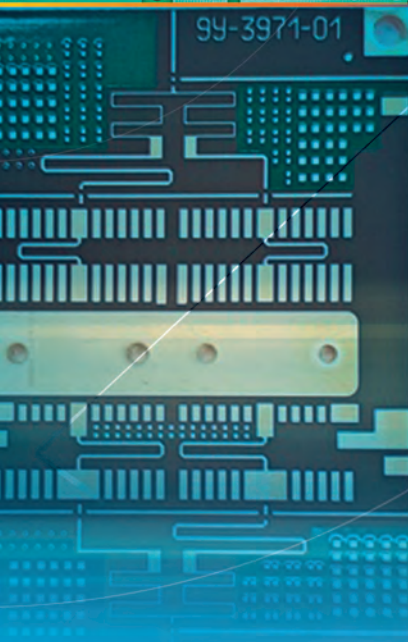
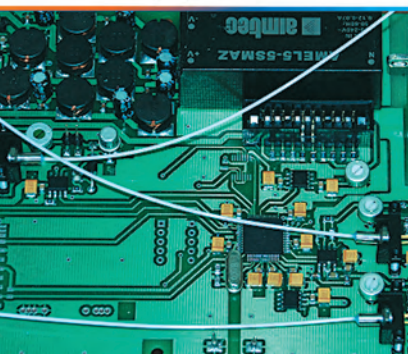


ОСНОВНЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ

РФЯЦ-ВНИИЭФ

2020



САРОВ
2021

ИЗДАТЕЛЬСКО-ПОЛИГРАФИЧЕСКИЙ ЦЕХ РЯЦ-ВНИИЭФ

www.vniief.ru

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

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

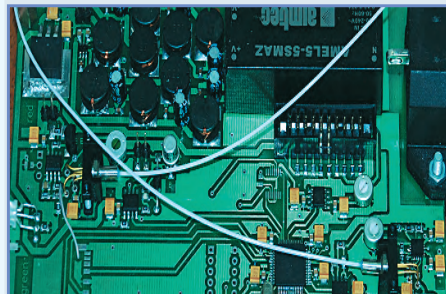
Заказать нашу продукцию можно:

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

СОДЕРЖАНИЕ

2

ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ
И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ
(ИТМФ)



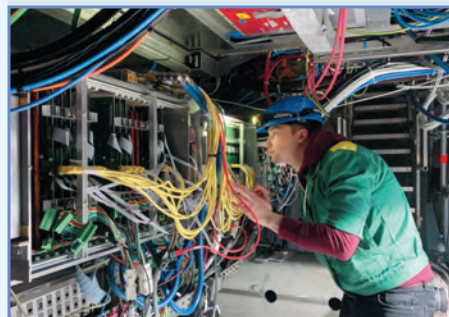
18

ИНСТИТУТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ
ГАЗОДИНАМИКИ И ФИЗИКИ ВЗРЫВА
(ИФВ)



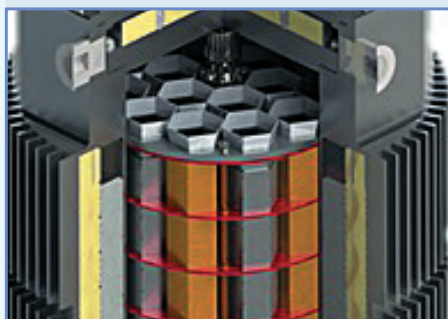
24

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ
И РАДИАЦИОННОЙ ФИЗИКИ (ИЯРФ)



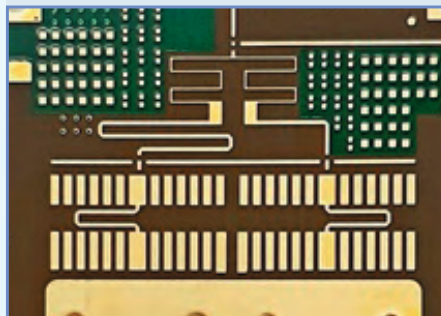
28

**КОНСТРУКТОРСКИЕ
БЮРО**



35

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



31

**НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ
ЦЕНТР ФИЗИКИ ВЫСОКИХ
ПЛОТНОСТЕЙ ЭНЕРГИИ (НПЦФ)**



РЕДКОЛЛЕГИЯ ВЫПУСКА

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

РЕДАКТОР *Н. Ю. Зимакова*

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

34

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ
ОТДЕЛЕНИЕ**



Подписано в печать 18.03.2021 г., Формат 60×84/8.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 4,5. Уч.-изд. л. ~ 4,9.
Тираж 1000 экз. Зак. тип. 753-2021.
Отпечатано в ИПЦ ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»
607188, г. Саров Нижегородской обл.,
ул. Силкина, д. 23

ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ (ИТМФ)

В рамках основного направления деятельности ИТМФ по созданию современной расчетно-теоретической базы моделирования сложных физических процессов усилия специалистов математического отделения ИТМФ в 2020 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 в интересах их внедрения в высокотехнологичные отрасли российской промышленности, а также осуществлялись работы по развитию осваиваемой продуктовой линейки.

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

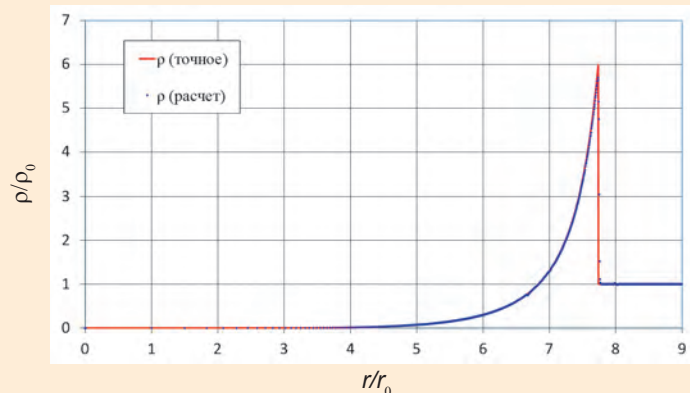
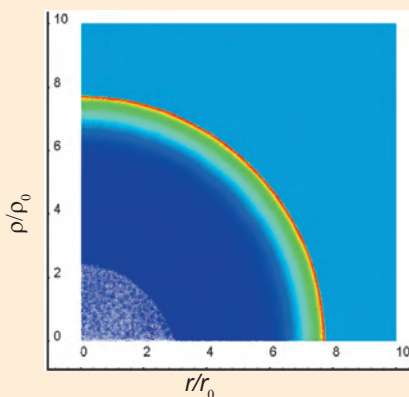
Специалисты математического отделения ИТМФ продолжили работу по совершенство-

ванию методик на основе методов частиц. Основным преимуществом данных методик по сравнению с методиками, основанными на классических разностных методах, является возможность создания безаварийных технологий численного моделирования течения жидкости и газа с сильными деформациями и большими относительными перемещениями при столкновениях поверхностей раздела веществ.

Для метода сглаженных частиц (метода SPH) проведена фундаментальная работа по построению консервативных систем, описывающих двумерные плоские и осесимметричные течения газа. Предложена консервативная система SPH, которая в сочетании с модифицированным методом *предиктор – корректор* удовлетворяет свойству полной консервативности. Возможность использования полностью консервативной схемы интегрирования при численном моделировании двумерных осесимметричных течений газа опробована на задаче о сильном сферическом взрыве. Значение дисбаланса энергии в расчетах находится на уровне вычислительных погрешностей.

В 2020 г. продолжались исследования по моделированию процессов лазерного термоядерного синтеза, в частности инерциального синтеза. Данный подход базируется на использовании инерции слоя термоядерного топлива, предварительно сжатого и ускоренного до высоких скоростей в результате абляционного ускорения оболочечной мишени интенсивным излучением. По методике МИМОЗА-НДЗД были проведены трехмерные расчеты конверсии лазерного излучения в рентгеновское, предназначенное для сжатия капсул с пластиковым аблятором и аблятором из высокоплотного углерода. Как показали расчеты, значительная часть лазерного излучения поглощается во внутреннем объеме бокса вблизи отверстий ввода, в плазме, «испаренной» излучением со стенок бокса.

Постановка задачи. Бокс-конвертор представлял собой сферическую золотую оболочку толщиной 20 мкм, плотностью 19,3 г/см³ и наружным диаметром 9 мм с шестью отверстиями диаметром 1,28 мм, предназначенными для ввода лазерного излучения. Внутри и снаружи оболочки был газ –



Распределение плотности и график зависимости плотности от радиуса, полученные в расчете задачи о сильном сферическом взрыве: r_0 – начальный радиус, $\rho_0 = 0,1$; ρ_0 – начальная плотность, $\rho = 1$; r – текущий радиус; ρ – текущая плотность

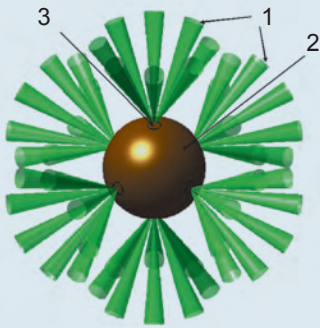
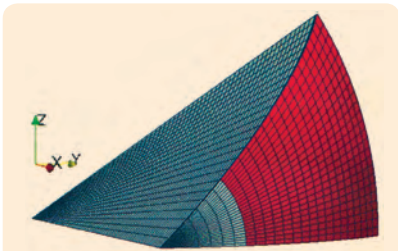


Схема ввода лазерных источников внутрь сферического бокса-конвертора: 1 – кластеры лазерных пучков, 2 – сферический бокс, 3 – отверстие для ввода лазерного излучения

атомарный водород с начальной плотностью 10^{-4} г/см³.

Лазерное излучение задавалось в центре отверстия 384 лучами, объединенными в 48 пучков по 8 лучей, каждому из которых присваивалась соответствующая доля энергии пучка. Угол между направлением ввода лазерного излучения и осью отверстия был равен 30° .



Геометрия отверстия и направления осей в начальный момент времени: серый цвет – водород, красный цвет – золото

Как видно из рисунка, к моменту времени $t = 13$ нс золотая плазма, прилетевшая со стенок бокса, оказывается на пути лазерного излучения, которое в основном поглощается в плазме вблизи отверстия. При этом практически вся (более 99 %) энергия лазерного излучения вводится внутрь бокса. Видно, что основная часть импульса поглощается внутри бокса вблизи отверстий ввода, что может привести к снижению симметрии рентгеновского излучения в центре бокса по сравнению со случаем, когда все лазерные пучки доходят до стенки бокса. Использование аблятора с более высокой плотностью ($\rho_{\text{CH}} \approx 1,1$ г/см³) позволяет уменьшить толщину оболочки (при той же массе) и тем самым сократить время прохождения ударных волн. Если этот интервал будет настолько мал, что за это время плазма не успеет заполнить внутренний объем бокса, тогда удастся довести всю энергию лазерного излучения до стенок бокса.

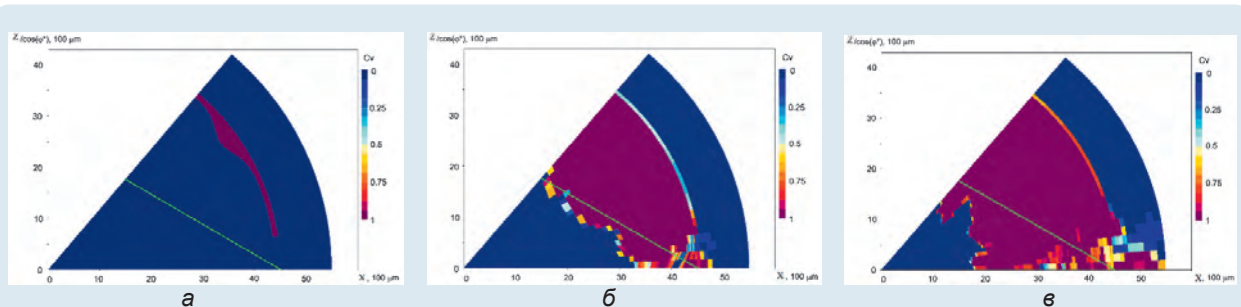
Одним из традиционных направлений исследований специалистов ИТМФ является численное моделирование процессов переноса частиц в многомерной постановке. Это одна из наиболее сложных и трудоемких задач, так как при решении кинетического уравнения переноса искомая функ-

ция зависит от большого числа переменных. В основе многих методик численного решения уравнения переноса лежат методы дискретных ординат с аппроксимацией по схемам типа DS_n .

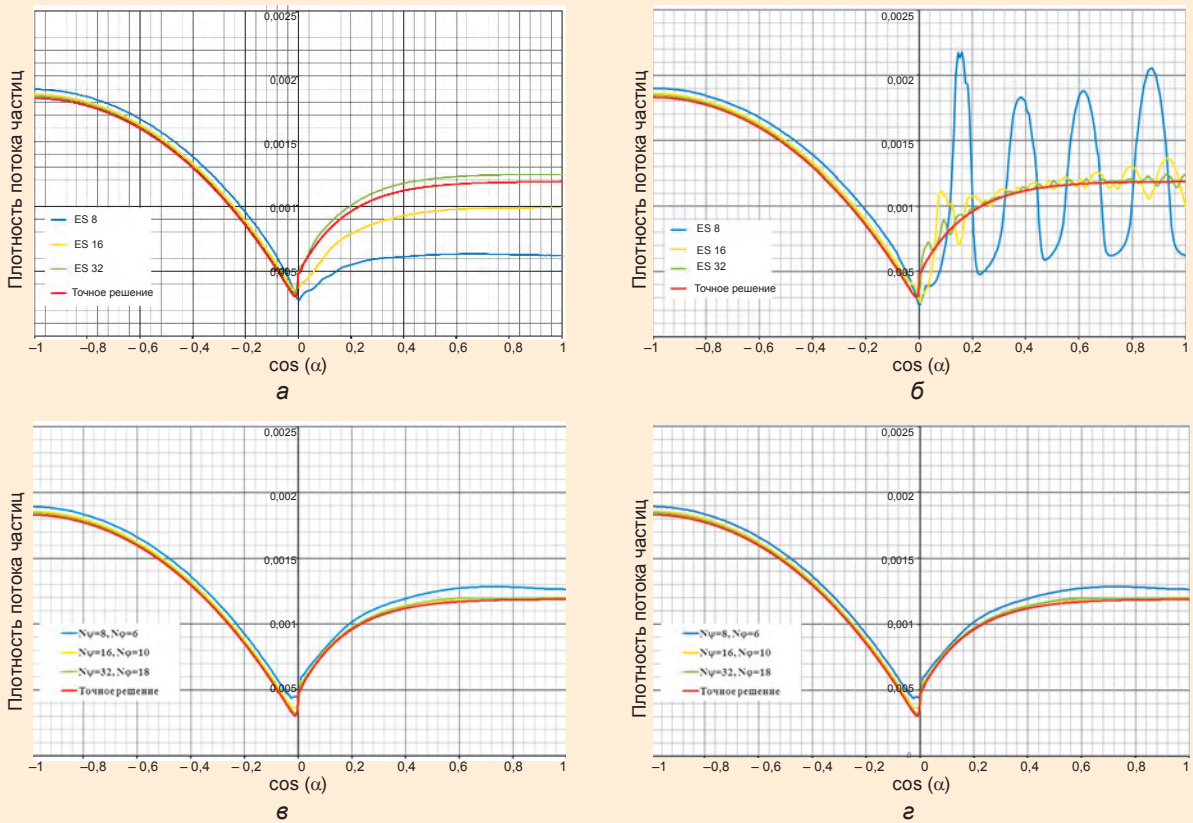
При решении задач с оптиически тонкими областями и сильно локализованными источниками DS_n -схемы выдают решения с нефизическими осцилляциями, известными как лучевые эффекты. Лучевые эффекты являются достаточно устойчивыми относительно увеличения числа направлений полета частиц. Использование подробных сеток хотя и позволяет уменьшить лучевые эффекты, но приводит к существенному удорожанию расчетов.

Одним из путей минимизации лучевых эффектов, возникающих при решении многомерных задач переноса, и повышения тем самым точности расчетов является применение метода решения, основанного на записи уравнения переноса в сферической системе координат. Особенность этой формы записи уравнения – подвижный базис угловой системы координат, отвечающий за направления полета частиц.

