов, но и для всего моделируемого пространства. Эффекта полного погружения в сцену позволяет добиться технология стереоизображения, которая подразумевает построение двух изображений с разных ракурсов просмотра, соответствующих взгляду наблюдателя.

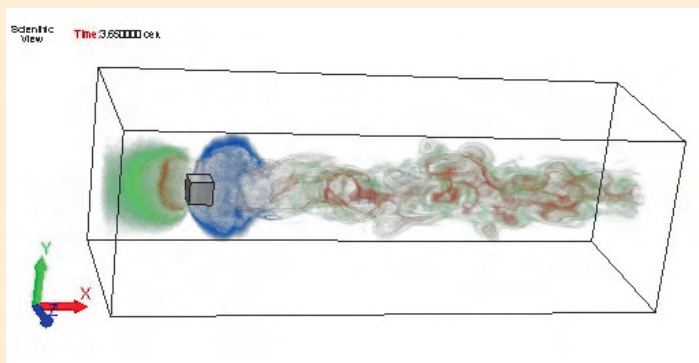
В 2019 г. в рамках соответствующего постановления Правительства Российской Федерации велись работы по внедрению пакета программ ЛОГОС в деятельность ряда ведущих предприятий ОПК. Техническими заказчиками указанных работ выступали АО «НПК «Техмаш», АО «Корпорация «ТРВ», филиал ПАО «Компания «Сухой» «ОКБ Сухого», ПАО «ОАК», ПАО «Ил», АО «СПМБМ «Малахит».

Пакет программ НИМФА – это инновационный программный продукт, развиваемый специалистами ИТМФ совместно со специалистами ФБГУ «Гидроспецгеология». Программа НИМФА предназначена для количественной оценки воздействия ядерно- и радиационно опасных объектов (ЯРОО), а также объектов использования атомной энергии на грунты, грунтовые и поверхностные воды на основе построения сеточных геофильтрационных, геомиграционных и геологических моделей.

Взаимодействуя с предприятиями Росатома в области охраны окружающей среды,



Формирование траектории «облета» для движения интерактивной камеры

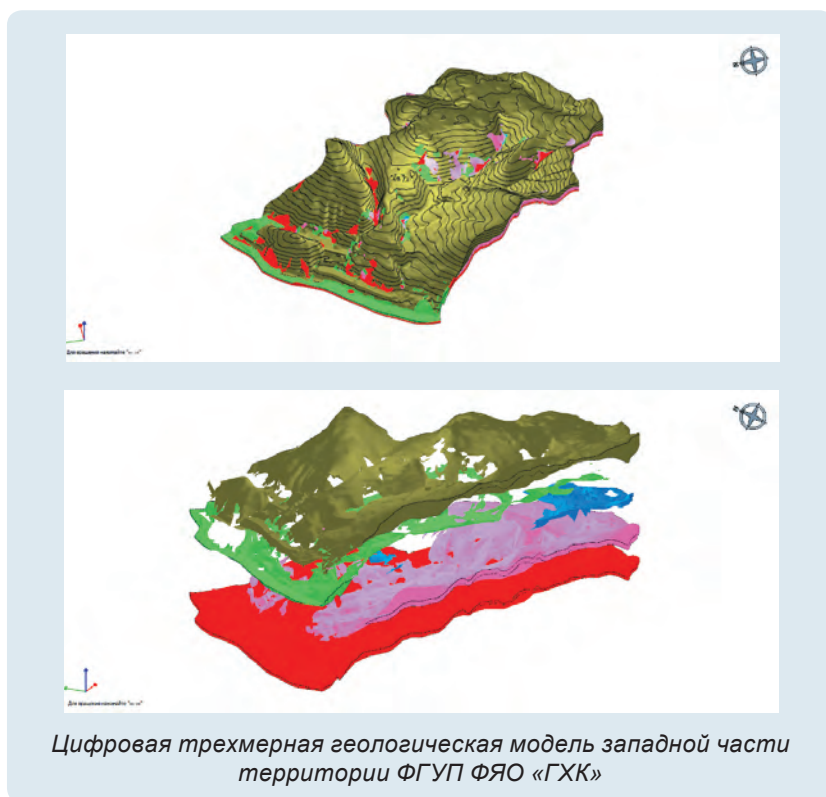


Результаты применения объемного рендеринга с использованием API OpenGL к моделированию процесса обтекания куба

в частности подземных вод, совместными усилиями специалисты РФЯЦ-ВНИИЭФ и ФБГУ «Гидроспецгеология» верифицировали программный комплекс НИМФА. Это позволило в 2019 г. успешно выполнить договор между Госкорпорацией «Росатом» и РФЯЦ-ВНИИЭФ на проведение научно-исследовательских работ по теме «Обеспечение высокой достоверности прогнозов распространения радионуклидов в грунтах и грунтовых водах при обосновании безопасности ЯРОО и вывода из эксплуатации пунктов хранения путем адаптации и внедрения в работы Госкорпорации «Росатом» отечественного программного комплекса НИМФА». В рамках работ по договору пакет НИМФА и разработанные средства пакета геомиграционных и геологических моделей были внедрены на предприятиях АО «ГНЦ НИИАР» и ФГУП ФЯО «ГХК».

Параллельно была осуществлена поставка лицензии на пакет НИМФА (в рамках отдельного лицензионного договора) в Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН (ИГЭ РАН).

В 2019 г. в составе пакета НИМФА создан программный модуль двухфазной фильтрации для численного моделирования течения подземных вод в условиях полного и неполного водонасыщения. Такие задачи возникают при рассмотрении довольно большого класса течений подземных вод, например образования депрессионных воронок вблизи карьеров и откачивающих скважин, сезонных изменений уровня грунтовых вод и т. д. Модуль двухфазной фильтрации в составе пакета НИМФА распараллелен, позволяет проводить расчеты задач с переменной влагонасыщенностью на супер-ЭВМ и расширяет класс решаемых с помощью пакета программ НИМФА задач.



Цифровая трехмерная геологическая модель западной части территории ФГУП ФЯО «ГХК»

Также в прошедшем году в составе пакета программ НИМФА разработана программа учета многоступенчатого радиоактивного распада при получении решения по изменению содержания отдельных изотопов во времени для системы произвольного изотопного состава. Это позволит точнее рассчитывать состав и концентрации радиоактивных загрязнений, переносимых подземными фильтрационными потоками, и тем самым повысит достоверность прогноза по ареалу радиоактивного загрязнения.

Таким образом, в рамках развития прикладного программного обеспечения в РФЯЦ-ВНИИЭФ при поддержке Госкорпорации «Росатом» активно развивается направление цифровизации геолого-гидрогеологических условий как в части эксплуатации ЯРОО, так и в части вывода из эксплуатации. Это позволяет смело говорить о том, что Госкорпорация «Росатом», не являясь недропользователем, ответственно относится

к обеспечению безопасности окружающей среды.

Еще одним важным компонентом суперкомпьютерных технологий является системное программное обеспечение. В этом направлении в 2019 г. в РФЯЦ-ВНИИЭФ выполнена уникальная разработка – создана отечественная защищенная операционная система, предназначенная для супер-ЭВМ различного класса.

К 2019 г. на предприятия и в организации РФ поставлено 14 высокопроизводительных вычислительных систем среднего класса производительности и более 150 компактных супер-ЭВМ, спроектированных и созданных специалистами ИТМФ. На международном военно-техническом форуме «Армия-2019» научной и инженерной обществу была представлена новая модель компактной супер-ЭВМ на отечественных процессорах, разработанной в РФЯЦ-ВНИИЭФ, – «Эльбрус-8С».

ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ (ИЛФИ)

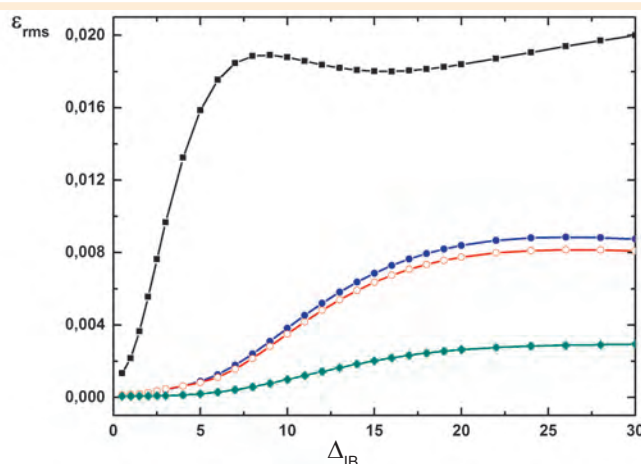
СИММЕТРИЧНЫЕ КОНФИГУРАЦИИ ЛАЗЕРНЫХ ИСТОЧНИКОВ ДЛЯ ПРЯМОГО ОБЛУЧЕНИЯ МИШЕНИ

Актуальной задачей в области инерциального термоядерного синтеза является обеспечение однородного воздействия интенсивного излучения на термоядерную капсулу для достижения глубокого сжатия и последующего зажигания термоядерного топлива.

Предложен метод достижения высокой однородности лазерного облучения сферической мишени, базирующийся на использовании свойств симметрии. Условия симметрии приводят к редукции спектра сферических гармоник (мод) в распределении интенсивности излучения на поверхности капсулы.

Прогресс в этом направлении достигается с помощью численной оптимизации симметричных конфигураций лазерных источников. Задача решается в два этапа. На первом этапе устанавливается вид сферических гармоник, удовлетворяющих группе симметрий вращения правильного многогранника. Для этого создан метод нахождения вида симметричных мод с помощью численного решения линейных систем совместности для матриц преобразования, описывающих повороты правильного многогранника. Нахождение симметричных мод позволяет математически сформулировать задачу их дальнейшей редукции как задачу минимизации квадратичной по этим модам формы невязки.

Многочисленная минимизация была успешно осуществлена для симметрии тетраэдра и куба-октаэдра.



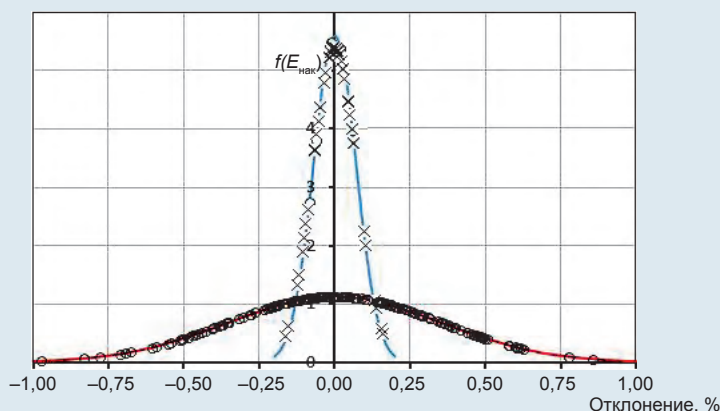
Среднеквадратичная неоднородность лазерной освещенности капсулы для конфигураций из 24 (■), 48 (●, ◊) и 72 (◆) источников в симметрии куба-октаэдра

Был найден новый класс симметричных систем лазерного облучения с повышенными характеристиками однородности освещенности термоядерной капсулы.