Разработан DS_n -метод решения трехмерного кинетического уравнения переноса, записанного в сферической системе координат. Конечно-разностная аппроксимация уравнения построена на про-



Пространственные распределения объемной концентрации золота в одном из сечений ($\varphi = \varphi^* = 31,875^\circ$) на моменты времени $t = 1,1$ нс (а), $t = 13$ нс (б), $t = 18$ нс (в), зеленая линия – направление ввода лазерного излучения



Зависимость плотности потока частиц от пространственного угла в расчетах в цилиндрической (а, б) и сферической (в, г) системах координат на сгущающихся сетках по угловым переменным

странственно-трехмерных регулярных сетках по схеме с дополнительными соотношениями и является консервативной. Для решения полученной системы сеточных уравнений разработан алгоритм численного решения, основанный на методе бегущего счета.

Тестирование метода решения трехмерного уравнения переноса в сферической системе координат проведено на примере стационарной двумерной задачи, особенностью которой является неоднородность состава в системе: в одной половине системы задана оптически плотная среда, в другой – оптически прозрачная.

Результаты численных исследований демонстрируют следующее:

- в пространственных распределениях плотности потока частиц, полученных в цилинд-

рической системе координат, наблюдаются ярко выраженные лучевые эффекты;

- в зависимостях плотности потока частиц от пространственного угла в расчетах в сферической системе координат нефизические осцилляции даже на грубой сетке по угловым переменным практически отсутствуют.

Таким образом, для определенного класса задач предложенный метод решения трехмерных задач переноса является эффективным средством борьбы с лучевыми эффектами.

По направлению развития методик расчетного моделирования процессов турбулентного перемешивания были получены значимые результаты по определению локальной степени гомогенного смешения при

прямом численном моделировании турбулентного перемешивания.

Как известно, в задачах турбулентного перемешивания смесь может находиться в двух состояниях: гомогенном, когда вещества перемешаны на молекулярном уровне, и гетерогенном, когда она состоит из фрагментов веществ. Определение соответствующего состояния (степени гомогенности) смеси в некоторых задачах приобретает важное значение для определения скорости реакций – как химических, так и ядерных.

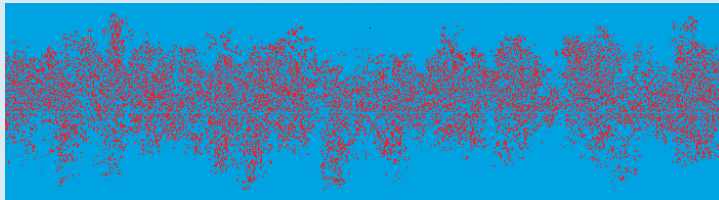
Предложена модель для определения локальной степени гомогенного смешения при прямом численном моделировании турбулентного перемешивания двух несмешивающихся веществ. Модель основана на анализе смешан-

Интегральные (по всей ЗТП) значения степени гомогенности* в расчетах**

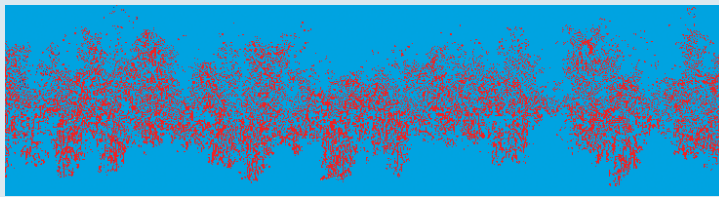
Расчет	Модель 1		Модель 2	
	Компонент 1	Компонент 2	Компонент 1	Компонент 2
2D	0,317	0,289	0,359	0,278
3D	0,310	0,320	0,311	0,323

* Доли гомогенно перемешанной части массы по отношению ко всей перемешанной массе в единице объема.

** На момент времени, соответствующий развитой турбулентности.



а



б

Распределение смешанных ячеек, содержащих гомогенную смесь, по модели 2 (другие смешанные ячейки не показаны): а – двумерное сечение $z = \text{const}$ в трехмерном расчете, б – двумерный расчет (момент времени соответствующие развитой турбулентности)

ной ячейки с точки зрения возможности восстановления контактной границы между веществами в такой ячейке. Если граница восстанавливается, то предполагается, что в ней содержится гетерогенная смесь; в противном случае смесь гомогенная. Модель тестировалась на задаче турбулентного перемешивания, возникающего вследствие неустойчивости Рэлея – Тейлора при постоянном ускорении контактной границы между двумя разноплотными газами. Численное моделирование задачи проводилось как в 2D, так и в 3D приближениях. Результаты с применением предлагаемой модели сравнивались с результатами для интегральной степени гомогенности, полученными по известной модели, описанной в работе Linden P. F. и Redondo J. M. (далее – модель 1).

Распределение степени гомогенного смешения в пространстве по ячейкам расчетной сетки в двумерном и трехмерном случаях, полученное по предложенной модели (далее – модель 2), показано на рисунке. В таблице приводятся интегральные значения степени гомогенности по всей зоне турбулентного перемешивания, полученные по моделям 1 и 2 в двумерных и трехмерных расчетах. Результаты расчетов показывают близость картин перемешивания в двумерном и трехмерном случаях. Это дает основание для проведения 2D моделирования трехмерного процесса перемешивания, что позволяет получать вполне адекватную картину процесса. Предлагаемая модель 2 определения степени гомогенности для прямого численного моделирования в 2D и 3D при-

ближениях дает интегральное по зоне турбулентного перемешивания значение, близкое к известной модели 1. Предлагаемая модель, однако, предпочтительнее модели 1, потому что в отличие от модели 1 позволяет получать локальную степень гомогенности, которая, как правило, более необходима в практических расчетах, чем интегральная величина.

Интересная работа выполнена в ИТМФ по расчету так называемой гамма-зари космического ядерного взрыва операции «Морская звезда».

В 1962 г. в Тихом океане на высоте 400 км над островом Джонстон США произвели уникальный ядерный взрыв мощностью 1400 кт ТНТ, который получил название «Морская звезда». Данный опыт сопровождался разнообразными физическими эффектами, некоторые из которых не получили полного объяснения до настоящего времени.

В частности, научный и практический интерес представляет динамика нейтральной компоненты продуктов ядерного взрыва. Данная компонента образуется на стадии расширения облака взрыва из-за эффекта перезарядки ионов продуктов ядерного взрыва на частицах воздуха. В то время как плазма взрыва при разлете вверх удерживается геомагнитным полем, нейтральные частицы с ним не взаимодействуют и свободно разлетаются на большие расстояния от Земли.

Единственными измерениями, характеризующими такой разлет в первые секунды после ядерного взрыва «Морская звезда», являются измерения так называемой γ -зари искусственного орбитального космического спутника Земли «Космос-5». Наиболее вероятным источником γ -зари является запаздывающее γ -излучение ядерного взрыва, поднявших-

ся на большие высоты (более 1200 км) и попавших в область прямой видимости спутника.

Расчетно-теоретическое описание эффекта γ -зари требует, в первую очередь, трехмерного численного моделирования в глобальном масштабе магнитной газовой динамики облака взрыва с учетом его взаимодействия с неоднородными ионосферой и геомагнитным полем.

Наиболее строгая физическая модель, описывающая движение разреженной плазмы в магнитном поле для экспериментов такого типа, представляет собой систему кинетических уравнений Больцмана – Власова, дополненную уравнениями Максвелла. Однако численное решение такой системы уравнений вызывает большие трудности, особенно в трехмерном случае.

Постановка описываемого расчета ядерного взрыва операции «Морская звезда» подробно изложена в статье Залялова А. Н., Жмайло В. А., Широкова А. Е. и др. «Расчеты магнитного поля и потоков β -электронов в области взрыва операции "Морская звезда"» (Вопросы атомной науки и техники. Сер. Теор. и приклад. физика. 2012. № 3). Однако глобальный масштаб динамики продуктов ядерного взрыва дополнительно требует введения искривленной поверхности Земли, а также неоднородного геомагнитного поля. Это было учтено в расчете, результаты которого приводятся далее. Геомагнитное поле задается в виде поля точечного магнитного диполя, помещенного в центр Земли.

Расчетные данные о пространственном распределении нейтральных продуктов ядерного взрыва на моменты времени $t = 1$ и 25 с после взрыва показаны на рисунке. Центр системы координат расположен в точке взрыва. Ось Ox (го-

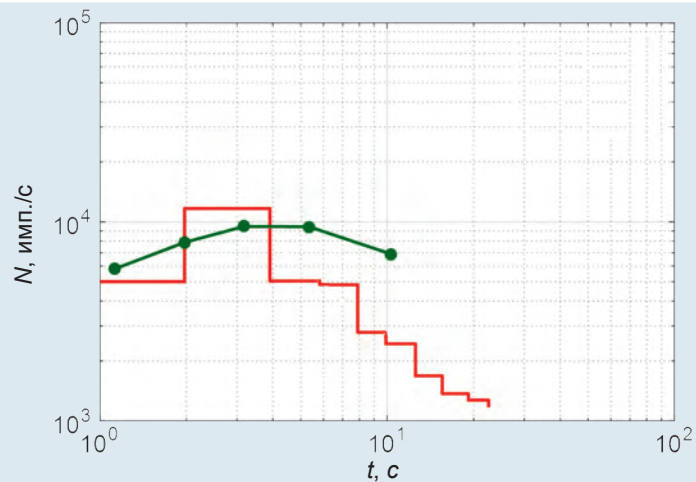
ризонтальная) проходит через центр Земли и направлена от него в точку ядерного взрыва; ось Oy (вертикальная) лежит в осевой плоскости Земли, т. е. является меридиональной. Положительное направление оси Oy – в сторону северного географического полюса.

На основе результатов расчетов магнитной газовой динамики ядерного взрыва были вычислены соответствующие показания счетчика Гейгера, обеспечиваемые γ -излучением радиоактивных продуктов ядерного взрыва.

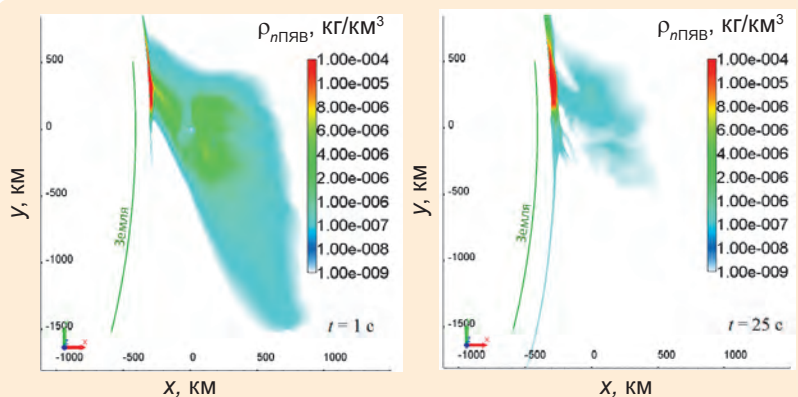
Измеренные показания счетчика Гейгера спутника «Космос-5» в зависимости от времени показаны на графике. Дополнительно в виде красной кривой приводятся соот-

ветствующие данные, рассчитанные представленным выше способом, исходя из результатов расчета динамики продуктов ядерного взрыва. На фоне сделанных грубых допущений и имеющихся неопределенностей наблюдается хорошее согласие расчетной и экспериментальной кривых в пределах трех раз, которое качественно подтверждает разлет значительной доли продуктов ядерного взрыва в виде нейтральной компоненты на большие расстояния от точки взрыва.

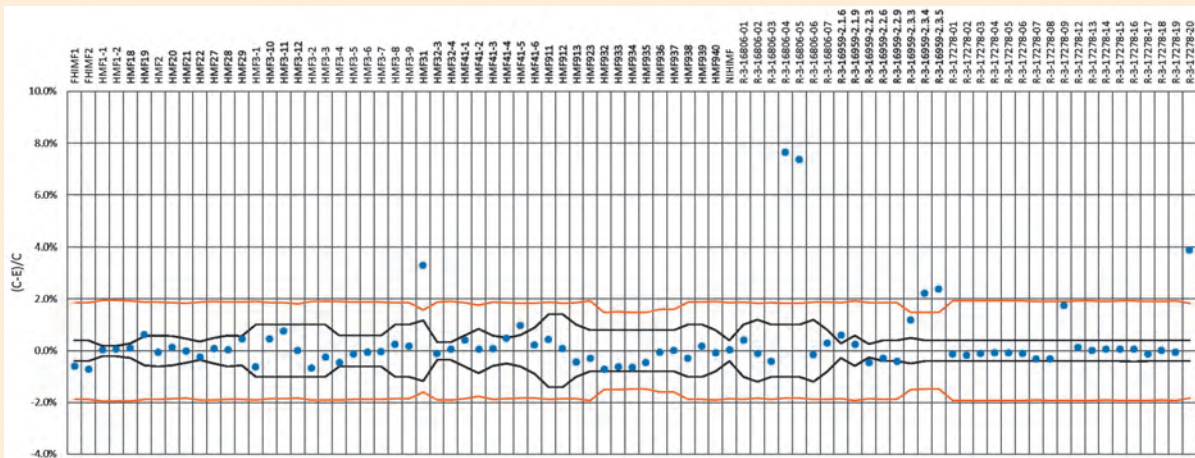
Большое внимание в ИТМФ уделяется работам по повышению точности используемых в расчетных исследованиях ядерно-физических данных,



Измеренные (—) и расчетные (●) показания счетчика Гейгера спутника «Космос-5» в зависимости от времени после ядерного взрыва «Морская звезда»



Плотность нейтральных продуктов ядерного взрыва в плоскости Oxy в моменты времени $t = 1$ и 25 с после ядерного взрыва «Морская звезда»



Относительные отклонения, константные и экспериментальные погрешности $k_{эф}$ урановых критических сборок с высоким обогащением по ^{235}U , полученные с данными ENDF/B-8: точки – отклонения расчетных значений $k_{эф}$ от экспериментальных, черные линии – экспериментальная погрешность, оранжевые линии – константная погрешность

данных о свойствах материалов, по пробегаем излучения. Так, в 2020 г. специалистами математического отделения ИТМФ разработана технология оценки погрешности используемых в расчетах данных из мировых библиотек по параметрам взаимодействия нейтронов с ядрами различных изотопов и технология корректировки этих параметров для повышения точности описания рассчитываемой системы.

В работе получена оценка константной погрешности параметров $k_{эф}$ критических сборок с использованием современных международных библиотек нейтронно-ядерных данных ENDF/B-7.1, ENDF/B-8, JEFF-3.3, JENDL-4.

Рассмотрено 187 сферических металлических урановых, плутониевых, уран-плутониевых сборок с быстрым спектром нейтронов, отобранных из международного архива «International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments». Для них проведены расчеты параметров $k_{эф}$ по методике C007 (методом Монте-Карло) с данными каждой из представленных библиотек. Проведены групповые расчеты коэффи-

циентов чувствительности параметров $k_{эф}$ к изменению сечений упругого и неупругого рассеяния, реакций (n , χp), реакции деления и к числам мгновенных нейтронов деления изотопов урана и плутония. С использованием полученных коэффициентов чувствительности, а также ковариационных матриц изотопов урана и плутония из представленных библиотек рассчитана константная погрешность параметров $k_{эф}$.

Анализ результатов расчетов показал, что константная погрешность $k_{эф}$ критических сборок, рассчитанная на основе неопределенностей нейтронных сечений U и Pu современных библиотек оцененных ядерных данных, в большинстве случаев превышает экспериментальную погрешность измерения $k_{эф}$ в среднем в 1,5–2 раза и для данных ENDF/B-8, обладающей наименьшими неопределенностями нейтронных сечений, составляет около $\pm 2\%$ ($\pm 2\sigma$).

Полученные оценки позволяют заключить, что разработка математических методов снижения константной погрешности является актуальной задачей. Один из способов – рас-

чет смещенной оценки критических параметров, позволяющий получить поправки нейтронных констант, уменьшающих относительные отклонения расчетных значений $k_{эф}$ от экспериментальных, и новые ковариационные матрицы нейтронных сечений, существенно снижающие константную погрешность критических параметров $k_{эф}$.