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И КАЧЕСТВА ПУЧКА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ВЫХОДЕ СИЛОВОГО УСИЛИТЕЛЯ УСТАНОВКИ «ЛУЧ»

По результатам исследования работы штатной систе-

мы электропитания установки «Луч» проведена ее модернизация: доработаны платы сопряжения модулей конденсаторной батареи с зарядными устройствами, заменены делители обратной связи в зарядных устройствах и внесены изменения в алгоритм работы автоматизированной программы управления зарядом. Это снизило нестабильность электрической энергии, запасаемой в модулях конденсаторной батареи к моменту разряда на лампы накачки по случайной ошибке, в 5 раз. Суммарно

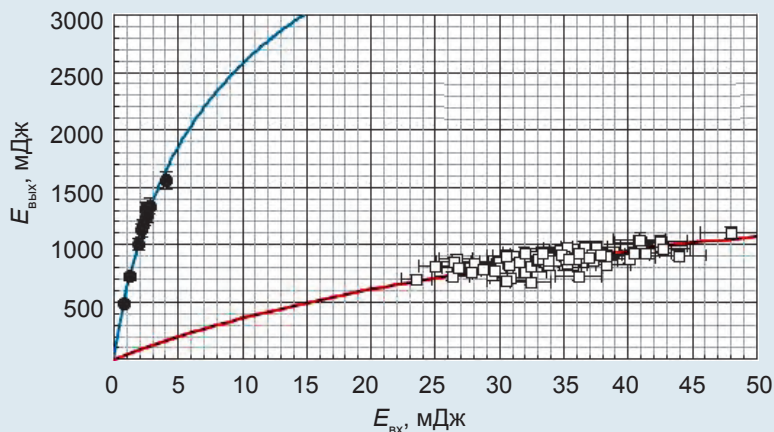


Распределения весовых функций плотности вероятности для энергии на накопителе $E_{\text{нак}}$ в экспериментах до (—) и после (—) модернизации системы электропитания: ○ — $U = 20$ кВ, × — $U = 19$ кВ

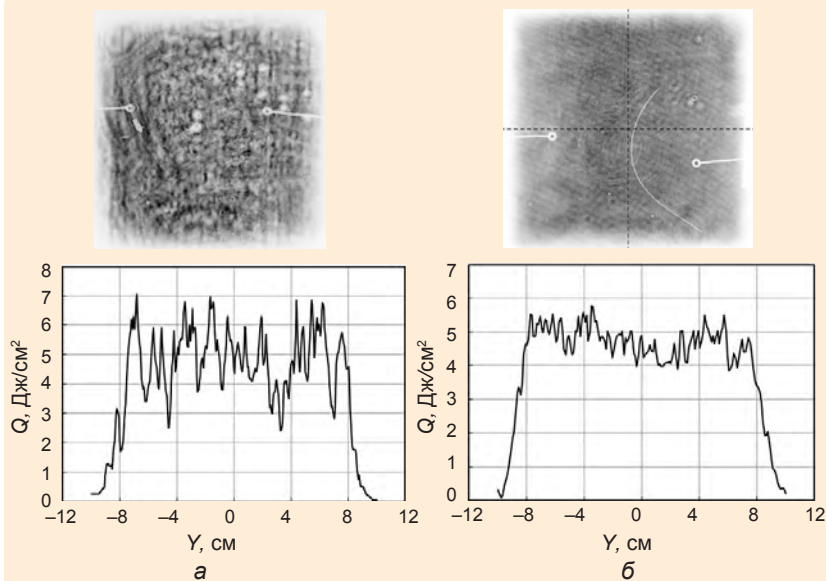
с учетом систематической ошибки нестабильность снижена в 7–8 раз. В результате в экспериментах зарегистрировано снижение разброса энергии лазерного излучения на выходе силового усилителя в 3 раза – с $\geq \pm 15\%$ до $\leq \pm 5\%$.

Проведено переоснащение лазерных усилителей на базе новых дисковых активных элементов (ДАЭ), изготовленных по усовершенствованным техническим требованиям. В частности, увеличена длительность затухания люминесценции с 300 до ≈ 320 мкс, снижен показатель ослабления на рабочей длине волны с $1,0 \cdot 10^{-3}$ до $\approx 0,7 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$. В качестве материала активной части выбрано стекло, обладающее более высоким значением сечения усиления ($3,8 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$), чем у ранее используемого ($3,6 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$). Линейный коэффициент усиления повышен на $\approx 10\%$, пассивные потери излучения по тракту снижены на $\approx 30\%$. В результате коэффициент усиления энергии излучения за два прохода возрос с ≈ 300 до 1200. Также в экспериментах на порядок была снижена требуемая энергия входного сигнала.

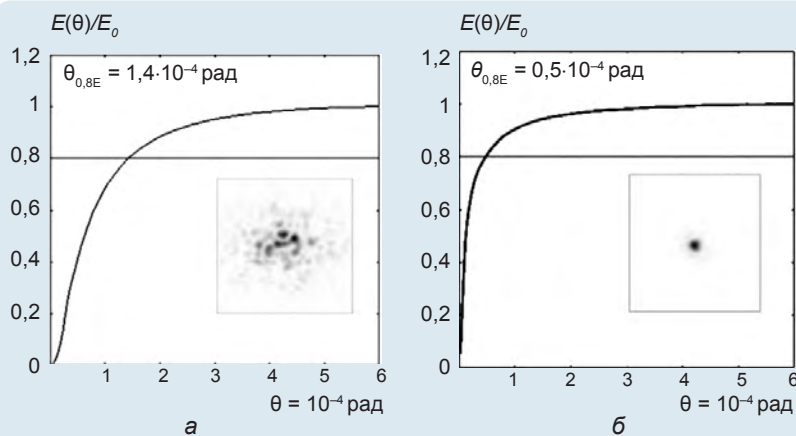
Выполнение более строгих требований к качеству финишной обработки рабочих поверхностей активных элементов позволило улучшить пространственное качество пучка излучения на выходе силового усилителя. В ближней зоне излучения отмечается трехкратное улучшение по параметрам PV (с ≈ 100 до 35 %) и RMS (с ≈ 30 до 12 %). В дальней зоне излучения зарегистрировано симметричное пятно с четким центральным керном, расходимость излучения снижена с $\theta_{0,8E} \approx 1,4 \cdot 10^{-4}$ до $0,5 \cdot 10^{-4}$ рад.



Энергия излучения на выходе лазерного канала до (○) и после (●) модернизации элементов канала и системы электропитания (точки – эксперимент, линии – расчет)



Изображение ближней зоны излучения до (а) и после (б) оснащения новыми ДАЭ



Изображение дальней зоны излучения и угловое распределение энергии в пучке до (а) и после (б) оснащения новыми ДАЭ

ИНСТИТУТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ГАЗОДИНАМИКИ И ФИЗИКИ ВЗРЫВА (ИФВ)

СУБТЕРАГЕРЦЕВАЯ СПЕКТРОМЕТРИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ КИНЕТИКИ ТЕРМОЛИЗА ЭНЕРГОЕМКИХ СОЕДИНЕНИЙ

В 2018–2019 гг. в ИФВ на рентгенографическом комплексе были проведены эксперименты, в которых сильнонеидеальная плазма дейтерия была квазиизоэнтропически сжата до плотности 12 г/см^3 при давлении 150 Мбар во взрывных устройствах сферической геометрии. В 2018 г. было получено рекордное давление в дейтерии 185 Мбар. Опыт 2019 г. проведен с целью проверки уравнения состояния дейтерия при более низком давлении. В эксперименте исследуемое устройство 1 размещается между двумя бетонными сооружениями 2, в которых находятся источники рентгеновского излучения. В левом защитном сооружении установлены два безжелезных импульсных бетатрона 3 БИМ234.3000, работающих в режиме последовательной генерации трех импульсов рентгеновского излучения с длительностью $\sim 150\text{--}180 \text{ нс}$. Работа бетатронов в таком режиме генерации позволяет просвечивать объекты с массовой толщиной $\sim 230 \text{ г/см}^2$, что эквивалентно толщине свинца $\sim 200 \text{ мм}$. Впервые в эксперименте ВНИИЭФ применялся линейный индукционный ускоритель ЛИУ-Р-Т 7, расположенный в правом сооружении 2, с энергией электронов 12 МэВ и длительностью импульса излучения $\leq 50 \text{ нс}$. Применение ЛИУ-Р-Т в оптимальном режиме позволяет просвечивать объекты с массовой толщиной до 300 г/см^2 , что эквивалентно толщине свинца $\sim 250 \text{ мм}$. Для сжатия газа использован блок

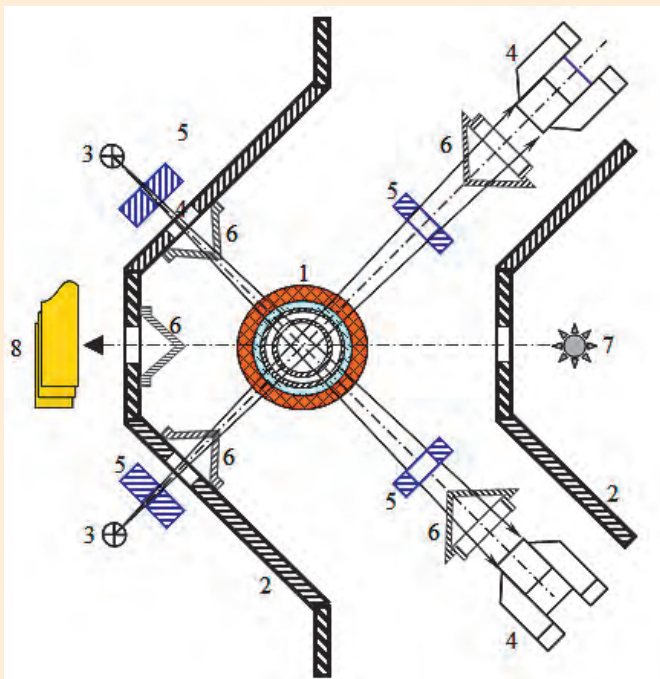


Схема эксперимента: 1 – экспериментальное устройство, 2 – защитное сооружение, 3 – источники излучения (бетатроны), 4 – детекторы, 5 – коллиматоры (свинец), 6 – конусы (алюминий), 7 – ЛИУ-Р-Т, 8 – набор фотохромных экранов



Общий вид зала с бетатронами (вверху) и ЛИУ-Р-Т (внизу)

взрывчатого вещества на основе октогена с массой 85 кг ТНТ. В эксперименте зарегистрированы семь фаз сжатия дейтериевой плазмы и последующего разлета газовой полости.

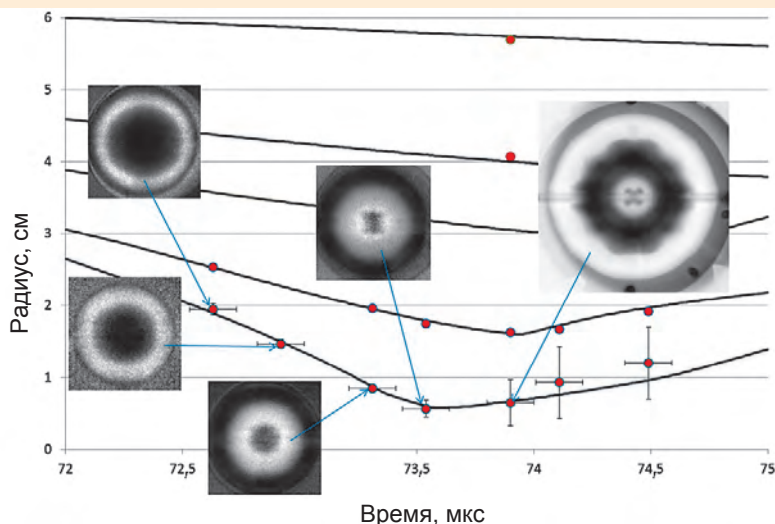
Давление в плазме определяли из газодинамического расчета с учетом реальных термодинамических и прочностных свойств всех элементов экспериментального устройства и их уравнений состояния. В расчетах использовались уравнения состояния материалов, введенные в газодинамический расчетный комплекс РФЯЦ-ВНИИЭФ.

Полученные в этих экспериментах $R(t)$ -данные, результаты газодинамического расчета с использованием уравнения состояния дейтерия Копышева – Хрусталева, а также экспериментальные рентгенограммы, показанные на рисунке, подтверждают, что расчет с использованием уравнения состояния дейтерия Копышева – Хрусталева, откалиброванный на основе модельных опытов, хорошо описывает измеренные рентгенографическим методом значения границ оболочки с дейтерием. А это говорит об удовлетворительном описании энергетики системы и динамики сжатия дейтерия.

Удовлетворительное соответствие экспериментальных и расчетных данных позволяет сделать вывод об адекватности уравнения состояния дейтерия Копышева – Хрусталева в области квазиизэнтропического сжатия дейтерия в диапазоне сверхвысоких давлений 20–200 Мбар (2000–20000 ГПа).

НОВЫЙ ПОЛИГОН ДЛЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В 2019 г. сдан в эксплуатацию испытательный полигон для размещения экспериментального научно-исследова-



Сравнение экспериментальных и расчетных данных для опыта по сжатию дейтерия до ~150 Мбар

тельного комплекса на базе газодинамических установок ствольного типа калибром от 14,5 до 307 мм. Комплекс предназначен для создания технологии и средств аттестации динамических свойств конструкционных материалов в условиях их старения, смены поставщиков и дрейфа технологий изготовления. Комплекс позволяет проводить экспериментальные исследования:

- деформационных и прочностных свойств материалов в широком диапазоне скоростей деформирования (от 10^2 до 10^8 с $^{-1}$) при ударно-волновом нагружении на скоростях до 4 км/с и по методам составных стержней Гопкинсона и Тейлора;

- внутрибаллистических параметров разгона метаемых объектов различной формы и массы, в том числе с ограничением перегрузок, действующих на метаемый объект;

- процессов пробития и проникания различных объектов в преграды.

МЕТОД ИСПЫТАНИЯ КИНЕТИЧЕСКИХ БОЕПРИПАСОВ

Разработан метод испытаний кинетических боевых частей (КБЧ) ракет на бронепробитие с определением параметров запреградного осколочного поля и зажигательного действия.

Отработана технология разгона КБЧ с относительной длиной (отношением длины КБЧ к ее диаметру) до 50 в газодинамической установке ствольного типа в подкалиберном варианте с отделяющимся и отсекаемым в ближней зоне выстрела (до 10 м от дульного среза) направляющим устройством и углом атаки КБЧ при подходе к цели не более 3°.

Отработаны новые схемы крепления КБЧ в направляю-

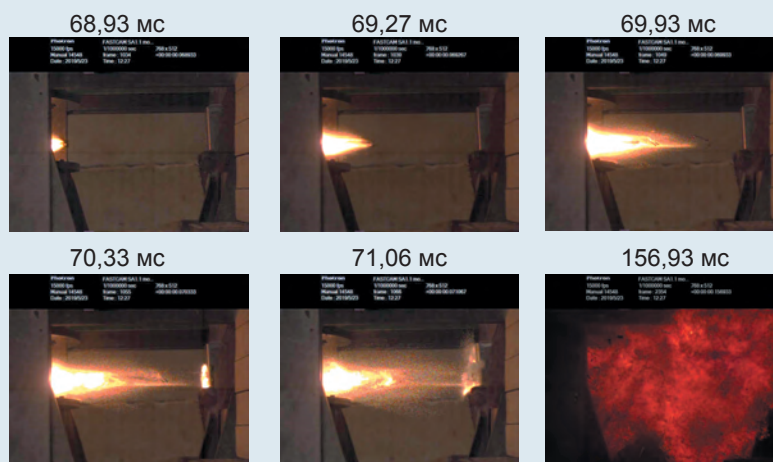


Экспериментальный научно-исследовательский комплекс

щем устройстве и обтюрации пороховых газов в заснарядном пространстве. Решена внутрибаллистическая задача разгона метаемого объекта в стволе установки с низкими перегрузками, ограниченными прочностными возможностями КБЧ. Разработанный метод успешно апробирован в сравнительных испытаниях макетов проектируемой в настоящее время КБЧ в инертном и оснащем различных составами реакционных материалов исполнении и с различными материалами бронестержня.

НОВОЕ ВЗРЫВЧАТОЕ ВЕЩЕСТВО ДЛЯ КУМУЛЯТИВНЫХ ЗАРЯДОВ

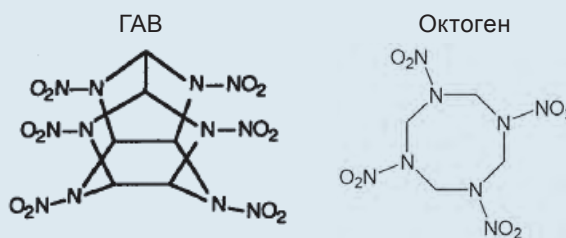
Завершен цикл исследований возможности применения нового взрывчатого состава (ВС) ГАМА повышенной мощности на основе индивидуального взрывчатого вещества (ВВ) ГАВ (CL-20) в кумулятивных зарядах. По результатам численного моделирования, выполненного в ИФВ, показана возможность повышения интегральных характеристик формируемых кумулятивных струй и проведена оптимизация конструкции штатного кумулятивного заряда применительно к новому ВВ. Были изготовлены опытные образцы кумулятивных зарядов с новым ВС, проведены экспериментальные исследования, в которых современный уровень основной характеристики кумулятивного заряда – бронепробития – около 10 калибров повышен до рекордного значения ~11,5 калибров. Сравнение проведено со штатным кумулятивным зарядом, снаряженным ВС ОМА на основе индивидуального ВВ октоген.



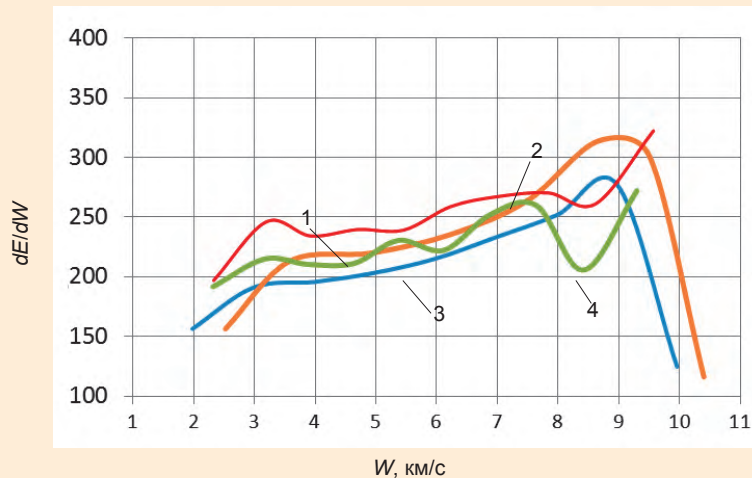
Регистрация запреградного осколочного поля и зажигательного действия



Газодинамическая установка ствольного типа



Структурные формулы индивидуальных ВВ



Расчетные зависимости распределения кинетической энергии по длине кумулятивной струи для выбора оптимального варианта конструкции: 1 – ВС 99080 ГАМА, 2 – ВС 99009 ГАМА, 3 – ВС 90001 ОМА, 4 – ВС 99081 ОМА

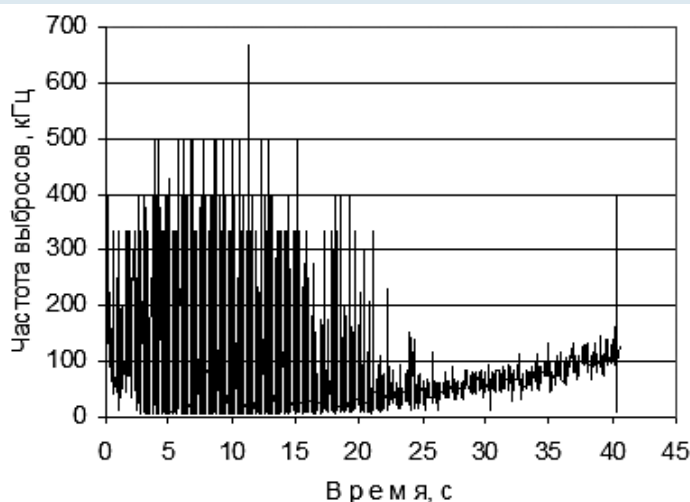
ВНЕДРЕНИЕ НЕРАЗРУШАЮЩИХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ СВОЙСТВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В ЛАБОРАТОРНУЮ ПРАКТИКУ

На основании результатов экспериментальных работ в условиях сжатия и растяжения по исследованию процесса разрушения и механических свойств деталей из пластифицированного октогена определена возможность прогнозирования прочностных характеристик деталей по параметрам акустической эмиссии при предварительном испытании их нагрузками, не превышающими предельного значения. Выявлено, что наиболее информативными параметрами для прогнозирования предельных значений механических характеристик деталей являются сумма импульсов и активность акустической эмиссии, значимые изменения которых наблюдаются в упругой области деформирования детали. На диаграмме активности акустической эмиссии выделена особая точка-максимум, которая позволяет визуально контролировать момент дости-