Как известно, сегодня многие крупные предприятия и ведомства России, включая Министерство обороны РФ, создают и эксплуатируют программные комплексы (ПК) имитационного моделирования и поддержки принятия решений на всех уровнях функционирования – от проектирования изделий до проведения операций. Анализ результатов моделирования и оптимизации сложных систем позволяет выявить оптимальные режимы функционирования и наиболее подходящие способы управления, оценить возможности моделируемых объектов в различных условиях при заявленных и перспективных характеристиках.

Сейчас в мире бурно развиваются технологии искусственного интеллекта. Они реализуются в виде различных ин-



струментальных средств, таких как нейросетевые программные библиотеки, библиотеки машинного обучения, генетического программирования и эволюционных алгоритмов, программные продукты создания и анализа онтологий, различные базы данных знаний, методы и алгоритмы метаэвристической оптимизации, платформы мультиагентного моделирования и т. д. Внедрение подобных технологий в ПК имитационного моделирования и поддержки принятия решений позволит достичь синергетического эффекта и в дальнейшем выйти на качественно новый уровень.

С целью практического освоения данных направлений в РФЯЦ-ВНИИЭФ ведется разработка визуализационно-интеграционной платформы для оптимизационного имитационного моделирования и управления системами (ВИП «ОпТИМУС»). В архитектуру данной платформы изначально заложены подходы, позволяющие на разных этапах эксплуатации и разработки использовать ряд технологий искусственного интеллекта. ВИП «ОпТИМУС» представляет собой расширяемый набор компонентов

для разработки программных комплексов имитационного мультиагентного моделирования и включает в себя два программных пакета (ПП): ПП мультиагентного моделирования «Оптимус.Решатель» и ПП препостпроцессинга (препост-процессор) мультиагентных задач «Оптимус.Препост» с графическим пользовательским интерфейсом.

Базовой технологией имитационного моделирования в ВИП «ОпТИМУС» выбран подход мультиагентного моделирования, с помощью которого анализируемая система представляется в виде совокупности программных агентов. Имитационная модель, построенная по агентной технологии, описывает поведение децентрализованных агентов, определяющих поведение всей системы в целом. При этом поведение агентов определяется на индивидуальном уровне, а глобальное поведение возникает как результат деятельности множества агентов (моделирование «снизу вверх»).

В мультиагентной платформе организовано взаимодействие по формализованным правилам произвольного ко-

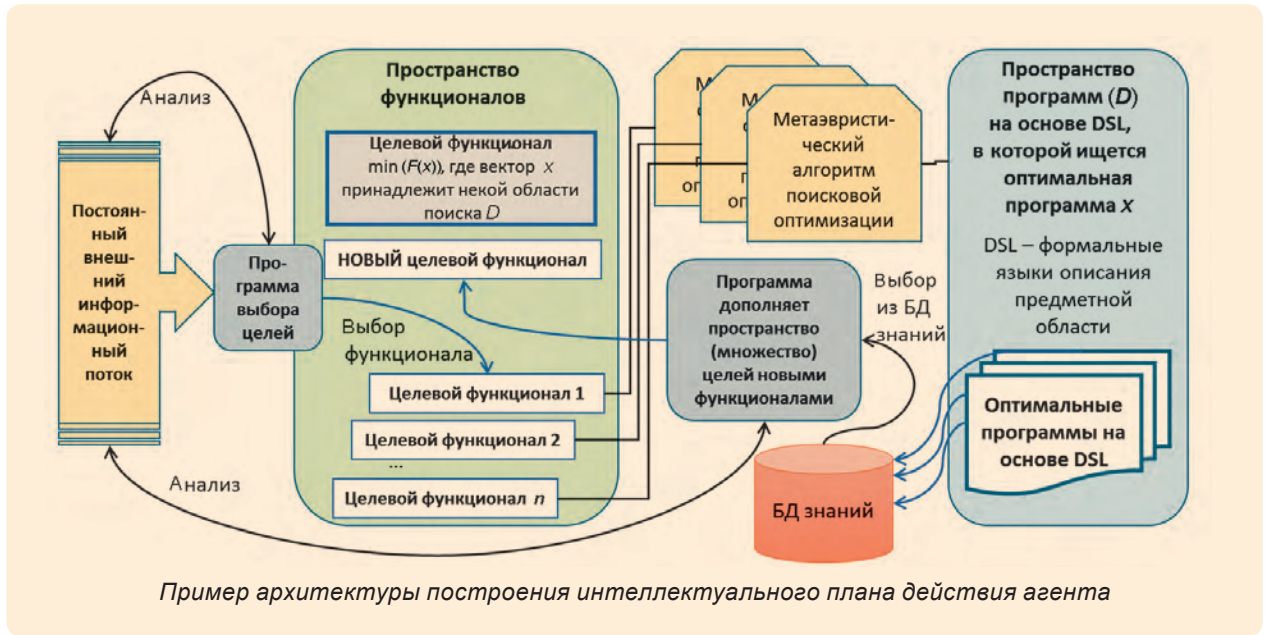
личества агентов разных типов, запрограммированных в соответствии с определенными требованиями. Платформа использует единый для всех агентов механизм продвижения по времени и решает вопросы взаимодействия агентов (обмен событиями, сообщениями и т. д.).

Система поддержки принятия решений (СППР) – это комплекс математических и эвристических методов и моделей, объединенных общей методикой формирования управленческих решений в сложных организационных системах, обеспечивающих помощь лицу, принимающему решения.

Основные задачи, решаемые СППР:

- сбор и хранение первичной информации;
- анализ текущей обстановки;
- моделирование процессов;
- выработка и определение оптимального решения;
- анализ последствий принятия решения;
- прогнозирование развития ситуаций.

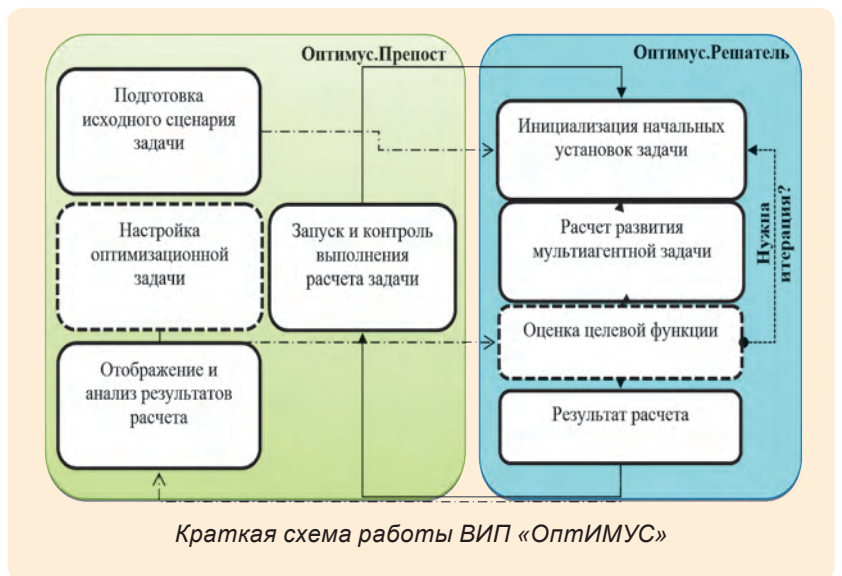
Имитационное моделирование является базовой составляющей автоматизированных СППР.



Программная архитектура ВИП «Оптимус». Основными особенностями ВИП «Оптимус» являются:

- единая программная среда, обеспечивающая взаимодействие и гибкие интерфейсы пользователей для различных компонент;
- базовые средства имитационного моделирования различных систем;
- базовые средства подготовки различных сценариев моделирования;
- различные средства оптимизации моделируемых ситуаций на основе заданных критериев;
- унифицированные способы хранения информации для взаимодействующих компонент;
- все компоненты программной системы имеют возможность привязки к геопространству с визуализацией результатов расчетов;
- отображение результатов расчетов в табличном (текстовом) виде с возможностью экспорта в различные форматы.

ПП «Оптимус.Препост» (далее – препостпроцессор) предназначен для выполнения следующих задач: подготовка ис-



ходного сценария задачи, настройка оптимизационной задачи, запуск расчета, отображение и анализ результатов расчета. ПП «Оптимус.Препост» разработан на языке программирования C++. При разработке использованы свободно распространяемые программные библиотеки, среди которых можно выделить:

- Delta3D – игровой движок с возможностью редактирования игровых сценариев как библиотека базового функционала графического пользовательского интерфейса;
- osgEarth – библиотека виртуального глобуса как геопространственное средство визуализации моделируемого сценария на карте.

ПП «Оптимус.Препост» разработан как кроссплатформенное приложение и поддерживает работу на операционных системах семейств Windows и Linux.

ПП «Оптимус.Решатель» предназначен для выполнения следующих задач: инициализация начальных установок, расчет развития имитационной мультиагентной задачи, оптимизация решения.

В процессе расчета ПП «Оптимус.Решатель» сохраняет результаты моделирования в виде отдельного файла сценария или в виде записи в расчетной базе данных с возможностью последующего открытия результатов в ПП «Оптимус.Препост». Кроме того, «Оптимус.Решатель» должен взаимодействовать с препост-процессором для обеспечения механизма отслеживания статуса выполнения расчета.

В ПП «Оптимус.Решатель» входят следующие базовые модули: имитационного моделирования систем, оптимизации моделируемых ситуаций на основе заданных критериев, хранения информации для взаимодействующих модулей.

Представленные выше технологии искусственного интел-

лекта и интеграция их в платформу имитационного моделирования позволяют вывести на новый уровень качество проектирования сложных систем. Инструментарий ПК, создаваемых на базе развиваемой ВИП «Оптимус», может стать важной поддержкой при принятии решений по различным вопросам, связанным с оборонной и гражданской тематиками, обеспечивая при этом эффективную и качественную разработку интеллектуальных моделей и имитацию их применения в виртуальном геопространстве.

РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ, СУПЕРКОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ ПРОМЫШЛЕННОЕ ВНЕДРЕНИЕ

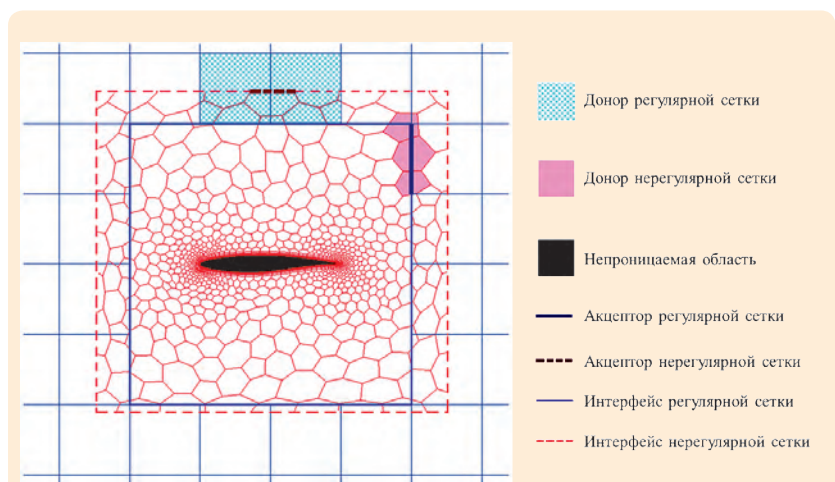
Поскольку важным компонентом технологий суперкомпьютерного моделирования является развитие отечественного прикладного программного обеспечения, в 2020 г. продолжалась работа по развитию пакета программных продуктов ЛОГОС в части расширения возможностей разработанных вычислительных схем и алгоритмов.

В частности, в пакет ЛОГОС введена возможность решения

задач отделения грузов. Такие задачи решаются с использованием технологии расчета на сетках с перекрытиями. В случае моделирования на сетках с перекрытиями, получивших в научных кругах второе название – сетки типа *химера*, расчет производится на двух и более топологически не связанных между собой дискретных моделях. Вычислительный процесс ведется параллельно на всех сетках с учетом их взаимного расположения и взаимодействия.

В качестве иллюстрации возможностей разработанных вычислительных схем и алгоритмов, реализованных в пакете программ ЛОГОС, приведено решение характерной задачи авиационной промышленности. Необходимо отметить, что технология расчета на сетках с перекрытиями предполагает генерацию независимых дискретных моделей для различных объектов, которые в дальнейшем объединяются в одну сетку с перекрытиями. Вычислительный процесс на основе технологии *химера* учитывает наличие перекрытий и обеспечивает взаимодействие разделенных сеток.

Центральной задачей методики является сопряжение несвязанных доменов и построение интерполяционного шабло-



Пример сетки с перекрытиями вблизи профиля крыла

на для взаимодействия сеток. Ниже приведены определения, принятые в большинстве работ по методам расчета на сетках типа *химера*:

- интерфейс – открытая граница дискретной модели, значение полей на которой формируется на основании данных из окрестных ячеек;
- акцептор – грань интерфейса;
- доноры – ячейки, значения полей которых используются для восстановления информации на интерфейсах.

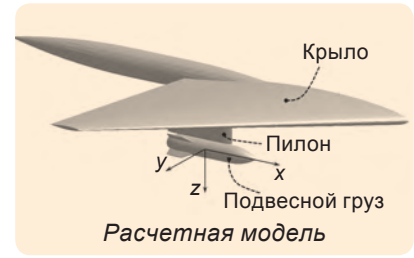
При расчете динамики отделяемого объекта исходят из того, что отсоединяемый груз обладает своими динамическими свойствами, которые могут изменяться в процессе моделирования. В тех случаях, когда свойства объекта не изменяются во времени, целесообразно применять модельное понятие классической механики – модель твердого тела. Данная математическая абстракция позволяет проводить численный анализ движения тела под дей-

ствием различного рода факторов – как под действием аэродинамических нагрузок, так и при наличии сил гравитации. Для возможности численного моделирования подобных задач в пакете программ ЛОГОС внедрена модель твердого тела.

Однако динамика неполного подвесного топливного бака вследствие сброса будет отличаться от динамики пустого, поскольку движение топлива в баке изменяет центр масс, инерционные характеристики объекта. В данном случае модель твердого тела неприменима, альтернативной может служить связанный расчет: ЛОГОС-Аэродинамика + ЛОГОС-Гидродинамика.

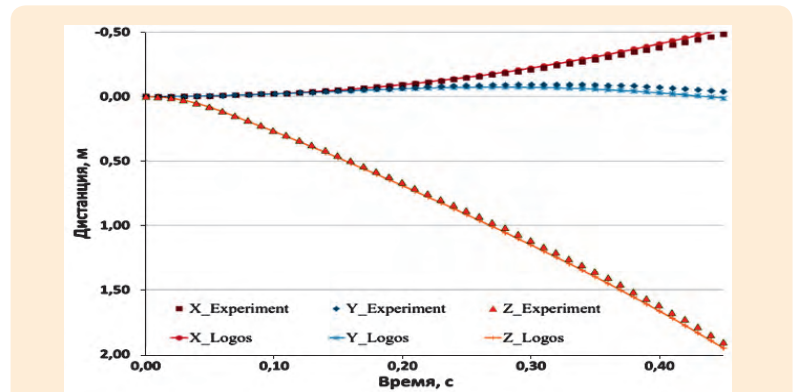
В качестве демонстрации работоспособности разработанных алгоритмов рассматривается задача нестационарного отделения подвесного груза в трансзвуковом потоке вязкого газа.

Для решения задачи была сгенерирована сетка с перекрытиями, состоящая из двух

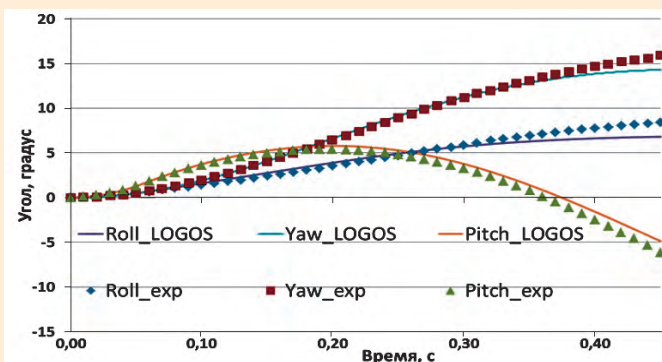


доменов. На груз на протяжении всего численного эксперимента действовали аэродинамические нагрузки и сила тяжести; задавались масса и компоненты тензора инерции: $m = 907,1803$ кг, $M_{xx} = 27,12$ м² · кг, $M_{yy} = M_{zz} = 488,1$ м² · кг.