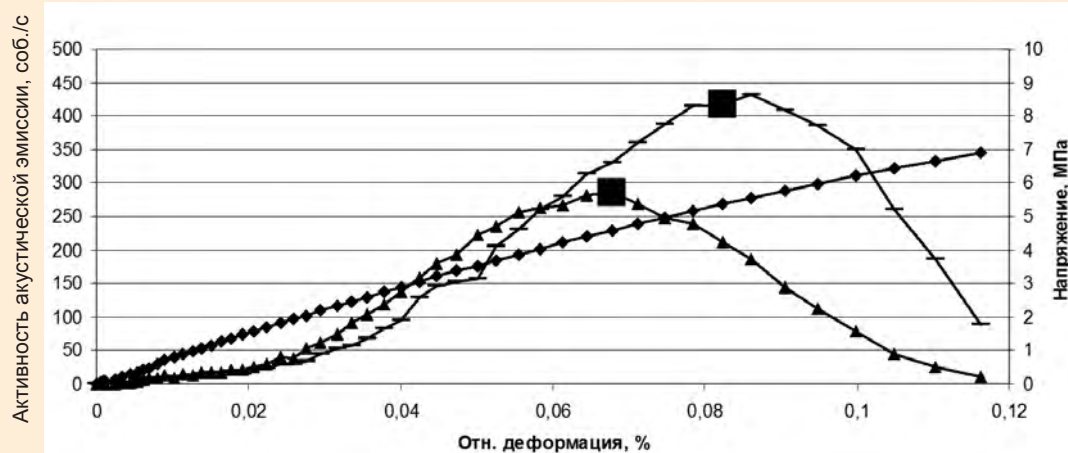
жения критической нагрузки в ходе эксперимента. Исследована возможность снижения нагрузки предварительного нагружения. Примером может служить диаграмма частоты выбросов, полученная в результате постобработки параметров акустической эмиссии, записанных в процессе нагружения деталей в условиях растяжения.

Известно, что каждая составляющая частотного спектра выбросов сигналов акустической эмиссии соответству-

ет возникновению дефектов определенного уровня. В данном случае достаточно резкий переход от высокочастотной составляющей сигнала к низкочастотной может свидетельствовать о сокращении времени межстадийного перехода и высокой скорости локализации дефектов, что и позволяет снизить нагрузку предварительного нагружения за счет выделения высокочастотной составляющей выбросов сигнала акустической эмиссии.



Зависимость частоты выбросов от времени нагружения при испытании деталей на растяжение



Диаграммы деформирования и активности акустической эмиссии для низкочастотного (— от 0–125 кГц) и высокочастотного (▲, от 125–1000 кГц) диапазонов, полученные при испытании деталей размером 10×15×150 мм в условиях растяжения: ■ – точки перегиба, ◆ – σ – ε

Диаграммы активности акустической эмиссии, полученные при испытании деталей на растяжение, построены для двух частотных диапазонов: низкочастотного (до 125 кГц) и высокочастотного (выше 125 кГц). Диапазон частот подбирался опытным путем. Видно, что с повышением частот выбросов акустической эмиссии точка экстремума активности смещается в сторону снижения нагрузки и деформации.

С учетом вышеизложенного были проведены опыты по определению прочности деталей из пластифицированного октогена по результатам предварительного нагружения с погрешностью, сопоставимой с погрешностью определения прочности при механических испытаниях. Способ прогнозирования заключался в следующем: деталь нагружали до момента, когда активность акустической эмиссии достигала максимума, после чего нагружение останавливали и определяли значения ε_p , соответствующие активности акустической эмиссии максимуму активности.

Используя значения P_i и ε_p , соответствующие активности акустической эмиссии, по приведенным ниже соотношениям определяли предельные характеристики детали из ВВ:

при сжатии детали

$$\varepsilon_p = \frac{100\%}{51\%} \varepsilon_i, \%,$$

$$P_p = \frac{100\%}{57\%} P_i, \text{ кН},$$

$$\sigma_p = \frac{100\%}{57\%} \sigma_i, \text{ МПа},$$

при растяжении детали

$$\varepsilon_p = \frac{100\%}{55\%} \varepsilon_i, \%,$$

$$P_p = \frac{100\%}{62\%} P_i, \text{ кН},$$

$$\sigma_p = \frac{100\%}{62\%} \sigma_i, \text{ МПа}.$$

Исследование возможности снижения нагрузки предварительного нагружения путем выделения высокочастотных составляющих спектра выбросов акустической эмиссии при прогнозировании прочностных характеристик деталей позволяет использовать испытанные детали в других видах исследований.

СУБТЕРАГЕРЦЕВАЯ СПЕКТРОМЕТРИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ КИНЕТИКИ ТЕРМОЛИЗА ЭНЕРГОЕМКИХ СОЕДИНЕНИЙ

Завершен очередной этап разработки метода нестационарной субтерагерцовой спектроскопии и его приборного оснащения для изучения кинетики термолитического разложения газообразных продуктов их разложения.

Получен патент на изобретение «Способ спектроскопического анализа газообразных продуктов разложения взрывчатых веществ» (№ 2695954, приоритет от 04.07.2018). Способ заключается в проведении спектрального анализа продуктов разложения взрывчатых веществ (ВВ) в режиме реального времени методом

субтерагерцовой спектроскопии. Разложение навески ВВ осуществляется в кварцевом сосуде, соединенном с вакуумируемой кюветой, через которую проходит фазоманипулированное излучение субтерагерцевого диапазона. По регистрируемому вращательному спектру делается вывод о составе газовой фазы продуктов разложения в тот или иной момент времени. Данный способ позволяет проводить анализ одновременно с высокой чувствительностью и селективностью, что недоступно при использовании современных приборов аналогичного назначения, представленных на рынке.

С участием Института физики микроструктур РАН (г. Н. Новгород) создан спектрометр субтерагерцевого диапазона, работающий в режиме быстрого сканирования по частоте и обеспечивающий сканирование широких спектральных диапазонов за времена порядка секунд. Выполнен ряд методических работ с образцами индивидуальных ВВ, по результатам которых сформирован технический облик перспективного универсального программно-аппаратного газоаналитического комплекса на базе субтерагерцевого спектрометра.

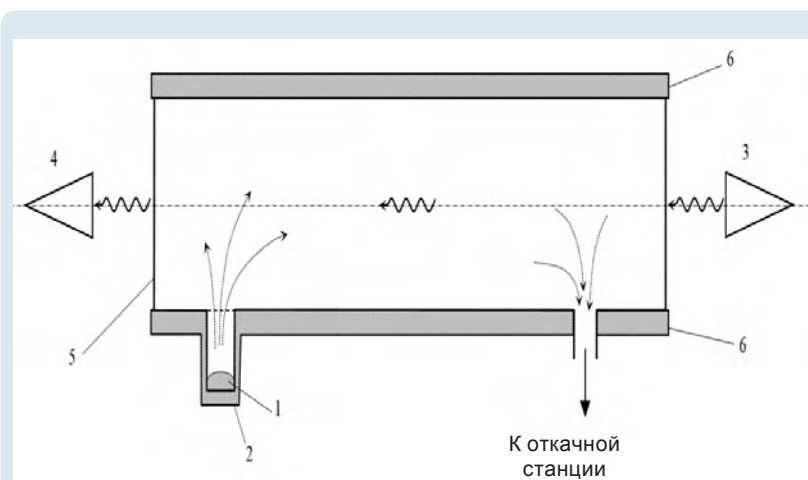


Схема аналитической ячейки спектрометра субтерагерцевого диапазона частот для анализа продуктов разложения ВВ

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ И РАДИАЦИОННОЙ ФИЗИКИ (ИЯРФ)

РАБОТЫ В ЦЕРН

Уже более 20 лет РФЯЦ-ВНИИЭФ в составе международной коллаборации в ЦЕРН проводит научно-исследовательские работы по созданию, эксплуатации и модернизации электромагнитного калориметра PHOS эксперимента ALICE. Цель эксперимента – решение одной из фундаментальных задач современной физики: информация о структуре, происхождении и эволюции барионной материи Вселенной.

В декабре 2018 г. Большой адронный коллайдер со всеми его детекторными системами был остановлен до декабря 2020 г. для проведения сервисных работ.

Специалистами РФЯЦ-ВНИИЭФ совместно с коллегами в 2019 г. в сжатые сроки (март–декабрь) завершен важный этап работ в рамках подготовки калориметра PHOS к дальнейшей эксплуатации в период до 2025 г. На этом этапе были выведены из эксплуатации четыре модуля калориметра PHOS и извлечены из шахты эксперимента ALICE (впервые с момента установки в 2009 г.), выполнен полный цикл работ по их сервисному обслуживанию. Специалисты РФЯЦ-ВНИИЭФ обеспечили проведение комплексных работ с электроникой «теплого» объема модулей, в результате чего общее количество каналов детектирования калориметра увеличилось почти в 1,5 раза. В ноябре все модули были установлены на место эксплуатации, подключены к системам жизнеобеспечения и подготовлены к тестовым испытаниям, которые начнутся в 2020 г.

2019-й год стал первым полноценным годом бесперебойной работы созданного в конце

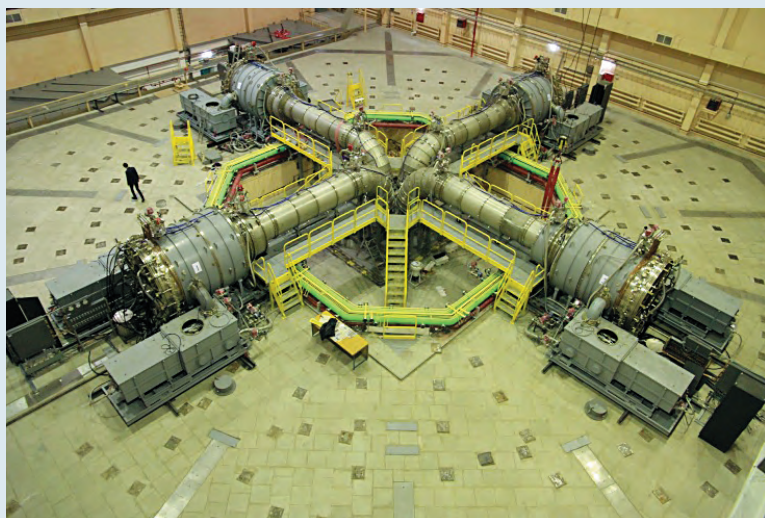


Установка модуля M1 внутрь магнита L3

2018 г. Саровского ресурсного центра на базе СарФТИ НИЯУ «МИФИ». Ресурсный центр обеспечивает непрерывный круглосуточный режим работы со скоростью обмена данными не хуже 1 Тбит/с, входит в состав российского консорциума RDIG (Russian Data Intensive GRID) и интегрирован в крупнейшую мировую сеть распределенных компьютерных вычислений WLCG с учетом всех требований ЦЕРН.