Для моделирования принимался однородный поток вязкого газа с числом Маха $M_\infty = 0,95$ при значении числа Рейнольдса $Re = 1,8 \cdot 10^6$. Шаг по времени составлял 0,002 с. В задаче оценивалось положение центра масс и изменение углов поворота груза с течением времени. Сравнение результатов компьютерного моделирования и экспериментальных данных показано на графиках.



Изменение координат центра масс в зависимости от времени



Изменение углов курса, крена, тангажа в зависимости от времени

Как видно из графиков, результаты расчета хорошо согласуются с экспериментом. Таким образом, пакет программ ЛОГОС позволяет успешно проводить численное моделирование процесса отделения грузов в присутствии носителя. Реализованные алгоритмы отвечают требованиям, предъявляемым к точности получаемых результатов, вычислительной эффективности.

Ниже кратко перечислены все основные работы, выполненные в 2020 г. в интересах развития различных модулей пакета программных продуктов ЛОГОС в части расширения возможностей разработанных вычислительных схем и алгоритмов.

Одной из перспективных областей применения пакета программ ЛОГОС является решение задач атомной отрасли. В 2020 г. успешно реализован второй этап проекта по созданию на базе пакета программ ЛОГОС и его модульной интеграционной платформы «ЛОГОС Платформа» комплексной системы ЛОГОС-Атом, предназначенной для суперкомпьютерного сквозного моделирования физических процессов, включая мультидисциплинарное моделирование, в интересах проектирования, обоснования безопасности и сопровождения эксплуатации объектов использования атомной энергии. Реализация проекта направлена на решение наиболее важных и актуальных задач отрасли.

В 2020 г. выполнены следующие работы:

1) реализованы ключевые компоненты:

- сквозной технологии обоснования водородной безопасности АЭС (разработаны программные средства моделирования переноса и конденсации парогазовых смесей, расчета горения водородсодержащих парогазовых смесей, для моде-

- лирования импульсных воздействий на железобетонную конструкцию с учетом напряженно-деформированного состояния конструкции, обусловленного предварительным натяжением арматуры и армоканатов);

- сквозной технологии анализа долговечности конструкций, работающих в условиях интенсивных термоциклических воздействий, и обоснования ресурса термонагруженного оборудования и систем реакторной установки (РУ) (в рамках программного средства «Resource» реализованы перспективные модели термопластичности, деформирования и накопления повреждений при усталостных нагрузениях, при деградации материала по механизмам малоциклового и многоциклового усталости с учетом их взаимного влияния, многоциклового усталости);

- технологии теплогидродинамического анализа для обоснования быстрых реакторов с жидкометаллическим теплоносителем (разработано программное средство для моделирования турбулентного теплообмена на базе полуэмпирических корреляций и перспективных четырехпараметрических моделей турбулентности);

- технологии теплогидродинамического анализа для обоснования РУ с водо-водяным теплоносителем при различных режимах эксплуатации, включая аварийные, сопровождающиеся кипением теплоносителя (разработано программное средство для моделирования многофазных течений в многопоточковом приближении, библиотека свойств воды и водяного пара на основе международного стандарта);

- технологий связанного 3D–1D моделирования элементов различных типов РУ (разработаны программные средства для мультидисциплинарного моделирования 3D теплопроводности и 1D теплогидравлики);

2) с целью развития технологий и программных средств для моделирования нейтронно-физических процессов:

- выполнен первый этап реализации пакета программ ЛОГОС-Нейтрон для суперкомпьютерного моделирования в многогрупповом приближении нейтронно-физических процессов в активной зоне РУ (разработана программная среда для создания двумерных расчетных моделей активной зоны РУ ВВЭР, реализованы модули для двумерного моделирования нейтронно-физических процессов в активной зоне РУ);

- ведется развитие программы TDMCC, аттестованной в Ростехназоре для расчетов ядерной и радиационной безопасности реакторных установок, хранилищ и контейнеров для перевозки ядерного топлива (реализована пилотная версия программного модуля для подготовки и задания входных данных, разработаны программные средства, обеспечивающие расчет кампаний реакторов методом Монте-Карло в квазистационарном режиме без обратных связей);

3) выполнен большой комплекс работ по тестированию и верификации:

- для моделирования теплогидродинамических процессов в оборудовании РУ ВВЭР при режимах нормальной эксплуатации и режимах нарушения нормальной эксплуатации при условии сохранения однофазного состояния теплоносителя;

- для моделирования теплогидродинамических процессов в оборудовании быстрых реакторов с жидкометаллическим теплоносителем;

- для моделирования импульсных воздействий на железобетонные конструкции с учетом предварительного напряженно-деформированного состояния от натяжения арматуры и армоканатов.

В интересах внедрения на предприятиях атомной отрасли завершена процедура аттестации прочностного модуля пакета программ ЛОГОС в Ростехнадзоре России (ФБУ «НТЦ ЯРБ»). Модуль ЛОГОС-Прочность аттестован к проведению динамических, статических и вибрационных расчетов оборудования и трубопроводов объектов использования атомной энергии.

Проведена реализация функционирующего макета

единой системы препостпроцессинга для продукта ЛОГОС-Прочность на базе ЛОГОС-Препост. Работа направлена на создание единого информационного пространства и позволяет использовать данные со всех этапов моделирования в ходе анализа результатов, в частности проводить совместное отображение результатов моделирования и элементов постановки модели (нагрузки, локальные системы координат и т. д.). Реализован базовый набор алгоритмов графической и числовой обработки.

В 2020 г. наряду с развитием пакета программных продуктов ЛОГОС продолжалась работа по развитию и внедрению пакета программ НИМФА. Был успешно выполнен договор между Госкорпорацией «Росатом» и ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» в объеме 2020 г. в рамках реализации утвержденной генеральным директором Госкорпорации «Росатом» А. Е. Лихачевым программы «Внедрение инновационного отечественного программного продукта "Программный комплекс "НИМФА" в практику работ по оценке воздействия ЯРОО Госкорпорации "Рос-

атом" на подземные, поверхностные воды и грунты в качестве отраслевого стандартного программного продукта в период с 2018 по 2021 годы». В рамках работ по этому договору состоялась внедрение пакета НИМФА и разработанной средствами пакета геомиграционной модели на ПАО «НЗХК».

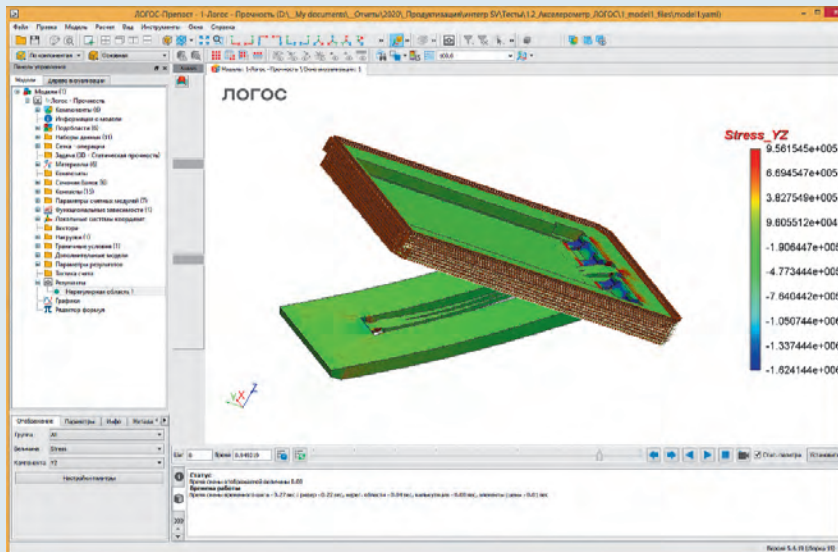
Совместно с ФГБУ «Гидроспецгеология» выполнена актуализация геомиграционной модели промплощадки ФГУП ПО «Маяк» и проведена оценка долговременных последствий химического и радиоактивного загрязнения подземных и поверхностных вод в границах зон возможного влияния объектов ядерного наследия.

Проведены прогнозные расчеты геомиграции и геофильтрации на модели ПХРО Грозненского отделения филиала «Южный территориальный округ» ФГУП «РосРАО».

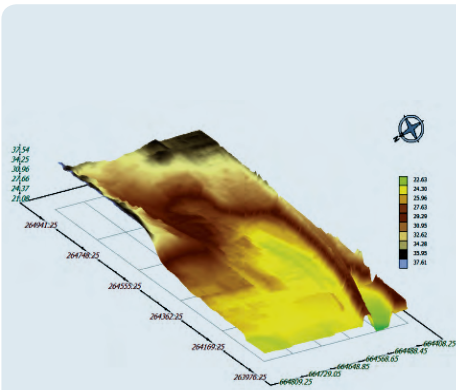
В рамках работ по договору проведен обучающий онлайн-семинар для пользователей пакета программ «НИМФА». Для семинара был подготовлен большой объем обучающих материалов (презентации, тьюториалы, видеоролики и т. п.).



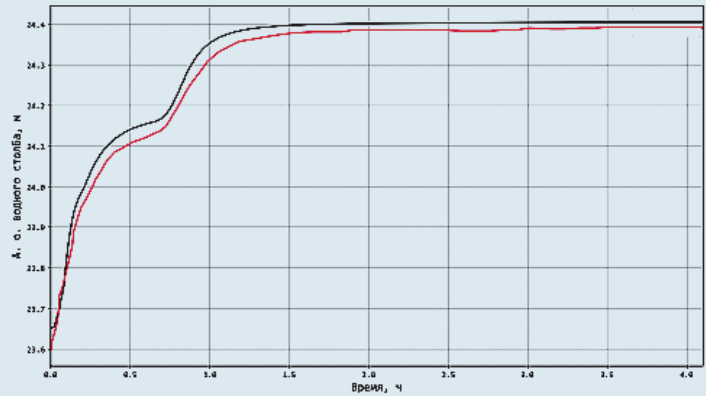
Аттестационный паспорт модуля ЛОГОС-Прочность



Отображение результатов моделирования задачи статического анализа конструкции с учетом контактного взаимодействия (применено графическое масштабирование деформированного состояния и отображение граничных условий)

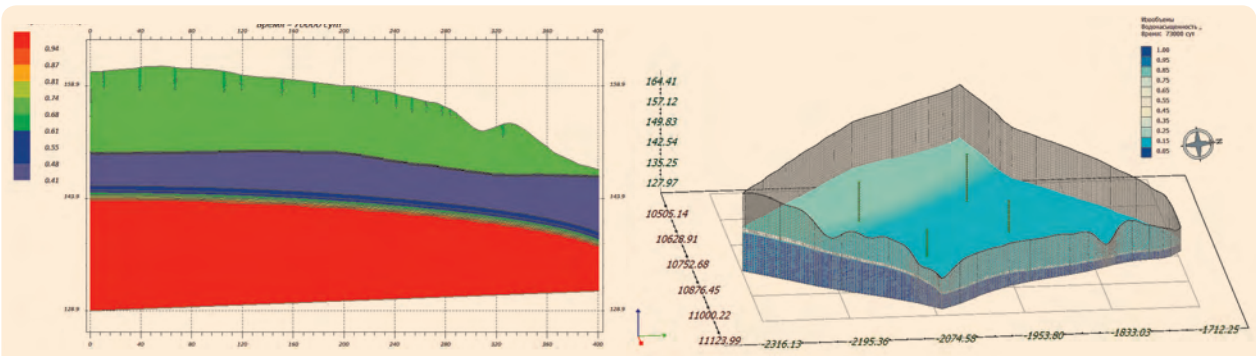


Цифровая модель рельефа



Уровень воды в одной из точек (сравнение результатов НИМФА (—) с эталонным результатом пакета TUFLOW) (---)

Моделирование затопления городской территории



Распределение водонасыщенности в 2D-модели ВНИИХТ

Уровень грунтовых вод в 3D-модели ВНИИХТ

Пример моделирования насыщенно-ненасыщенной фильтрации

В состав пакета НИМФА в 2020 г. были введены 5 новых программных модулей, в том числе очень важный модуль автоматической калибровки геомиграционных моделей, которого нет ни в одном программном продукте.

Доработан и расширен модуль поверхностного стока в составе пакета НИМФА. Реализован алгоритм решения полной системы уравнений Сен-Венана, основанный на алгоритме SIMPLE.

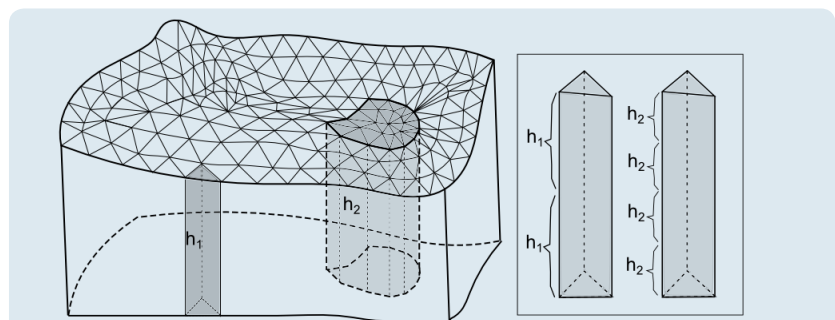
В составе пакета НИМФА выполнена программная реализация подхода PVST (Primary Variable Switching Technique) при моделировании насыщенно-ненасыщенной фильтрации, что дало существенное сокращение времени решения соответствующих задач.

Проведено развитие сеточного генератора ПК НИМФА:

- внедрена процедура определения топологической нерегулярности сетки;
- реализовано сглаживание разбиений между зонами со сгущениями и остальной областью в последовательном и параллельных режимах с учетом числа, характеризующего отношение минимального

(максимального) разбиения при сглаживании;

- реализована декомпозиция, учитывающая пустоты на поверхности заданной модели в последовательном и параллельном режимах;
- доработан метод дробления гексагональной сетки для возможности применения его на сетке, включающей призматические ячейки.



Пример задания зоны с дополнительной детализацией

Расширен функционал препостпроцессора ПК НИМФА:

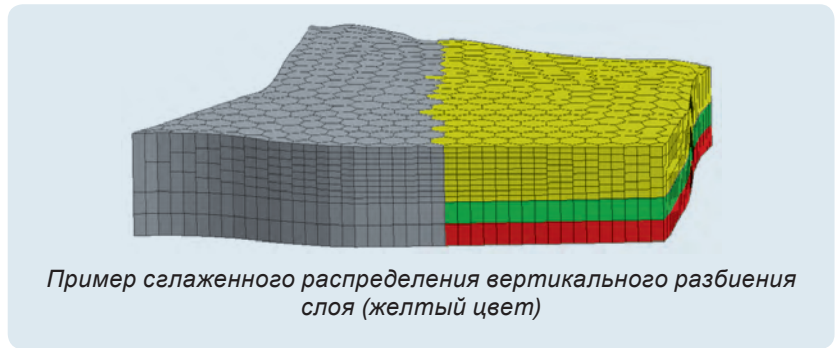
- добавлена возможность управления активностью сеточных объектов из модуля управления сеткой модели;
- разработан редактор атрибутивных таблиц объектов гидрогеологической схематизации;
- добавлен новый шаблон построения изоповерхности заданной величины в ячейках, представляющих собой призму;
- переработан и реализован алгоритм построения заданных изообъемов в ячейках, через которые проходит несколько изоповерхностей.

В 2020 г. в рамках постановления Правительства Российской Федерации велись работы по внедрению пакета программ ЛОГОС в деятельность ряда ведущих предприятий оборонно-промышленного комплекса. Был выполнен и сдан заказчику – Министерству промышленности и торговли – ряд проектов, а в нескольких проектах – этапы 2020 г., в ходе которых, помимо успешного внедрения пакета программ ЛОГОС в работу предприятий, получены значимые научные результаты.