ОТРАБОТКА РЕЖИМОВ НА УСТАНОВКЕ «ГАММА-4»

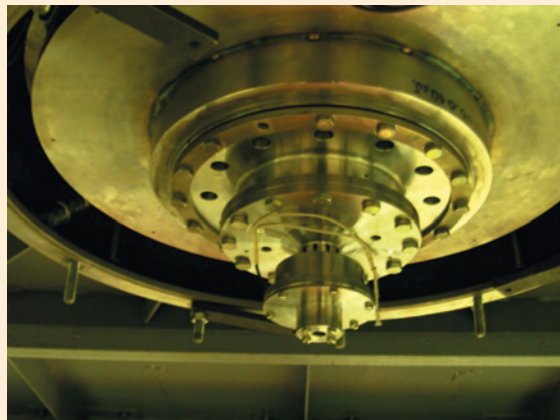
Для проведения исследований в области радиационной физики в РФЯЦ-ВНИИЭФ создается многомодульная мультитераваттная установка «Гамма», предназначенная для генерирования мощных импульсов тормозного (с повышенным содержанием мягкой компоненты) и мягкого рентгеновского



Установка «Гамма-4»



Макет ударно-волновой нагрузки с медными электродами



Лайнерная нагрузка



Медный электрод после разрушения

излучений. Первой очередью установки «Гамма» является четырехмодульная установка «Гамма-4» (2 МВ, 3 МА, 60 нс).

В 2019 г. совместно с сотрудниками НИО 07 и НПЦФ на электрофизической установке «Гамма-4» были проведены первые включения с лайнерной нагрузкой, предназначенной для генерации мощных импульсов мягкого рентгеновского излучения (МРИ). Лайнер представляет собой цилиндр диаметром 15 мм из 20 вольфрамовых проволоочек диаметром 6 мкм. Рабочие включения проводились при пониженном зарядном напряжении формирующих линий четырех типовых модулей установки. Длительность импульса МРИ составила ~35 нс, общая энергия МРИ в импульсе ~5 кДж.

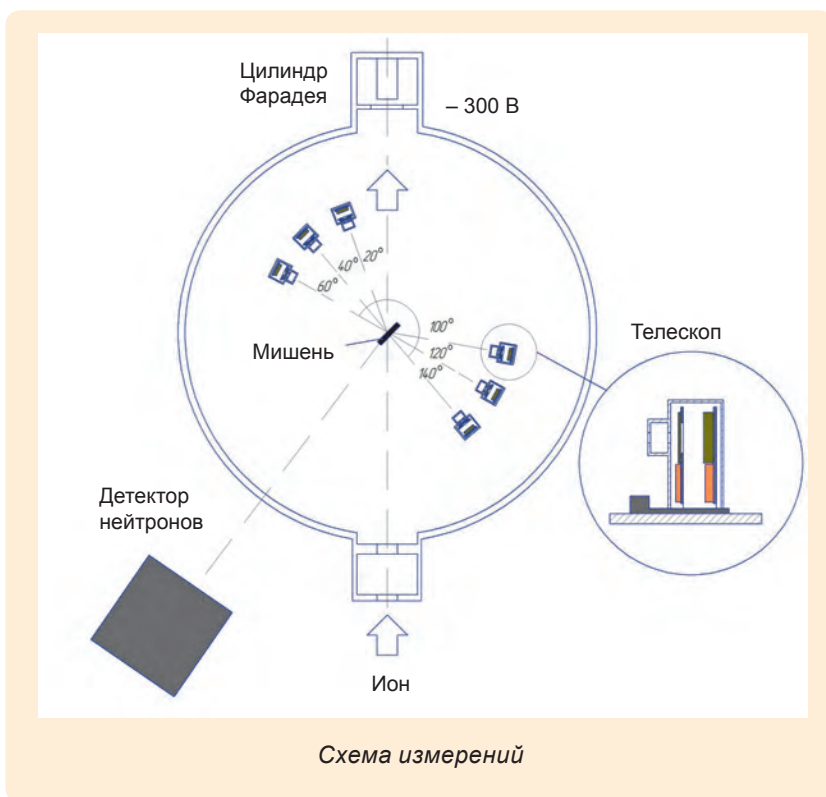
Совместно с сотрудниками ИЛФИ на установке «Гамма-4» проведена экспериментальная отработка макета ударно-волновой нагрузки, предназначенной для создания давлений до 50–100 ГПа в различных материалах. Экспериментальная отработка проводилась с медными и алюминиевыми образцами толщиной 2 и 1 мм соответственно. При минимальном зарядном напряжении формирующих линий четырех типовых модулей установки была измерена скорость образцов – ~300 и ~600 м/с, что соответствует давлению ~4,5–5 ГПа. Достаточно простая конструкция разрушаемой части макета ударно-волновой нагрузки позволяет ежегодно проводить в лабораторных условиях 50–100 экспериментов.

ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

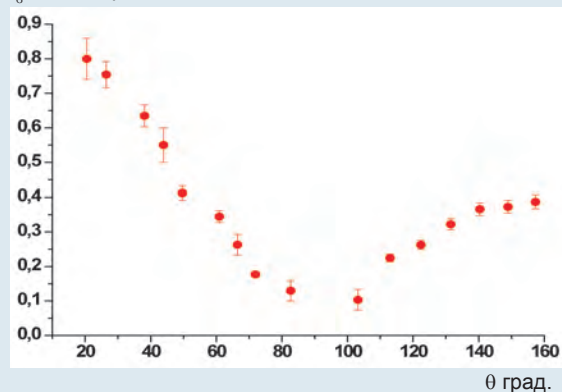
Ядерные реакции на литии, бериллии и боре до сих пор представляют значительный научный и практический интерес. Для развития библиотеки ядерных данных SABA на перезарядном ускорителе ЭГП-10 при энергии тритонов 7–10 МэВ выполнены измерения дифференциальных (по углу) сечений образования заряженных частиц в реакции ${}^9\text{Be} + t$. Использовались самоподдерживающаяся мишень бериллия толщиной 420 мкг/см² и слой бериллия 25 мкг/см² на алюминиевой подложке. Регистрация заряженных частиц (p, d, t, ${}^4\text{He}$) осуществлялась кремниевыми детекторами с разделением

их вида методом $\Delta E \cdot E$. Для изменения углов регистрации детекторы располагались на подвижной платформе с шагом вращения $0,1^\circ$.

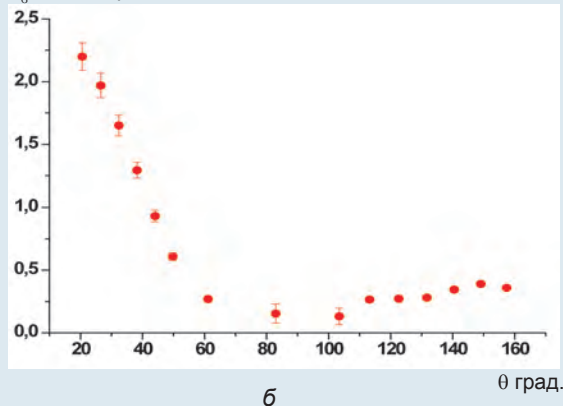
Впервые получены дифференциальные сечения реакций ${}^9\text{Be}(t, p_0){}^{11}\text{Be}$, ${}^9\text{Be}(t, p_1){}^{11}\text{Be}^*$ (0,320 МэВ), ${}^9\text{Be}(t, p_2){}^{11}\text{Be}^*$ (1,778 МэВ), ${}^9\text{Be}(t, p_3){}^{11}\text{Be}^*$ (2,69 МэВ), ${}^9\text{Be}(t, p_{5+6}){}^{11}\text{Be}^*$ (3,887 + 3,956 МэВ), ${}^9\text{Be}(t, d_0){}^{10}\text{Be}$, ${}^9\text{Be}(t, d_1){}^{10}\text{Be}^*$ (3,368 МэВ), ${}^9\text{Be}(t, t_0){}^9\text{Be}$, ${}^9\text{Be}(t, t_2){}^9\text{Be}^*$ (2,49 МэВ), ${}^9\text{Be}(t, \alpha_0){}^8\text{Li}$, ${}^9\text{Be}(t, \alpha_1){}^8\text{Li}^*$ (0,981 МэВ), ${}^9\text{Be}(t, \alpha_2){}^8\text{Li}$ (2,255 МэВ). Дифференциальные сечения реакций, представляющих интерес для фундаментальных исследований по теории ядерных реакций и свойствам нейтронно-избыточных ядер, показаны на рисунке. В этих реакциях после передачи двух нейтронов из радиоактивного ядра трития ядру



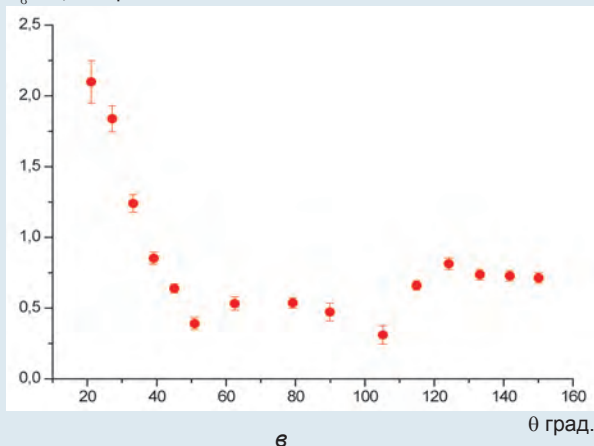
$d_\sigma/d\Omega$, мб/ср



$d_\sigma/d\Omega$, мб/ср



$d_\sigma/d\Omega$, мб/ср



Дифференциальные сечения (в системе центра масс) реакций ${}^9\text{Be}(t, p_0){}^{11}\text{Be}$ (а), ${}^9\text{Be}(t, p_1){}^{11}\text{Be}^*$ (0,320 МэВ) (б), ${}^9\text{Be}(t, p_2){}^{11}\text{Be}^*$ (1,778 МэВ) (в) при энергии тритонов 10 МэВ

^9Be образуется также радиоактивное нейтронно-избыточное ядро ^{11}Be в основном или возбужденных состояниях.