Так, например, в ходе реализации проекта «Разработка программного модуля расчета аэродинамических характеристик военно-транспортных самолетов в естественных условиях обледенения» разработаны:

– методика и программные средства моделирования следующих процессов: обтекания летательного аппарата многофазным потоком, растекания и кристаллизации водяной пленки по поверхности летательного аппарата;

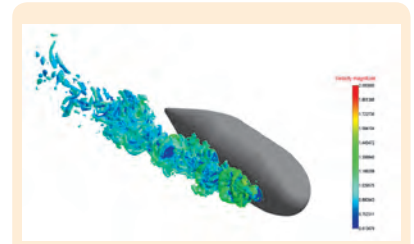
– ряд специальных программных средств для включения в генераторы дискретных моделей при решении задачи обледенения;



Пример сглаженного распределения вертикального разбиения слоя (желтый цвет)



Форма ледяного нароста на мотогондоле летательного аппарата



Пример результатов решения валидационной задачи

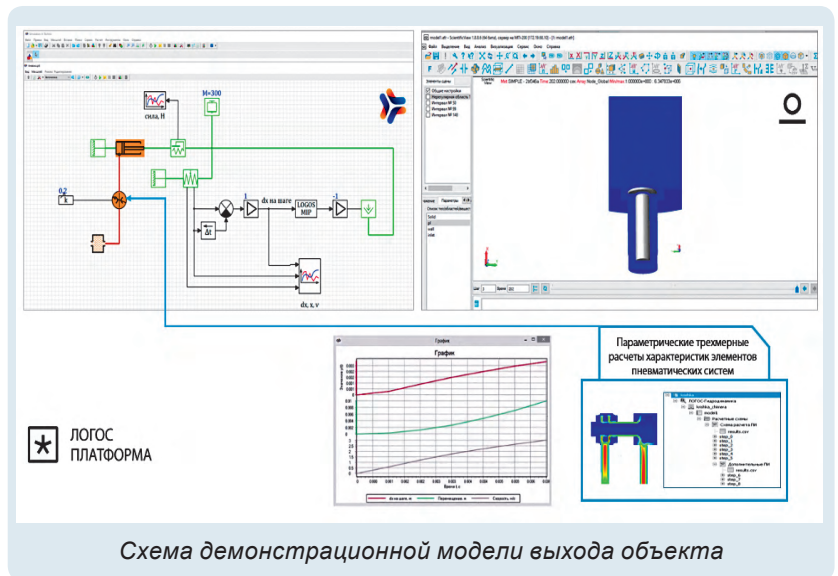


Схема демонстрационной модели выхода объекта

– верификационные базы тестирования на задачах моделирования обледенения летательных аппаратов.

Окончание работ по проекту запланировано на 2021 г. Созданный программный модуль планируется к внедрению в работы ПАО «ИЛ».

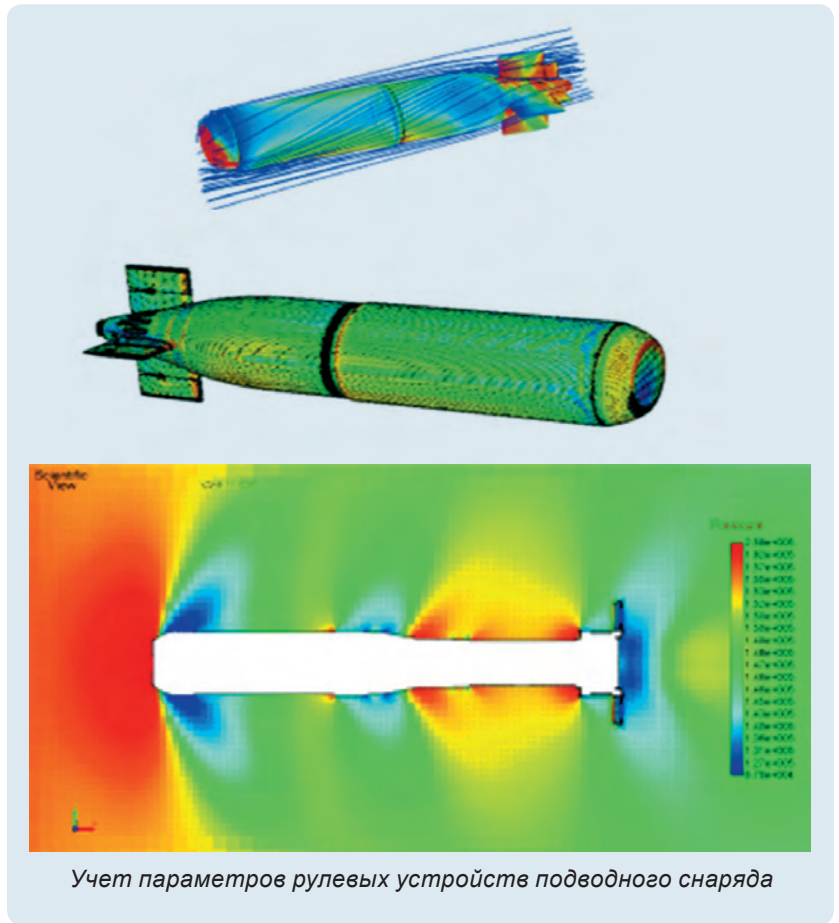
В проекте «Разработка специализированных программных средств для формирования суперкомпьютерных двойников элементов и систем многоцеле-

вых АПЛ и специальных ГТС», завершено в 2020 г., разработаны специализированные программные средства и отработаны сквозные технологии их применения. Применимость технологий подтверждена на верификационном и валидационном базисе, включающем 42 задачи.

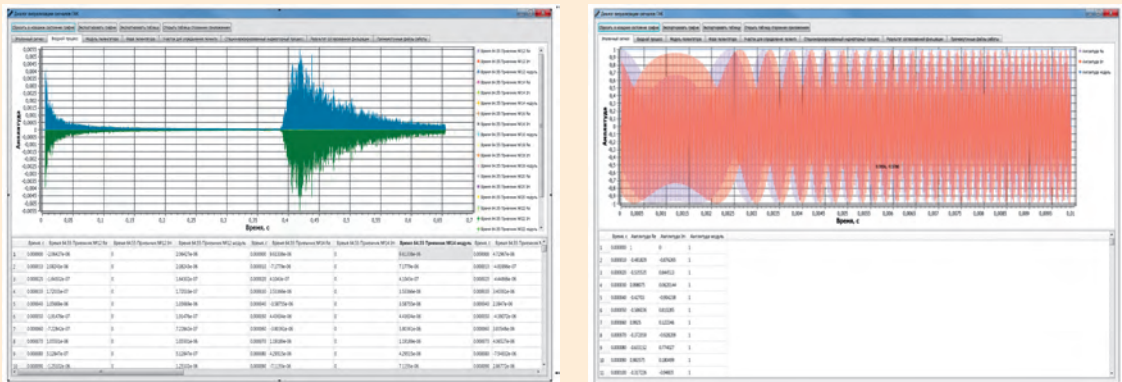
Созданные программные средства внедрены в АО «СПМБМ «Малахит» и АО «ОКБМ Африкантов». Проведены обучающие мастер-классы для сотрудников

данных организаций, оснащены их рабочие места.

В проекте «Разработка технологии суперкомпьютерного моделирования процессов функционирования подводного снаряда в соответствии с его полной схемой применения с использованием комплексных суперкомпьютерных моделей» разработаны методики расчетной оценки параметров движения подводного снаряда на различных участках траектории, в том числе с учетом параметров движителя и рулевых устройств, а также параметров неконтактного гидроакустического датчика. Методики реализованы в виде программно-методического комплекса (ПМК), включающего взаимосвязанные модули инженерного анализа и имитационного моделирования. ПМК оснащен проблемно-ориентированным графическим пользовательским интерфейсом.



Учет параметров рулевых устройств подводного снаряда



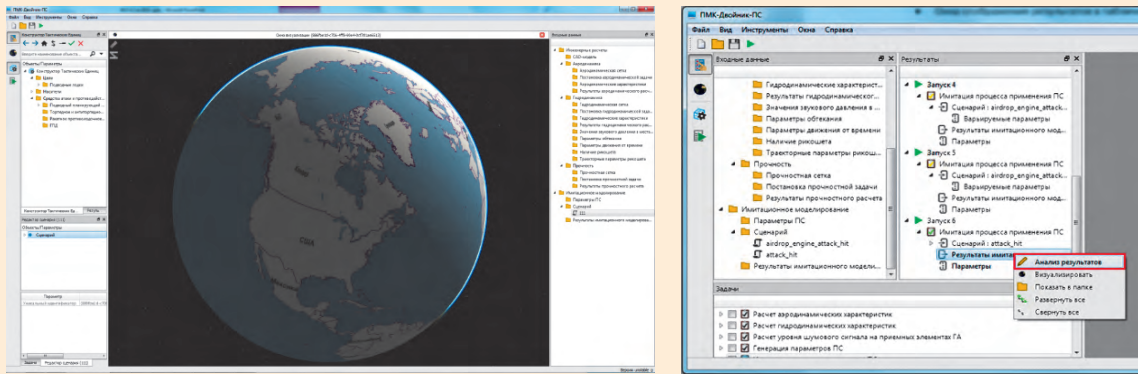
Результаты работы модели гидроакустического датчика

В рамках проекта «Разработка технологии суперкомпьютерного моделирования кумулятивного взрыва, процессов функционирования кумулятивного снаряда в условиях выстрела, на траектории и взаимодействия с преградой, основанной на применении комплексных суперкомпьютерных моделей (суперкомпьютерный двойник кумулятивного снаряда)» создан ПМК, вклю-

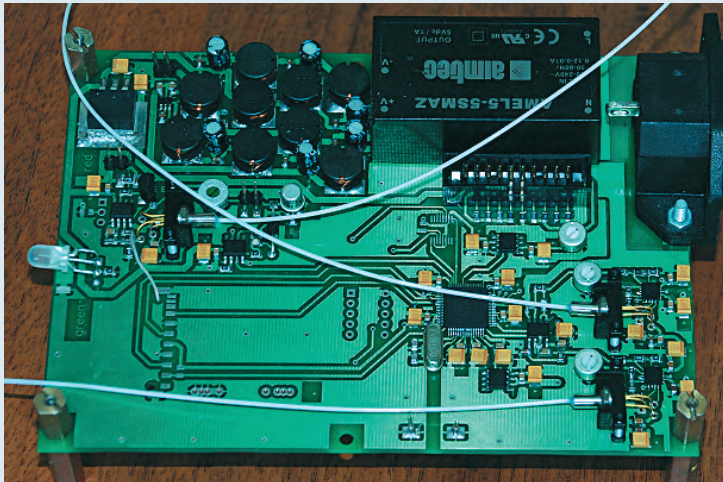
чающий методики численного моделирования расчетной оценки проектных параметров кумулятивного снаряда и определения параметров движения снаряда в стволе (с учетом пространственной кривизны трубы), параметров вылета из канала трубы, расчетной оценки аэродинамических параметров кумулятивного снаряда при различных числах Маха, расчетной оценки основной харак-

теристики снаряда при работе у цели.

Еще один проект, выполненный в 2020 г. по заказу Госкорпорации «Росатом», – это проект «Создание моделей и алгоритмов, программная реализация базовых модулей для выполнения численного электромагнитного моделирования». Цель проекта – разработка концепции создания про-



Проблемно ориентированный пользовательский интерфейс ПМК



Плата комплексного контроллера защиты информации, основанного на методах прямого детектирования и обратного рассеяния

граммного модуля пакета программ ЛОГОС для численного моделирования электромагнитных процессов (ЛОГОС-ЭМИ) в части расчета эффективной поверхности рассеяния сложных технических изделий и антенно-фидерных устройств.

В 2020 г. в ИТМФ активно велись работы по модификации контроллера защиты FOBOS, которые обеспечивают безопасность информации ограниченного доступа, циркулирующей по волоконно-оптическим системам передачи, от утечки по оптическому каналу за пределы контролируемой зоны.

Впервые в России разработаны конструкция и программное обеспечение комплексного контроллера защиты инфор-

мации, основанного на методах прямого детектирования и обратного рассеяния. Получен патент на изобретение № 2611588 «Устройство комплексного контроля волоконно-оптической линии».

Патент отмечен серебряной медалью и специальным призом на международной выставке изобретений ISIF (Стамбул, Турция), золотой медалью в конкурсе патентов на XV Международном салоне изобретений и новых технологий «Новое время» (г. Севастополь, Россия) и призом журнала «Изобретатель и рационализатор».

В 2020 г. продолжалось серийное производство контроллеров защиты серии FOBOS-100. Последние разработки данного контроллера



были признаны образцовыми в номинации «100 лучших товаров России» в Нижегородской области. Отметим, что в целях расширения объемов доходов от коммерциализации контроллеров защиты серии FOBOS-100 его производство в 2020 г. было передано в ООО «Центр компетенций и обучения» (ООО «ЦКО»).

ИНСТИТУТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ГАЗОДИНАМИКИ И ФИЗИКИ ВЗРЫВА (ИФВ)

АСИМПТОТИЧЕСКИЙ МЕТОД КИНЕТИКИ ОБРАЗОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ, ПРОЯВЛЯЮЩИХ КВАНТОВЫЕ СВОЙСТВА

В [1, 2]* разработан асимптотический метод кинетики образования объектов, проявляющих квантовые свойства в различных пространственных масштабах. Метод основан на расширенной трактовке принципов неопределенности и абсолютной определенности и на представлениях о росте объектов из малых зародышей. Предложенный феноменологический подход позволяет получать адекватные оценки характеристик образования субъядерных частиц и ядер, кристаллических наночастиц и мезообъектов, астрофизических и космологических объектов. Упомянутые принципы взаимно дополняют друг друга и предсказывают образование объектов, которые до сих пор либо не обнаружены, либо не являются широко известными и описанными в научной литературе явным (подробным) образом.

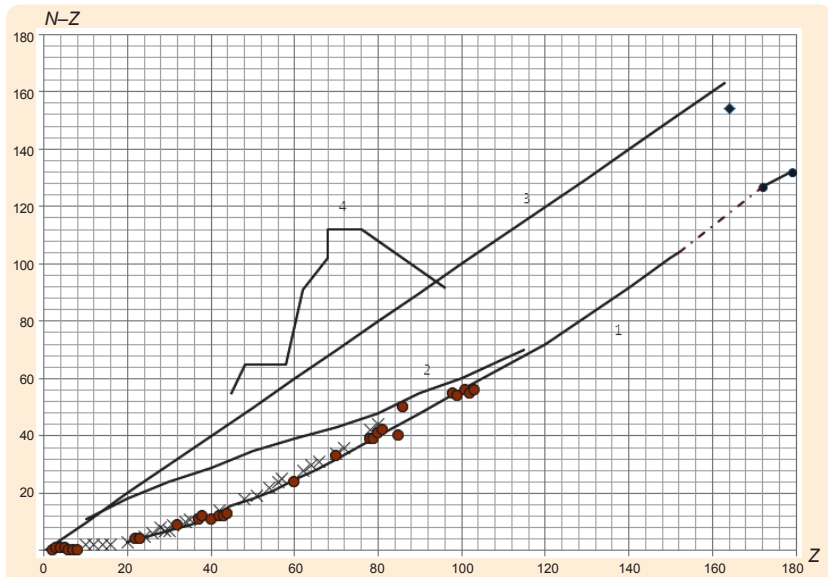
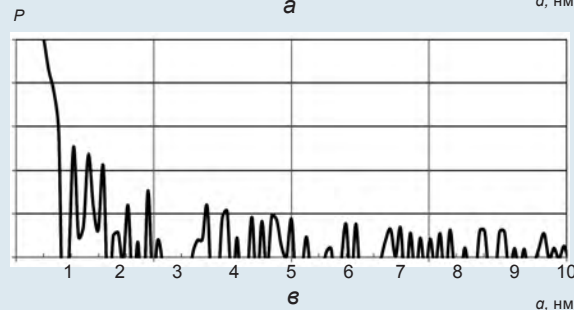
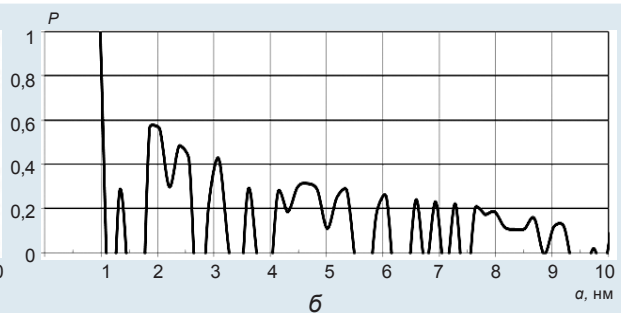
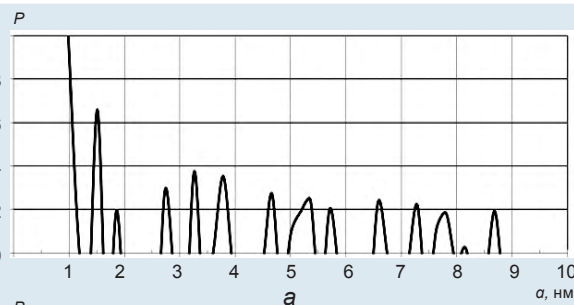


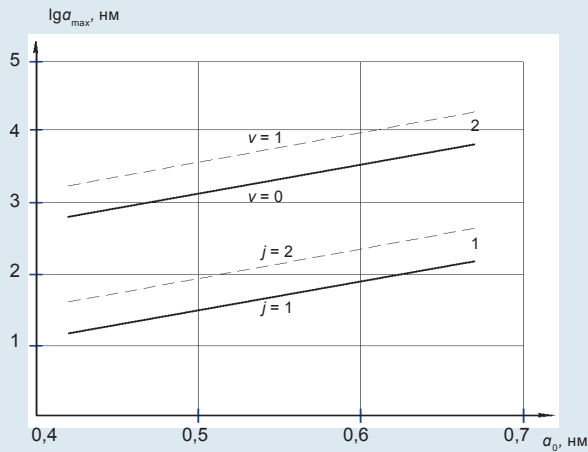
Диаграмма нейтронно-избыточных ядер: 1 – параболическая линия 2β -стабильности по Селинову; 2 – граница известных нейтронно-избыточных ядер; 3 – предполагаемая граница существования нейтронно-избыточных ядер; 4 – граница нейтронной стабильности по отношению к испусканию (захвату) одного нейтрона ($1n$ ГНС по Гридневу и др.); ● – элементы, рассчитанные в [1] в совокупности с формулой β -стабильности Вейцзекера и периодической системой атомных ядер Селинова; × – стабильные изотопы, рассчитанные в [1] в совокупности с формулой Вейцзекера; ◆ – «остров стабильности» $Z = 164, N = 318$, упоминаемый Селиновым; ● – конечные нуклиды $Z = 172, N = 299$ и $Z = 179, N = 311$, рассчитанные в [1] сочетании с систематикой Селинова



Относительная плотность распределения наночастиц тяжелых металлов по размерам в ударной волне внутри образца: а – Pb, $T = 300$ K; б – Pb, $T = 500$ K, шаг расчетов 0,175 нм (атомный радиус); в – Th, $T = 2000$ K, шаг расчетов 0,2 нм (атомный радиус)

*[1] Лин Э. Э. Асимптотическая кинетика образования объектов с квантовыми свойствами. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2019.

[2] Лин Э. Э. Асимптотический метод кинетики образования объектов, проявляющих квантовые свойства // Тенденции развития науки и образования. 2020. № 61. Ч. 1. С. 67–76.



Расчетные зависимости максимальных размеров биологических наночастиц и мезообъектов от размеров зародышей – молекул аминокислот: 1 – вращательные уровни, $j = 1$ – основное состояние, $j = 2$ – первое возбужденное состояние; 2 – колебательные уровни, $v = 0$ – основное состояние, $v = 1$ – первое возбужденное состояние

Характеристики взаимодействий между нуклонами внутри ядер

Ядра	Обычные	Предсказываемые гигантские [1, 2]
Вид взаимодействия	Сильное	Предполагаемое
Переносчики	Пионы	Мюонные антинейтрино
Масса покоя m_r , МэВ	139,57	0,19
Комптоновская длина волны, м	$1,46 \cdot 10^{-15}$	$1,05 \cdot 10^{-12}$
Радиус ядра, м	$\sim 10^{-14}$	$2,4 \cdot 10^{-12}$
Юкавский множитель, M^{-1}	$\sim 10^{11}$	$\approx 4 \cdot 10^{10}$

ИССЛЕДОВАНИЕ КУМУЛЯТИВНЫХ ЗАРЯДОВ С МЕДНЫМИ ОБЛИЦОВКАМИ ВЫСОКОДИСПЕРСНОЙ МИКРОСТРУКТУРЫ

Впервые в России проведено исследование влияния высокодисперсной микроструктуры (размера зерна) медных облицовок на параметры кумулятивных струй зарядов штатного калибра. Уникальные поковки из меди высокой чистоты с раз-

мерами зерна 1, 10 и 20 мкм для кумулятивных облицовок изготовлены в Институте проблем сверхпластичности металлов (ФГБУН ИПСМ РАН, г. Уфа). Заряды изготовлены на заводе ВНИИЭФ по конструкторской документации НИО-19 КБ-1. Испытания по определению пробивной способности и регистрации параметров кумулятивных струй рентгенографическим методом проведены ИФВ.

Впервые получен стабильно высокий уровень пробития

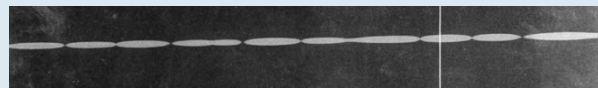
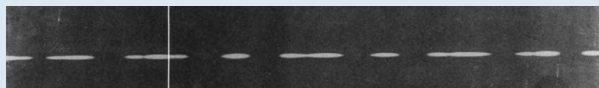
преграды из броневой стали, превышающий 11 диаметров исследуемого кумулятивного заряда. Рентгеновская съемка кумулятивных струй в свободном полете показала увеличение времени существования струи в сплошном состоянии (до разрыва на отдельные фрагменты) на ~20 % по сравнению со штатным материалом и подтвердила устойчивое повышение пластичности по мере уменьшения размеров зерна.



Постановка эксперимента по регистрации кумулятивной струи



Постановка эксперимента по определению пробивной способности



Рентгенограммы лидирующего (слева) и замыкающего (справа) участков струи после разрыва

КАЛИБРОВКА УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ JWL ПРОДУКТОВ ВЗРЫВА ВЗРЫВЧАТЫХ СОСТАВОВ КУМУЛЯТИВНЫХ БОЕПРИПАСОВ

Проведен комплекс расчетно-экспериментальных исследований, направленных на калибровку уравнений состояния (УРС) продуктов взрыва (ПВ) двух взрывчатых составов на основе октогена для кумулятивных боевых частей с целью последующего моделирования в пакете ЛОГОС.

С использованием модифицированной модели Ван-дер-Ваальса построены уравнения состояния исследуемых взрывчатых составов. На основе расчетных УРС ПВ подобраны коэффициенты УРС ПВ в форме JWL (Jones-Wilkins-Lee), которые использовались на следующем этапе при моделировании в пакете ЛОГОС.

Для получения экспериментальной информации, необходимой для верификации УРС ПВ в форме JWL, проведен цикл экспериментальных исследований с привлечением современных методов непрерывной невозмущающей диагностики.

С использованием многоканального комплекса гетеродин-интерферометра зарегистрированы волновые детонационные профили при торможении ПВ на фториде лития и скорости металлических лайнеров, разгоняемых продуктами взрыва исследуемых взрывчатых составов до $\sim 6-7$ км/с.

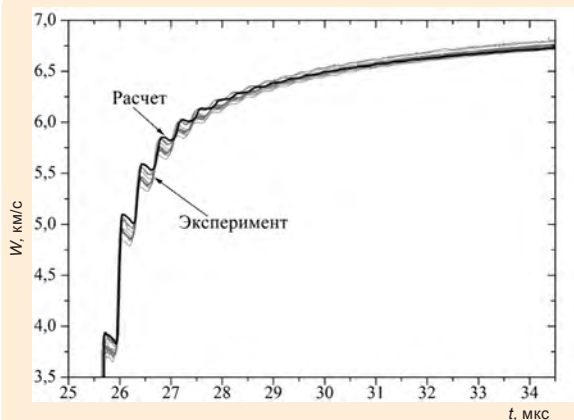
Многоканальный комплекс микроволновой диагностики применен для определения скоростей детонации, параметров перехода ударной волны в детонационную и исследования адиабатического расширения ПВ в воздухе.

С использованием массива полученных эксперименталь-

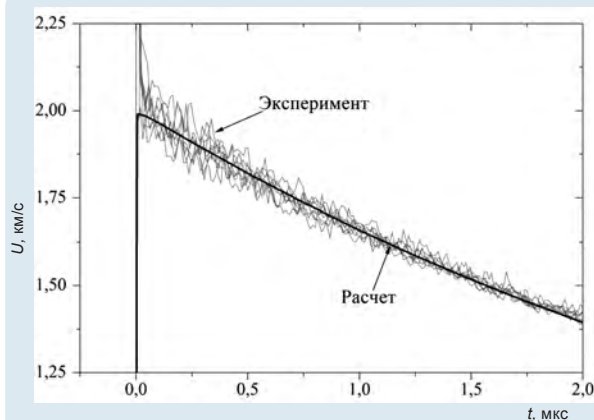
ных данных проведена верификация УРС ПВ взрывчатых составов, подобранные параметры УРС ПВ в форме JWL рекомендованы для использования при проведении моделирования кумулятивных боевых частей в пакете ЛОГОС.

РАЗРАБОТКА ПРЕЦИЗИОННЫХ ВЗРЫВНЫХ НАГРУЖАЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ СЖАТИЯ ПЛАЗМЫ

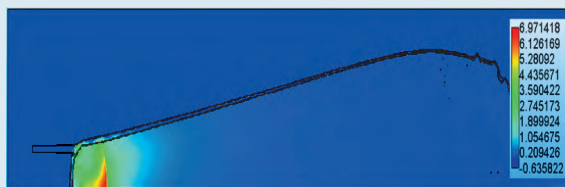
При исследовании ударно-индуцированного «пыления», связанного с выбросом частиц со свободной поверхности (СП) лайнеров из меди М1 при выходе на нее ударной волны с давлением 150 ГПа, определены параметры потоков частиц: удельные массы $m = 3,0 \pm 1,0$ и 10 ± 2 мг/см², соотношения скоростей потока частиц и СП $W/W_{СП} = 1,8 \pm 0,1$ и $1,7 \pm 0,2$ км/с для лайнеров с чистотой поверхности Ra1,25



Зависимость скорости алюминиевой пластины толщиной 1 мм от времени



Зависимость скорости границы раздела ПВ – LiF от времени



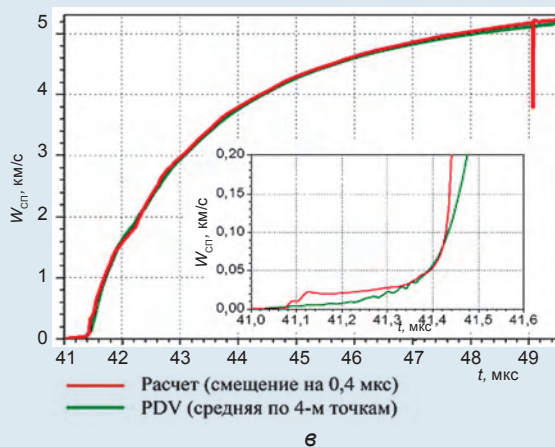
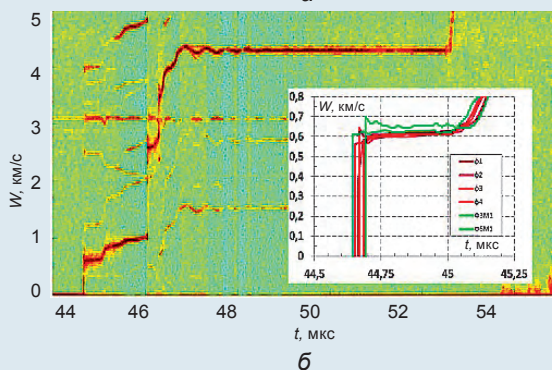
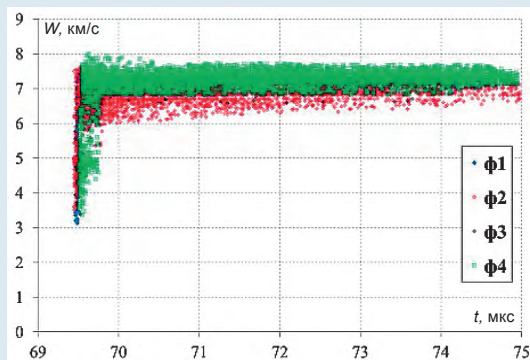
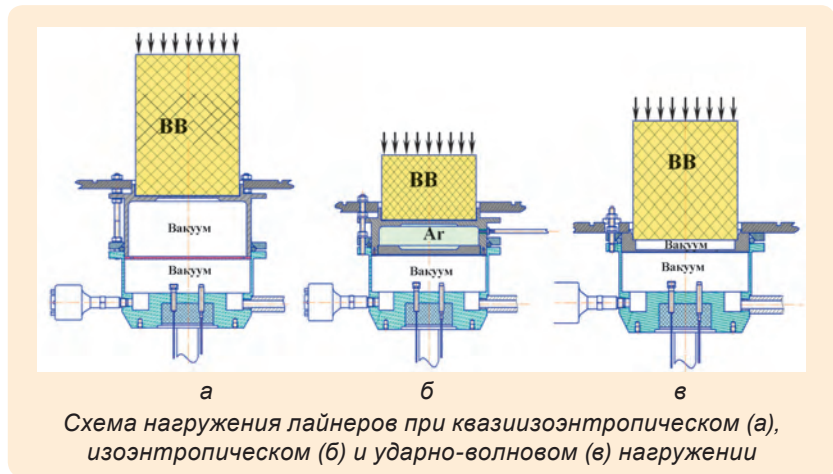
Поле давления (ГПа) в модельном расчете опыта по методу T-20 (разлет медной цилиндрической оболочки)



Поле плотности (г/см³) в модельном расчете опыта по метанию алюминиевого лайнера толщиной 1 мм

и Rz20 соответственно.

Показано, что использование квазиизэнтропического нагружения (серией ударных волн в течение 2 мкс с амплитудой первой волны 10 ГПа) и изэнтропического нагружения (серией волн сжатия в течении ~8 мкс с амплитудой первой волны ~0,1 ГПа) приводит, в отличие от ударно-волнового нагружения, к устранению выброса частиц со СП лайнеров из меди М1 с чистотой обработки Ra1,25 и Rz20



Временные диаграммы скорости лайнеров при квазиизэнтропическом (а), изэнтропическом (б), и ударно-волновом нагружении (в)

при их ускорении до скоростей 4,3 и 5,2 км/с соответственно, по крайней мере в пределах разрешающей способности используемых методик измерений по массе ~0,1 мг/см².

МЕТОДИКА ТРАССЕРНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

В зоне турбулентного перемешивания веществ, развивающегося при гидродинамических неустойчивостях Рэля – Тейлора, Кельвина – Гельмгольца, Рихтмайера – Мешкова, плотность и скорость течения непостоянны, они изменяются во времени, т. е. пульсируют. Величины этих пульсаций принципиально важны для тестирования численных методик, применяемых при расчетах турбулентности. В настоящее время для измерения скоростей течения в зоне перемешивания экспериментаторы пытаются применять метод лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА). Этим методом, как правило, получают пульсации скорости в одной точке зоны, но этого недостаточно.

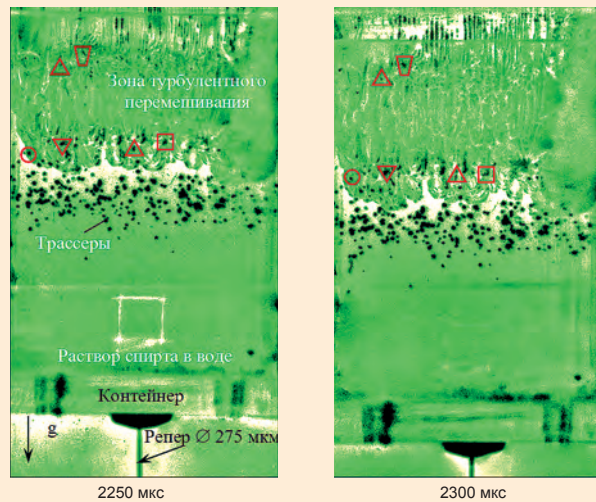
В ИФВ разработана и аттестована методика измерения скоростей течения в зоне перемешивания с использованием метода трассерной визуализации. В этом методе в одно из перемешивающихся веществ добавляются (как и в ЛДА) взве-

шенные мелкие (0,1–0,5 мм) твердые частицы (трассеры). Зона просвечивается тонким (1–2 мм) плоским лазерным лучом. Движение частиц регистрируется видеокамерой. По пролетному расстоянию трассеров, измеренному на видеокадрах, и времени между кадрами определяется скорость трассеров. Принимается, как и в ЛДА, что скорость трассеров равна локальной скорости течения. Вычитая из средней скорости течения локальные, получают пульсации скорости.