По теоретическому направлению исследований выполнен оптико-модельный анализ всех доступных мировых экспериментальных данных (дифференциальных сечений, поляризации) по упругому рассеянию

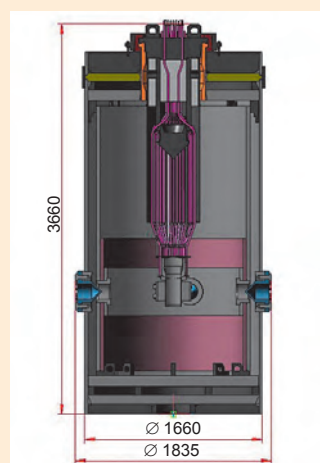
протонов на ядрах ^6Li , ^7Li , ^9Be , а также полных сечений реакций. Применялся код OptModel, где когерентно учтена амплитуда резонансной составляющей упругого рассеяния. Энергетический интервал анализа простирался от астрофизических энергий (50 кэВ) до 70 МэВ. Нарушение унитарности матрицы рассеяния находилось

на уровне 7–10 %. Получена энергетическая зависимость параметров оптических потенциалов и информация о полноте имеющихся парциальных сечений реакций $^6\text{Li} + p$, $^7\text{Li} + p$, $^9\text{Be} + p$. Такие исследования проведены впервые.

НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЦЕНТР ФИЗИКИ (НПЦФ)

РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЕ ВЗРЫВОЗАЩИТНОЙ КАМЕРЫ, ПРЕДНАЗНАЧЕННОЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗОЭНТРОПИЧЕСКОГО СЖАТИЯ ВЕЩЕСТВ

Одно из важнейших направлений работ РЯЦ-ВНИИЭФ – эксперименты для калибровки расчетных методик и исследования свойств веществ и конструктивных материалов в экстремальных состояниях, определения параметров, характеризующих физические процессы, протекающие при мегабарных давлениях и высоких температурах. Однако по требованиям техники безопасности и охраны окружающей среды проводить взрывные эксперименты с вредными веществами необходимо во взрывозащитных камерах (ВЗК). В настоящее время во ВНИИЭФ разработана конструкция макета взрывозащитной камеры, предназначенной для проведения экспериментов с устройством изоэнтропического сжатия на основе магнитокумулятивного генератора МК-1 с применением рентгенографической методики регистрации размеров сжимаемых образцов. В 2019 г. проведены успешные испытания макета ВЗК. Камера



Конструктивная схема ВЗК

состоит из следующих основных элементов: корпуса, узла нагружения, внутренней обечайки, металлического каркаса, канала ввода-вывода излучения, демпферной плиты. Корпус представляет собой трубу с наружным диаметром 1660 мм и толщиной около 28 мм, к торцам которой приварены герметичными швами верхнее и нижнее днища. В центре верхнего днища приварена горловина, служащая для установки и крепления узла нагружения. Узел нагружения предназначен для крепления и фиксации генератора МК-1 и герметизации подводимых к нему измерительных линий, кабелей питания и подрыва. Канал ввода-вывода излучений

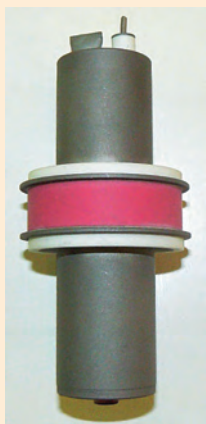
образован четырьмя защитными конусами из сплава VST-2 с внутренним диаметром 145 мм и толщиной стенки вдоль оси конуса 15 мм, которые устанавливаются строго по осям соответствующих им каналов ввода-вывода излучений под углом 75° .

В 2019 г. проведены два успешных полномасштабных эксперимента по испытанию макета ВЗК с использованием генератора сверхсильных магнитных полей МК-1. Внутри камеры подрывался цилиндрический заряд взрывчатого вещества массой 16 кг. В результате экспериментов получена важная информация для усовершенствования конструкции ВЗК.

ОТПАЯННАЯ ГАЗОРАЗРЯДНАЯ КАМЕРА ДЛЯ РАДИОЧАСТОТНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

Создана и испытана отпаянная газоразрядная камера, предназначенная для использования в качестве модулятора напряжения в компактных радиочастотных ОВЧ-излучателях. Конструкция камеры обеспечивает эффективную защиту поверхности межэлектродного изолятора от осаждения продуктов электродного распыления. В качестве газовой среды в камере используется диоксид углерода. Это позволяет существенно повысить эксплуатационный ресурс прибора и мощность генерируемых радиочастотных (РЧ) импульсов по сравнению с предыдущими модификациями. Конструкция камеры защищена патентом РФ.

Технические характеристики: частота РЧ-генерации – 120 МГц, пиковая мощность РЧ-импульсов – до 500 кВт, длительность РЧ-импульсов – 400–800 нс, ресурс работы в импульсно-периодическом режиме с частотой до 2 кГц – не менее $5 \cdot 10^7$ импульсов, максимальные габаритные размеры (диаметр×высота) – 50×130 мм, масса – 150 г.



Отпаянная газоразрядная камера

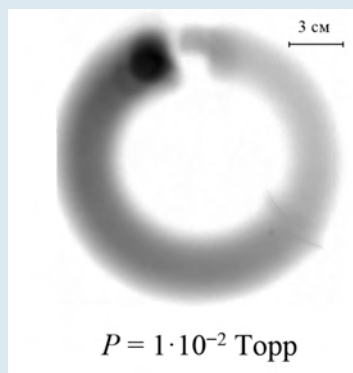
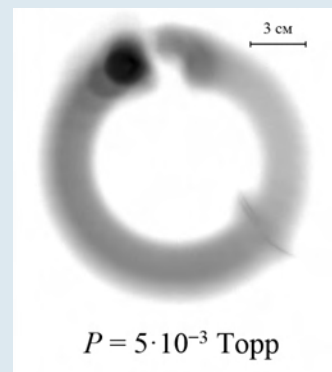
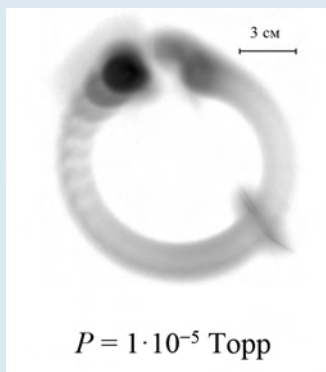
На основе реализованной камеры возможно создание автономных портативных РЧ-излучателей с уникальными, не имеющими мировых аналогов совокупностями технических параметров.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В ОБЛАСТЯХ ЗАХВАЧЕННОЙ РАДИАЦИИ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА НА СТЕНДЕ НПМ-01

В НПЦФ продолжаются работы по экспериментальному моделированию движения пучка быстрых электронов в магнитных ловушках для верификации методик рас-

чета процессов образования и эволюции – β -областей и искусственных радиационных поясов Земли. На лабораторном электрофизическом стенде НПМ-01 проведена серия экспериментов по исследованию влияния фоновой воздушной среды на динамику пучков быстрых электронов с энергией 20–30 кэВ наносекундного диапазона длительностей в протяженной (~5 м) магнитной ловушке пробкотронного типа в вакуумной камере моделирования объемом 6 м³.

В результате проведенных исследований получены зависимости электрических и пространственных характеристик пучков электронов от остаточного давления.



Отпечатки пучка электронов на рентгенографической пластине в фокусе магнитной ловушки при различном давлении воздуха в камере моделирования

КОНСТРУКТОРСКИЕ БЮРО

УСТРОЙСТВО ЗАЩИТЫ ОТ НЕСАНКЦИОНИРОВАННОГО ДОСТУПА К ИНФОРМАЦИИ

В КБ-3 проводятся фундаментальные поисковые исследования гетерогенной информационной среды защищенной коммуникации для нового поколения систем управления. Базовым устройством для такой среды является устройство защиты от несанкционированного доступа к информации, обеспечивающее:

- анализ информационного трафика любого вида и количества каналов связи для формирования единой картины информационной коммуникации (оптимизация процессов информационного взаимодействия на 20–30 % в режимах идентификации и синхронизации технических средств);

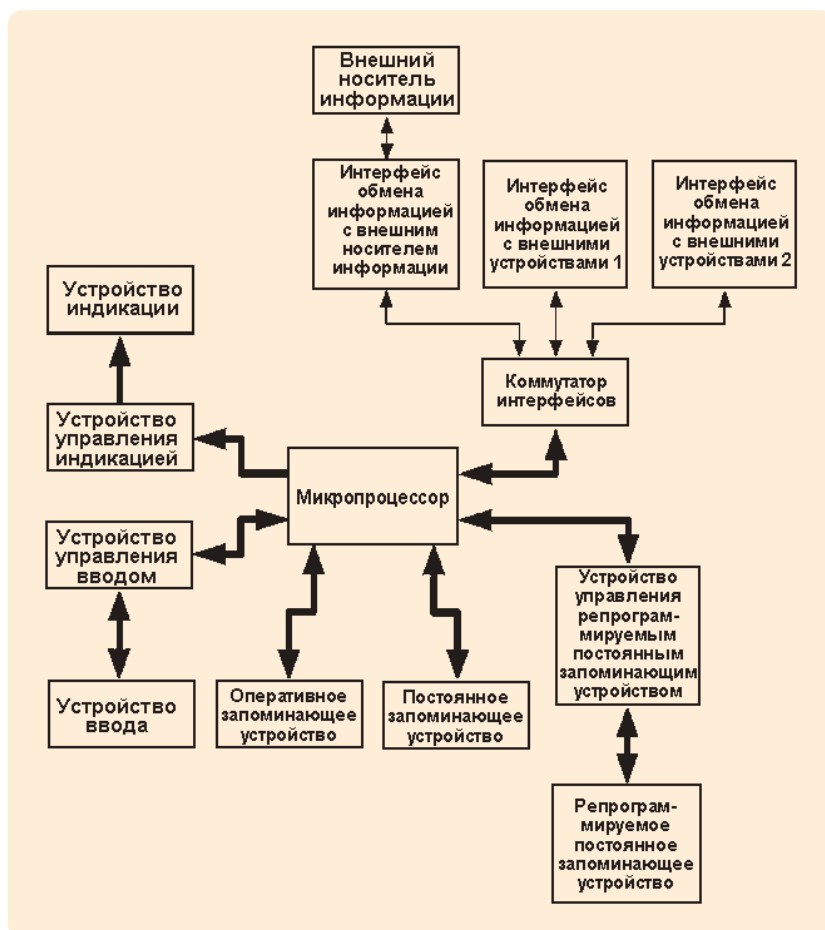
- контроль целостности передаваемой информации и ее резервирование путем инкапсуляции в защищенные информационные контейнеры (увеличение скорости передачи данных на 10–15 % при устранении влияния искажений на 25–50 %);

- многоуровневую аутентификацию передаваемой информации непосредственно в технических средствах с вероятностью, близкой к единице (~0,9993).