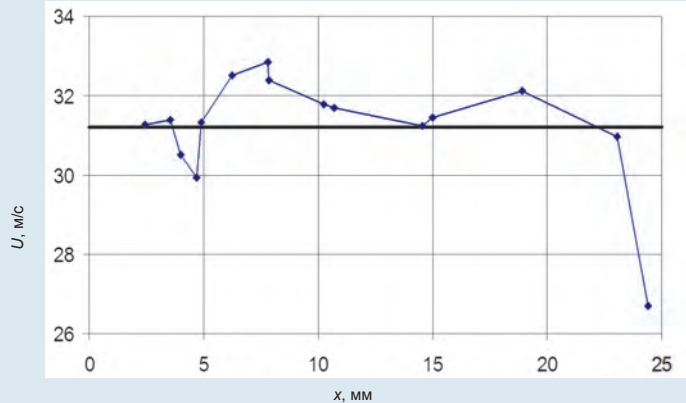
Методика позволяет в одном опыте определять пульсации скорости по всей ширине зоны перемешивания.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УДАРНО-ИНДУЦИРОВАННОГО ВЫБРОСА ЧАСТИЦ, ОТКОЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ И КОМПАКТИРОВАНИЯ РАСПЛАВЛЕННЫХ МЕТАЛЛОВ

Одно из направлений исследований в физике быстропротекающих процессов – это изучение откольного разрушения и компактирования металлов, возникающих вследствие их нагружения ударными волнами (УВ) со спадающим профилем давления. Обычно информацию об этих процессах получают с помощью регистрации зависимости скорости свободной поверхности (СП) образца от времени. Однако при воздействии ударной волны, достаточной для плавления металла, с его СП происходит выброс частиц, экранирующих ее движение. Для решения данного вопроса был внедрен в практику измерений специально разработанный оптический датчик на основе фторида лития LiF, интегрированный с датчиками методики PDV и расположенный на некотором расстоянии от СП образца. Метод регистрации состоит в измерении с помощью данно-



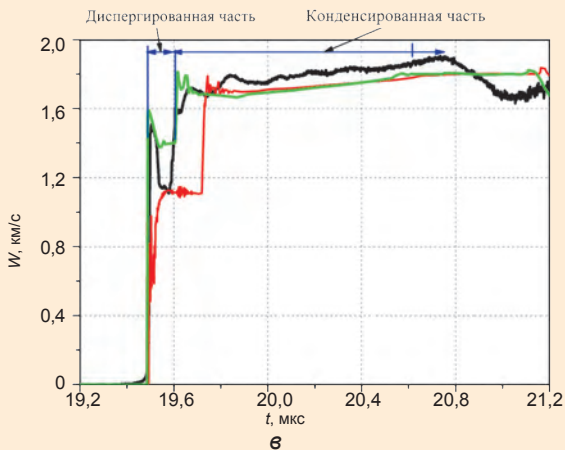
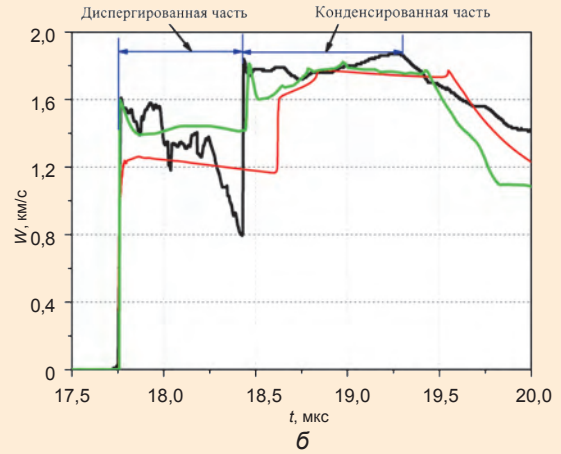
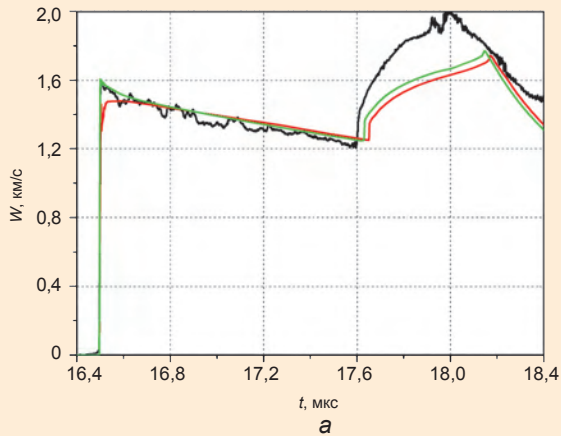
Видеокадры зоны турбулентного перемешивания, развивающейся при неустойчивости Рэлея – Тейлора на границе газ – жидкость, с трассерами (одинаковые трассеры помечены одними символами, g – направление ускорения)



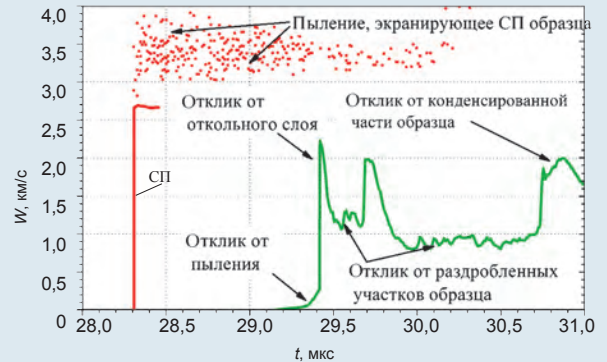
Значения скоростей течения в зоне турбулентного перемешивания газа и жидкости при неустойчивости Рэлея – Тейлора (♦ – участок ширины зоны, черная линия – среднее значение скорости)

го датчика скорости движения контактной границы *разрушенного образца* – LiF. Затем по результатам воспроизведения экспериментальных данных в численных расчетах с применением уравнений состояний и моделей прочности, используемых во ВНИИЭФ, определяется распределение плотности в образце. При использовании данного метода регистрации и привлечении численного моделирования обнаружено, что разрушение жидкого свинца (начальная плотность ~ 11 г/см³), нагруженного УВ с амплитудой давления $P \sim 0,6$ Мбар, происходит с формированием отколь-

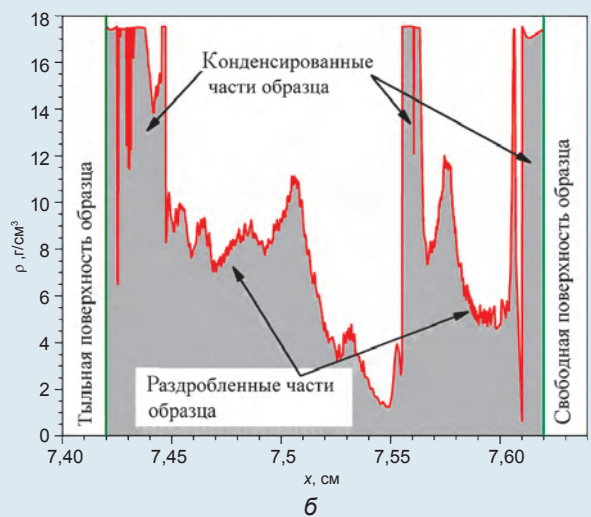
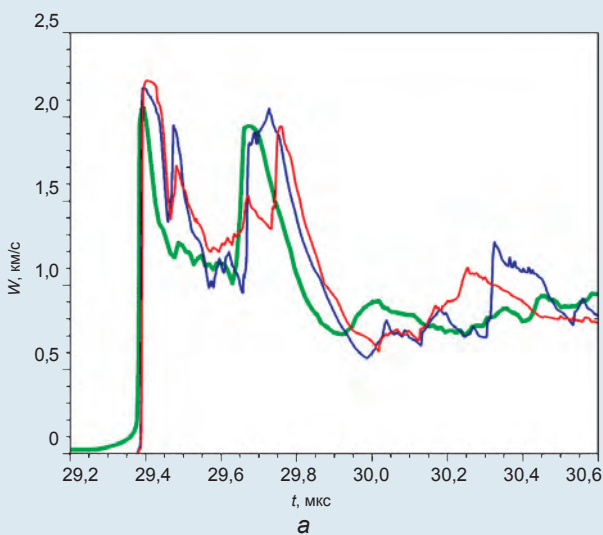
ного слоя толщиной ~ 98 км. При увеличении пролетной базы наблюдалось полное компактирование разрушенного образца до плотности, равной плотности свинца. В 2020 г. была проведена серия экспериментов, позволившая расширить диапазон применимости оптического датчика: с помощью данного метода впервые удалось получить профиль плотности в образцах из тугоплавких металлов с более высокой начальной плотностью (~ 20 г/см³) и требующих перехода в жидкое состояние после воздействия УВ с амплитудой давления свыше 1 Мбар по сравнению со свинцом.



Расчетные и экспериментальные зависимости скорости контактной границы Pb – LiF. Пролетная база: а – $h = 0$ мм, б – $h = 4$ мм, в – $h = 12$ мм. — — эксперимент; — — расчет, хрупкий откол; — — расчет ДПК-L



Экспериментальные зависимости скорости свободной поверхности образца из тугоплавкого металла и контактной границы образца – окно из LiF от времени



Воспроизведение в численных расчетах экспериментальной зависимости скорости контактной границы между образцом из тугоплавкого металла и окном из LiF от времени (а) и распределение плотности в образце, полученное в численном расчете, наиболее близко воспроизводящем экспериментальный отклик (б): — — эксперимент; численный расчет: — — модель откольного разрушения ДПК-L, — — модель откольного разрушения NAG

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ И РАДИАЦИОННОЙ ФИЗИКИ (ИЯРФ)

РАБОТЫ В ЦЕРН

В 2020 г. продолжались начатые в 1996 г. научные исследования в ЦЕРН на Большом адронном коллайдере (БАК).

В период плановой остановки БАК в шахте эксперимента ALICE (глубина более 60 м) в 2020 г. проведены работы по подготовке калориметра PHOS к дальнейшей эксплуатации начиная с 2021 г. Завершены работы по подключению калориметра к системам его жизнеобеспечения: системе охлаждения кристаллов $PbWO_4$ и плат электроники, системе «промывки» внутренних объемов модулей сухим азотом,

системе термостабилизации и контроля температуры массива кристаллов. Завершены пусконаладочные работы, проведено тестовое включение калориметра с целью проверки его работоспособности и герметичности систем охлаждения. По результатам тестовых проверок коллаборацией проекта PHOS принято решение о готовности калориметра к проведению экспериментов в составе супердетектора ALICE на БАК в сеансе RUN3. Следует учесть, что в связи с пандемией ЦЕРН был закрыт в апреле 2020 г., частично ограничения сняты с 15 сентября 2020 г. Тем не менее специалисты РФЯЦ-ВНИИЭФ в режиме онлайн не-

прерывно осуществляли управление калориметром, мониторинг его параметров, обсуждали с коллаборацией PHOS научную программу работ с использованием видеоканала открытого информационного портала «РФЯЦ-ВНИИЭФ – ЦЕРН», организованного на базе СарФТИ НИЯУ «МИФИ».

В 2020 г. продолжалась работа созданного на базе СарФТИ НИЯУ «МИФИ» Саровского ресурсного центра (СРС GRID-центр), который обеспечивает в непрерывном режиме в формате 24/7 365 дней в году со скоростью обмена данными не менее 1 Тбит/с обработку массива физических данных, поступающих со всех детекторов эксперимента ALICE.

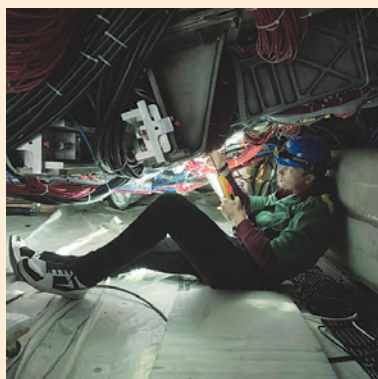
В 2020 г. ученые и специалисты РФЯЦ-ВНИИЭФ в составе большой международной коллаборации ALICE стали соавторами более 40 научных статей, опубликованных в ведущих мировых физических журналах.

ВВОД В ЭКСПЛУАТАЦИЮ МОЩНОЙ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ «ГАММА-4»

Для проведения исследований в области радиационной физики в РФЯЦ-ВНИИЭФ введена в эксплуатацию мощная электрофизическая установка «Гамма-4» (2 МВ, 3 МА, 60 нс), работающая в трех режимах:

- генерация импульсов тормозного излучения;
- генерация импульсов мягкого рентгеновского излучения;
- ударно-волновое и изотропическое сжатие конструкционных материалов давлением до 50 ГПа.

Установка «Гамма-4» состоит из четырех типовых модулей, каждый из которых представляет собой импульсный высокопоточный ускоритель электро-



Специалисты РФЯЦ-ВНИИЭФ в шахте эксперимента ALICE: слева – проверка параметров работы системы охлаждения кристаллов $PbWO_4$; справа – работы внутри магнита L3 по проверке герметичности внешнего корпуса модуля



Проведение сервисных работ с калориметром PHOS: слева – с системой охлаждения, справа – с системой управления



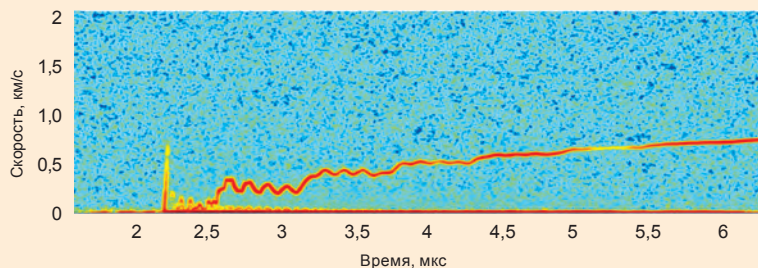
Внешний вид установки «Гамма-4»



Пульт управления установкой «Гамма-4»



Проволочка диаметром 6 мкм



Скорость движения поверхности алюминиевого электрода в зоне его толщины 1 мм, определенная методом PDV

нов прямого действия (2 МВ, 0,75 МА, 60 нс). В режиме генерации импульсов тормозного излучения возможно проводить радиационные исследования с единой диодной нагрузкой. В этом случае можно достичь максимальных плотностей энергии тормозного излучения на объектах небольшой площади. Для проведения радиационных исследований крупногабаритных объектов каждый модуль работает на свой автономный вакуумный диод.

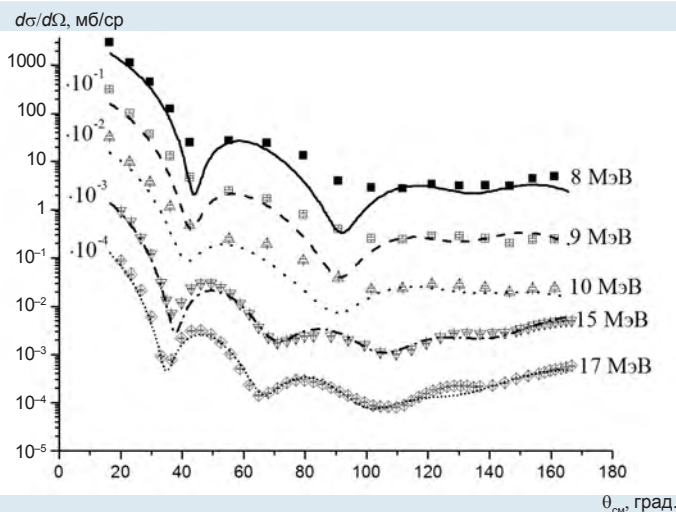
Для получения мощных импульсов мягкого рентгеновского излучения используется лайнерная нагрузка, представляющая собой цилиндр из вольфрамовых проволочек толщиной 4 мкм.