Преимущества устройства защиты от несанкционированного доступа к информации по сравнению с аналогами:

- возможность подключения широкого спектра внешних устройств благодаря введению дополнительного интерфейса обмена информацией с внешними устройствами;

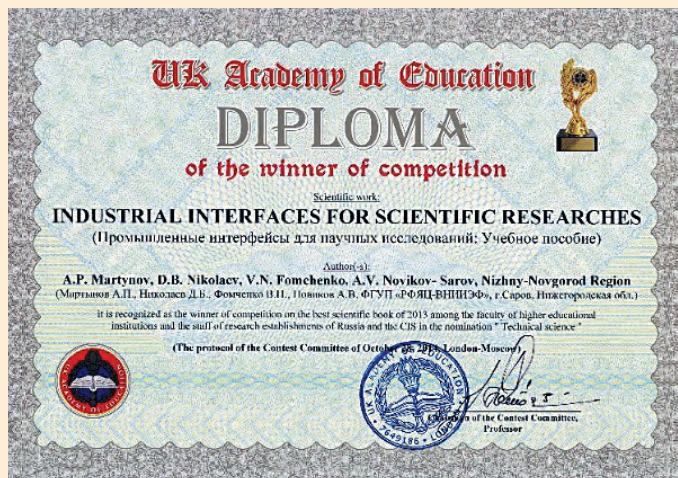
- высокая криптостойкость благодаря использованию



внешнего носителя информации, не допускающего несанкционированного считывания данных из него;

- уменьшенные габаритные размеры.

Устройство защиты от несанкционированного доступа



к информации внедрено в уникальном программно-техническом комплексе управления и контроля сложными техническими объектами.

На устройство получен патент РФ № 2402810. На Женевском международном салоне изобретений и новой техники патент получил медаль и был отмечен дипломом.

Результаты работ по созданию устройства защиты положены в основу работ по автоматизации процессов защиты при комплексировании систем, комплексов и устройств различной степени интеграции в единые распределенные защищенные системы, включая настройку механизмов защиты,

проведение анализа защищенности, верификацию информационной составляющей гетерогенных информационных систем. Теоретические и практические выводы работы стали базой для учебно-методического пособия «Промышленные интерфейсы для научных исследований» – победителя конкурса Британской акаде-

мии образования в номинации «Лучшая научная книга» – и учебно-методического пособия «Современные методы обеспечения безопасности в атомной энергетике» – победителя общероссийского конкурса «Университетская книга» в номинации «Лучшее издание по техническим вопросам».

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

МАГНИТОРЕЗИСТИВНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ ДАТЧИКОВ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

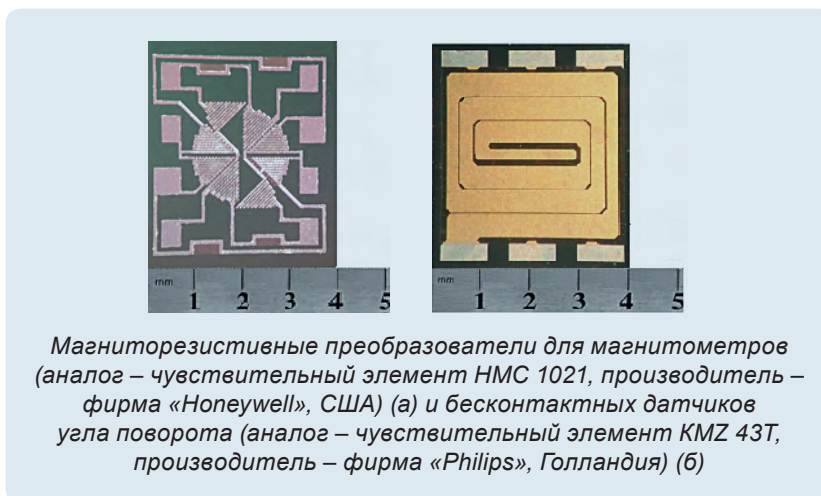
В 2019 г. разработана и внедрена в производство технология изготовления первичных магниторезистивных преобразователей (МРП) на анизотропном магниторезистивном эффекте. МРП предназначены для использования в современных системах автоматического управления подвижными объектами, навигационных системах перспективных видов высокоточных вооружений.

Для создания МРП разработан технологический процесс напыления с использованием магниторезистивной структуры во внешнем магнитном поле с последующим формированием топологического рисунка методом двойного фотолитографического травления с применением установки электронно-лучевого испарения «Оратория-9М».

По разработанной технологии изготовлены МРП с характеристиками на уровне зарубежных аналогов.

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ПЛАТ

Завершено комплектование оборудованием участка изготовления многослойных керамических плат LTCC. Использование новой установки SW-5 MV сборки в пакет керамических листов сократило время выполнения этой операции с 5 до 1 ч (до этого сборка выполнялась вручную) и позволило улучшить совмещение керамических слоев относительно друг друга (с 40 до 20 мкм),



Магниторезистивные преобразователи для магнитометров (аналог – чувствительный элемент НМС 1021, производитель – фирма «Honeywell», США) (а) и бесконтактных датчиков угла поворота (аналог – чувствительный элемент КМЗ 43Т, производитель – фирма «Philips», Голландия) (б)

уменьшив объем технологического отхода.

С использованием новой установки, включенной в маршрут изготовления многослойных керамических плат, изготовлены опытные образцы СВЧ-модулей. Разработан полный комплект технологической документации для изготовления многослойных керамических плат, проведения полного цикла монтажно-сборочных операций. Созданы условия для изготовления многослойных керамических плат из импортных и отечественных материалов с приемкой ОТК.

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ АИП-ОФМ, СИП-ОФМ И НИП-ОФМ УНИВЕРСАЛЬНОГО ВЫСОКОИНФОРМАТИВНОГО ПРИЕМНО-РЕГИСТРИРУЮЩЕГО КОМПЛЕКСА

В 2019 г. завершена работа по созданию измерительных пунктов радиотелеметрической системы РТС СК автомобильного (АИП-ОФМ), самолетного (СИП-ОФМ) и наземного (НИП-ОФМ) базирования универсального высокоинформативного приемно-регистрирующего комплекса для приема, регистрации и ретрансляции информации спецконтроля, передаваемой с борта изделия с использованием радиосигналов с относительной фазовой манипуляцией (ОФМ). Пункты обеспечивают прием и регистрацию с привязкой к шкале СЕВ до восьми потоков телеметрической информации РТС СК с ОФМ со скоростью до 3 Мбит/с.

Измерительные пункты построены по модульному принципу с использованием мобильных аппаратных контейнеров, чем обеспечивается гибкость наращивания ин-



Установка сборки в пакет SW-5 MV



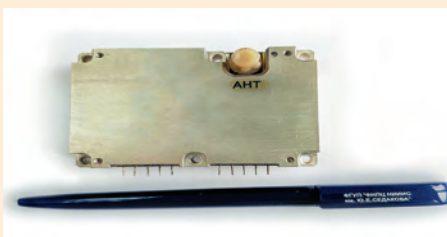
формационных каналов и взаимозаменяемость составных частей измерительных пунктов различных типов, повышается оперативность развертывания средств, оптимизируются затраты на изготовление.

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

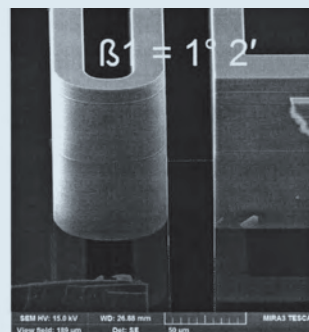
Разработаны производственные двумерные и трехмерные технологии изготовления чувствительных элементов для микроакселерометров, микрогироскопов, датчиков давления и других типов электромеханических преобразователей. Основой разработанных технологий является классическая кремниевая технология интегральных схем. К достоинствам кремниевых чувствительных элементов микроэлектромеханических систем относятся: малые массогабаритные показатели, высокая точность измерения, воспроизводимость характеристик, устойчивость к воздействию внешних факторов в специфических условиях эксплуатации.

МАЛОГАБАРИТНЫЙ МОДУЛЬ ПРИЕМНИКА СИГНАЛОВ СПУТНИКОВОЙ РАДИОНАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ «ГЛОНАСС»

Малогабаритный базовый навигационный модуль, работающий по сигналам системы ГЛОНАСС, предназначен для установки в прибор инерциально-спутниковой системы навигации высокодинамичного управляемого объекта.

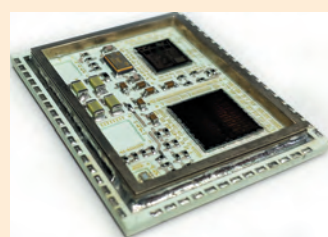


Малогабаритный модуль приемника сигналов спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС



Сверхмалые габариты навигационного модуля (71,5×51,5×22,0 мм) обусловлены применением многослойных керамических плат, изготавливаемых по технологии низкотемпературного совместного обжига (LTCC). Навигационный модуль полностью выполнен на отечественной элементной базе.

Температурный диапазон применения навигационного модуля – от –50 до 70 °С, потребляемая мощность – не более 3,5 Вт.



Плата навигационного процессора, изготовленная по технологии LTCC

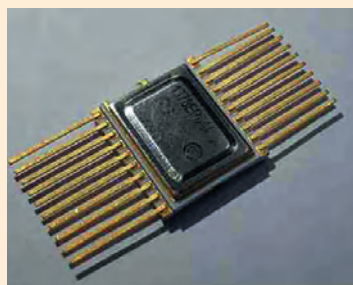
МИКРОСХЕМА ЛИНЕЙНОГО СТАБИЛИЗАТОРА ДЛЯ ВТОРИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ

Для обеспечения стабильного электропитания в условиях воздействия широкого спектра внешних воздействующих факторов и ионизирующего излучения разработана интегральная микросхема линейного стабилизатора 1378EP014.

Основные характеристики:

- входное напряжение 2,8–9 В,
- выходное напряжение 1,8–5 В,
- выходной ток – до 1,5 А,
- встроенная защита от перегрева и тока короткого замыкания.

Микросхема предназначена для применения в высоконадежных радиоэлектронных приборах и экстремальных условиях эксплуатации.

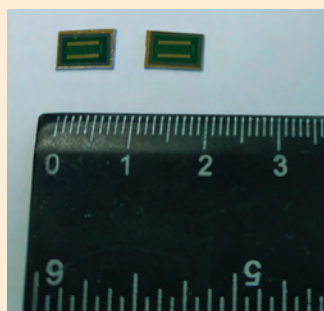


Микросхема линейного стабилизатора

МАГНИТОРЕЗИСТИВНЫЙ СПИН-ТУННЕЛЬНЫЙ СЕНСОР ПОВЫШЕННОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ

Изменение сопротивления магниторезистивных сенсоров в зависимости от величины магнитного поля, реализованных на основе обычного анизотропного магниторезистивного эффекта, составляет не более

3 %. В результате совместных работ РФЯЦ-ВНИИЭФ и Института физики микроструктур РАН (г. Н. Новгород) разработаны и изготовлены экспериментальные образцы магниторезистивных спин-туннельных структур, которые обеспечивают изменение сопротивления до 110 % в зависимости от величины магнитного поля.



Достигнутые результаты находятся на уровне мировых показателей, продемонстрированных компаниями «Hitachi», «Honeywell», «NVE», «ANALVA», и могут быть использованы для реализации элементов памяти типа MRAM.

УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫЙ ДЕТЕКТОР, НЕЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ К СОЛНЕЧНОМУ СВЕТУ

Созданы прототипы ультрафиолетовых детекторов, нечувствительных к дневному солнечному излучению. Они имеют низкий темновой ток (0,168 мА) и высокую чувствительность в области спектра 250–270 нм (до 50 мА/мкВт). «Солнечно-слепые» ультрафиолетовые детекторы предназначены для детектирования нарушений озонового слоя атмосферы, мониторинга работы реактивных двигателей, обнаружения пламени.

Детекторы созданы на основе структур с нанокристаллами GaN, синтезированными методом ионной имплантации

галлия и азота в матрицу Si или пленки SiO_2 и Si_3N_4 . Использование типичных для «кремниевой» микроэлектроники материалов и методов делает их совместимыми с технологией изготовления микросхем.

РАЗРАБОТКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ РАЗРЕЖЕНИЯ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ (МЭМС)

Микросистемная техника – фундаментальное, междисциплинарное и динамично развивающееся направление. Существует большое разнообразие выпускаемых МЭМС-датчиков, но точных датчиков для измерения вакуума, удовлетворяющих требованиям вакуумной микроэлектроники, практически нет. До конца не решена проблема как изготовления полупроводниковых триодов, работающих по принципу вакуумной лампы, так и создания и измерения вакуума в микрообъеме триода. В НИИИС им. Ю. Е. Седакова разработана конструкция чувствительного элемента МЭМС-датчика давления разрежения, позволяющего получить сигнал высокого разрешения для измерения уровня вакуума благодаря принципу преднапряженного состояния системы в отклоняющем электростатическом поле.

СИСТЕМА ВИБРОГАШЕНИЯ

Электронное оборудование АСУ ТП АЭС – это сложнофункциональная радиоэлектронная аппаратура, построенная по модульному иерархическому принципу и состоящая из большого количества элементов с возможностью вариативного монтажа. Большинство случаев разрушения оборудования



Система виброгашения

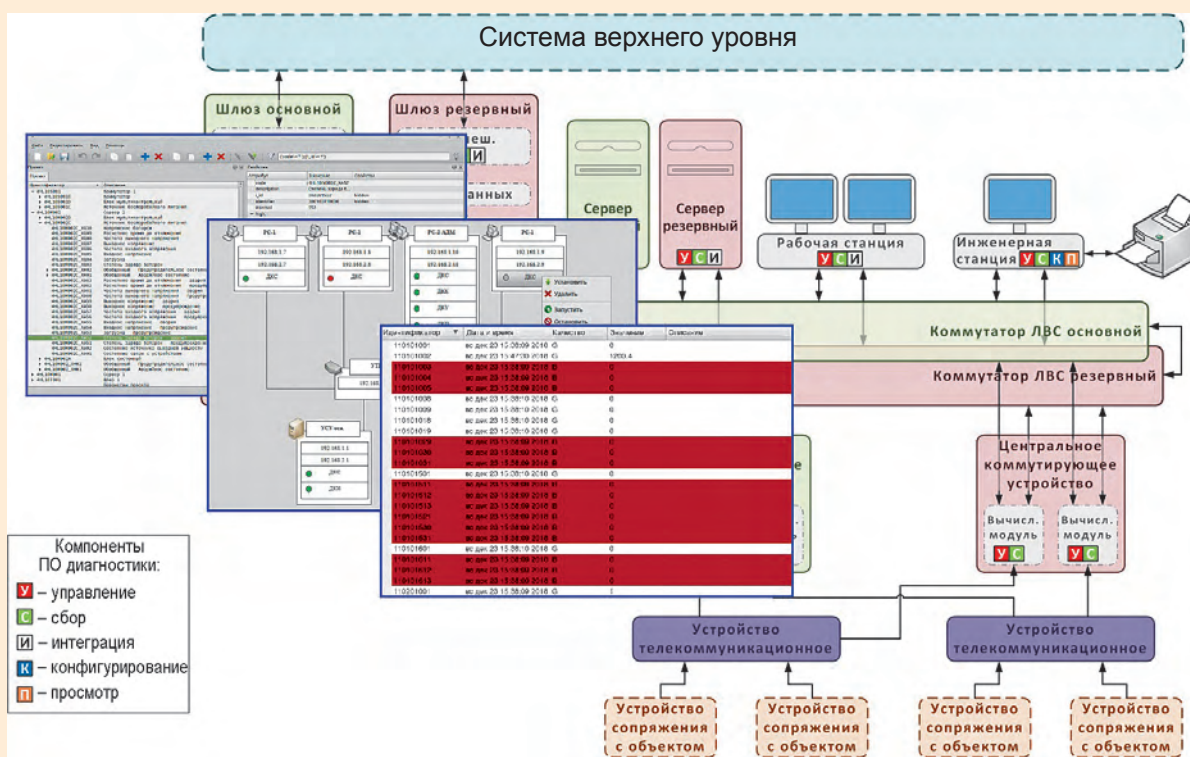
связано с отказом электронных модулей в результате воздействия сложной системы динамических нагрузок и нагрузок случайного характера различной физической природы.

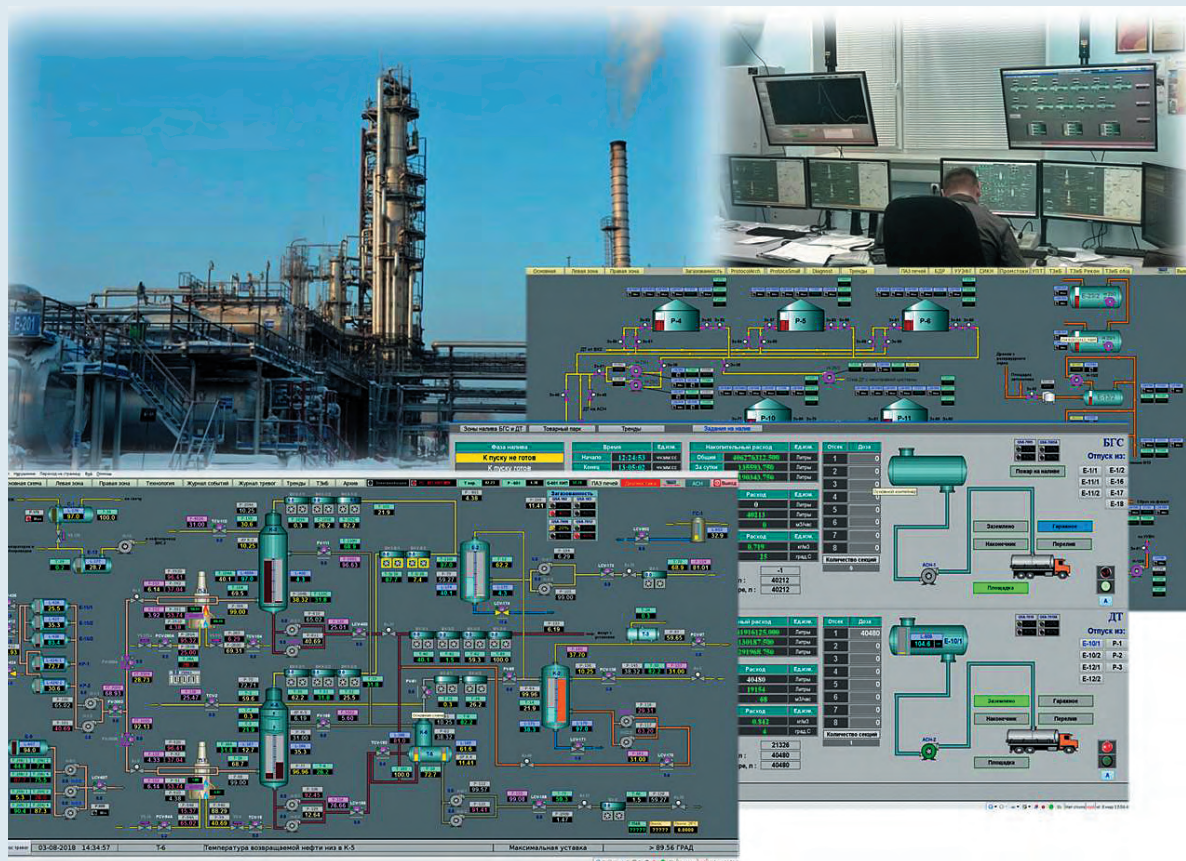
Установка оборудования на разработанную систему виброгашения позволяет уменьшить амплитуды колебаний на резонансных частотах и обеспе-

чивает ударовибростойкость, надежность и безопасность электронного оборудования АСУ ТП АЭС. Система виброгашения проходит испытания при нагрузках, действующих для АЭС «Куданкулам».

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИАГНОСТИКИ ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Программное обеспечение диагностики предназначено для сбора, обработки и передачи в SCADA информации о состоянии программно-тех-





АСУ ТП УПН-2 ООО «ННПО» (г. Нижневартовск), реализованная на базе программной платформы СКАДА АТОМ-НН

нических средств (серверов, рабочих станций и т. д.) АСУ ТП, а также своевременного выявления возникающих неисправностей, т. е. повышения надежности функционирования систем управления в целом.

Разработанный программный продукт диагностирует широкий спектр устройств (системные блоки, источники бесперебойного питания, мультиконтрольные блоки, сетевые коммутаторы и т. д.), совместим с операционными системами семейств Windows и Linux и позволяет в кратчайшие сроки создавать унифицирован-

ные масштабируемые решения для диагностики программно-технических средств в АСУ ТП произвольной конфигурации.

ПРОГРАММНАЯ ПЛАТФОРМА «СКАДА АТОМ-НН»

В 2018 г. в рамках проекта по созданию отечественной программной платформы СКАДА АТОМ-НН, предназначенной для разработки автоматизированных управляющих систем в защищенных сертифицированных операционных

системах, основным направлением деятельности был выбран выход на новые рынки АСУ ТП. Результатами данных работ стали:

- внесение в реестр отечественного программного обеспечения (приказ № 168 от 24.04.2019);
- успешное прохождение сертификационных испытаний для ПАО «Газпромнефть».

2019