В режиме ударно-волнового сжатия в образце достигнута давление 22 ГПа, при квазиизоэнтропическом сжатии – 10 ГПа. Для регистрации параметров нагружения конструкционных материалов используется аттестованная методика измерения, основанная на методе PDV.

ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Впервые выполнен оптико-модельный анализ всех доступных мировых экспериментальных данных (дифференциальных и полных сечений, поляризации) по упругому рассеянию тритонов на ядрах ${}^9\text{Be}$ в

диапазоне от астрофизических энергий (50 кэВ) до 50 МэВ. В анализе использованы экспериментальные данные, полученные в ИЯРФ на ускорителе ЭГП-10, что особенно ценно, так как литературные данные по реакции ${}^9\text{Be}(t, t_0){}^9\text{Be}$ немногочисленны. Использовался разработанный в ИЯРФ код OptModel, в котором когерентно



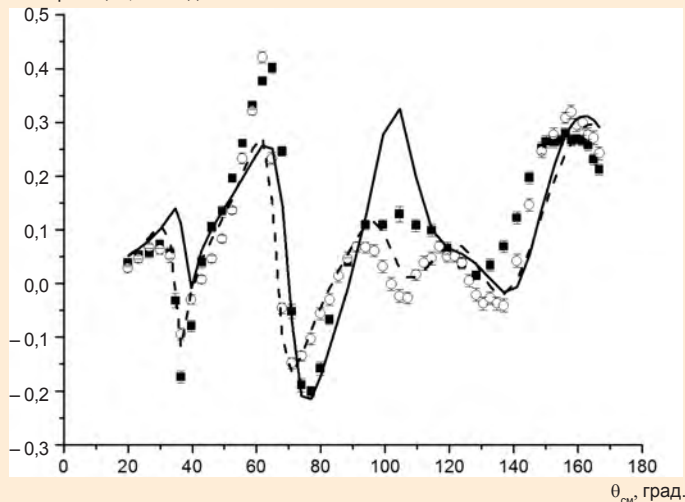
Дифференциальные сечения реакции упругого рассеяния тритонов на ${}^9\text{Be}$ при различных энергиях

учтена амплитуда резонансной составляющей упругого рассеяния. Нарушение унитарности матрицы рассеяния составило 10 %, что находится на уровне средних ошибок экспериментальных данных.

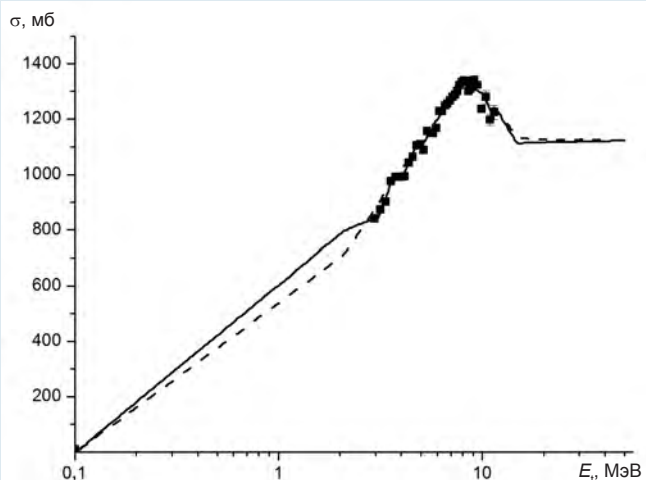
Проведен многоканальный R-матричный анализ реакций с возбуждением составного ядра ^{10}B в интервале энергий 6,5–19,5 МэВ. Такие исследования выполнены впервые. Для анализа использовался программный код AZURE2 (Нотр Дам, США). Рассмотрен весь известный экспериментальный материал. Особую роль в работе занимает анализ экспериментальных данных (дифференциальных и интегральных сечений), полученных в ИЯРФ на ускорителе ЭГП-10 по реакции $^9\text{Be}(p, \alpha_2)^6\text{Li}^*$ (3,5618 МэВ), в которой из-за движения разряжающегося возбужденного ядра лития образуются γ -кванты с большим доплеровским уширением линии. Это свойство реакции выдвигает ее на роль диагностической в управляемом термоядерном синтезе.

В результате исследований определены положения, ширины и квантовые числа 27 уровней. Среди них 14 уровней обнаружены впервые. Для 9 известных уровней уточнены их

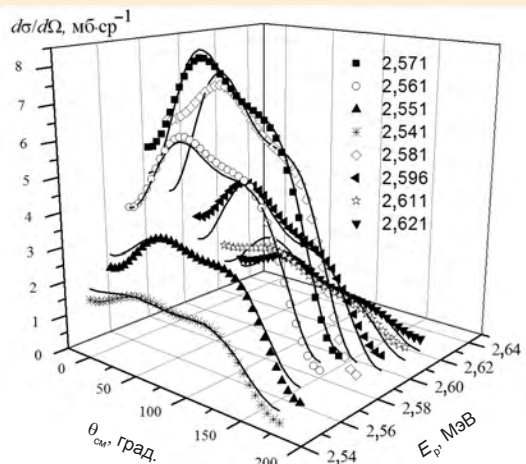
Поляризация, отн. ед.



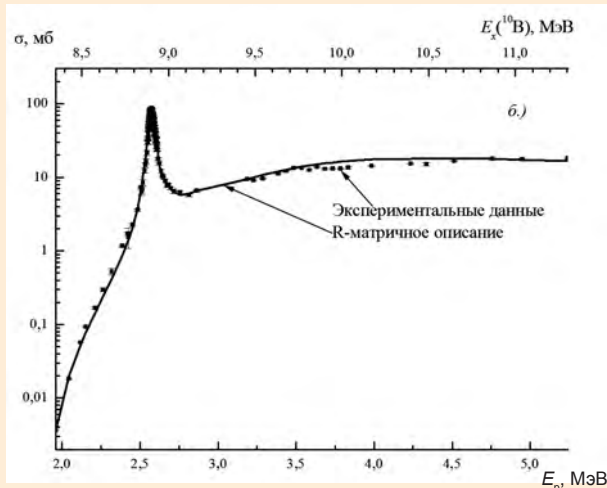
Поляризация при энергии 15 (■) и 17 (○) МэВ



Полные сечения реакции $^9\text{Be} + t$: ■ – экспериментальные данные; — — — описание данных только на основе оптической модели; — — — описание данных на основе оптической модели с учетом резонансов



а

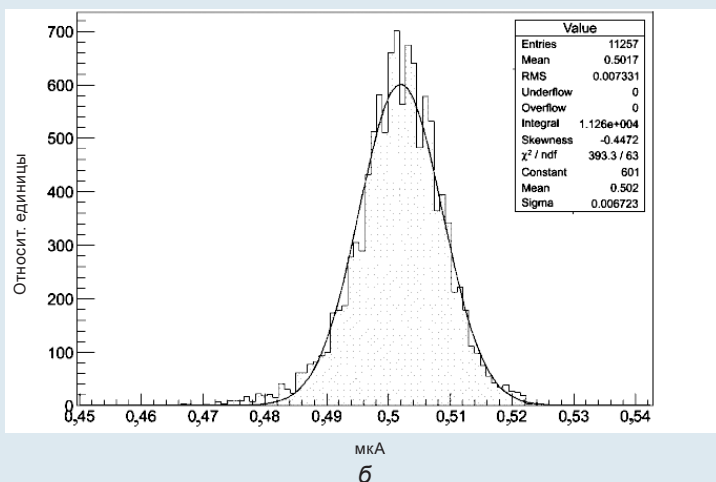
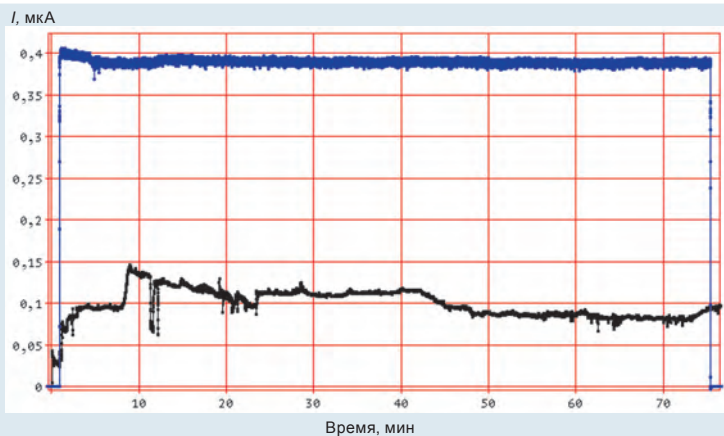


б

Дифференциальные (а) и интегральные (б) сечения реакции $^9\text{Be}(p, \alpha_2)^6\text{Li}^*$ (3,5618 МэВ)

квантовые числа и ширины. Не подтверждено существование 16 справочных уровней. Полученные данные используются в расчетах сечений реакций в областях энергий и углов рассеяния, где отсутствуют экспериментальные данные.

В 2020 г. создан экспериментальный образец автоматизированной системы формирования пучка ионов электростатического ускорителя ЭГП-10, который позволил значительно повысить эксплуатационные характеристики ускорителя. В частности, ток ионного пучка на выходе ускорителя увеличен в 2,5 раза и составляет в настоящий момент 0,5 мкА, стабильность тока во времени увеличена примерно в 33 раза – с 50 до 1,5 %, за счет повышения воспроизводимости параметров источника ионов сократилось время вывода пучка на мишень. Указанные улучшения позволяют снизить статистическую погрешность измерений и повысить производительность работ при проведении ядерно-физических исследований на ускорителе ЭГП-10.



Ток пучка ускорителя ЭГП-10 на цилиндре Фарадея на выходе ускорителя до (черная кривая) и после (синяя кривая) разработки экспериментального образца автоматизированной системы формирования пучка ионов: а – ток на выходе ускорителя; б – распределение значений тока

ХИМИКО-АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В рамках работ по созданию перспективных тепловых химических источников тока (ТХИТ) разработан способ изготовления новой электролитной массы для применения в составе электрохимических элементов, позволяющий получать качественный электролит с хорошей механической прочностью и высокими разрядными характеристиками. Суть технологии изготовления электролитной массы заключается в следующем: предварительно высушенные галогениды лития Li(Cl, Br, F) смешивают при определенном соотношении и расплавляют для получения

эвтектической смеси, которую после охлаждения смешивают с высокодисперсным порошком литий-гамма-алюминатом (γ -LiAlO₂), полученным путем синтеза в результате твердофазной реакции между гидроксидами лития и алюминия при повышенных температурах с проведением ряда последовательных стадий нагревания. Смесь Li(Cl, Br, F) и γ -LiAlO₂ выдерживают при повышенных температурах, гомогенизируют, охлаждают, измельчают. Окончательно полученную смесь подвергают формованию для получения твердого электролита для ТХИТ. На электролитную массу и способ ее изготовления в 2020 г. получен патент РФ № 2732080 на изобретение.

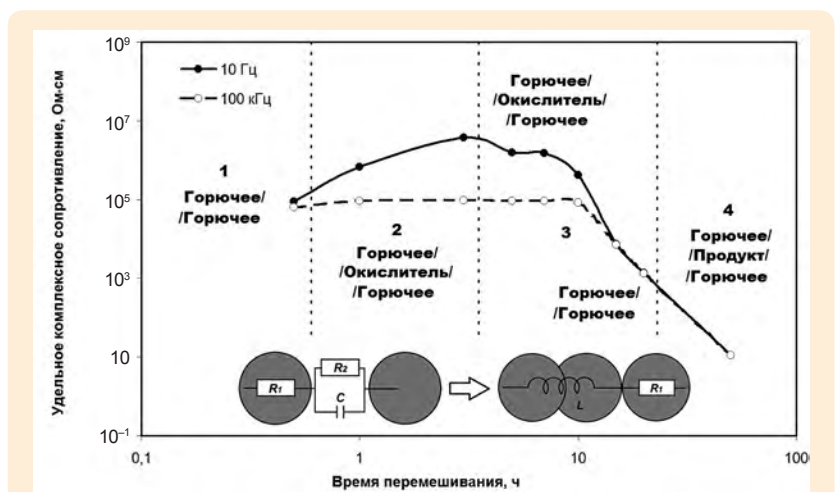
Для контроля качества новой электролитной массы разработан способ количественного определения галогенидов лития (хлоридов, фторидов и бромидов) в литиевом электролите при их совместном присутствии, а также в присутствии соединений алюминия. Трудность определения состоит в том, что указанные элементы являются представителями одной группы элементов – галогенидов – и характеризуются близкими химическими свойствами. Суть способа заключается в следующем: измельчают образец твердого электролита сначала до порошкообразного состояния; затем отобранные и измельченные пробы твердого литиевого электролита, в кото-

крупных и пластичных частиц металлического горючего. Обработка экспериментальных данных с использованием специально разработанной модели комплексной проводимости двухкомпонентных порошковых смесей позволила также определить время начала накопления высокопроводящих продуктов механохимических реакций, протекающих при перемешивании в результате воздействия шаров.

Полученные результаты иллюстрируют возможность использования импедансной спектроскопии для изучения процессов, протекающих при изготовлении высокоэнергетических порошковых композиций, а также оптимизации технологических режимов смешивания исходных компонентов в смесителях различных типов.

УСТРОЙСТВО АДАПТИВНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДАННЫХ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Расширение функциональных задач технических систем управления и контроля, связанное с изменением режимов функционирования, динамикой структуры и составом входящих компонентов, обуславливает необходимость создания распределенных программно-аппаратных комплексов, неотъемлемой составной частью которых являются каналы информационного взаимодействия. В связи с этим наряду с задачей надежного управления и контроля возникает задача защиты данных, циркулирующих в межкомпонентных интерфейсах. В отличие от существующих подходов к защите информации данная задача усложняется необходимостью подстройки характеристик средств защиты к параметрам каналов передачи данных.



Изменение комплексного сопротивления смеси «горючее – окислитель» при частоте тока 10 Гц и 100 кГц, а также характера проводящих контактов между частицами от времени перемешивания в шаровой мельнице:

- 1 – в неоднородной смеси сопротивление не зависит от частоты тока из-за наличия контактов между скоплениями проводящих частиц горючего (R_1), которые неравномерно покрыты непроводящими частицами окислителя (R_2);
- 2 – с увеличением однородности смеси поверхность горючего более равномерно покрывается окислителем, и при достижении максимальной однородности сопротивление «прослоек» окислителя между частицами горючего, определяемое разностью сопротивлений смеси при низких и высоких частотах тока, достигает максимума;
- 3 – сопротивление «прослоек» снижается из-за уменьшения их толщины и внедрения окислителя вглубь поверхности горючего, что приводит к появлению контактов между открытой поверхностью соседних частиц горючего;
- 4 – сопротивление смеси становится меньше сопротивления горючего из-за накопления продуктов механохимических реакций, что выражается в замене емкостного элемента (C) эквивалентной электрической схемы смеси, описывающей экспериментальные данные, на индуктивный элемент (L)

В конструкторских бюро РФЯЦ-ВНИИЭФ в рамках реализации ряда тематических направлений разработано устройство адаптивного преобразования данных в режиме реального времени. Устройство может быть встроено в любые каналы связи. Основными элементами устройства являются блок кодирования, вычислительное ядро и блок интерфейсов, блок криптопримитивов и конвейер, который позволяет выбирать требуемые алгоритмы криптографического преобразования и с минимально возможной задержкой преобразовывать поступающие данные и выдавать их в линию связи.

Устройство позволяет адаптироваться к любому существующему криптографическому алгоритму преобразования, дополнительно загружать криптографические модули, конфиденциальные параметры и ключи. Адаптивная структура устройства осуществляет мониторинг канала связи и подстраивает свои параметры для работы с ним. Существует режим автоматической работы.

Особенности разработанного устройства:

- гибкая конфигурация и возможность комплектации различными типовыми модулями в зависимости от решаемых задач;

– решение вопроса импортозамещения высокотехнологического оборудования и технологий, а также технологическая независимость и безопасность российских научной и технологической школ за счет использования конкурентоспособного отечественного оборудования;

– применение при проведении научных исследований в учебных центрах для подготовки научных и производственных кадров, ориентированных на использование отечественного оборудования.

Наряду с решением задач ряда тематических направлений по защите данных, циркулирующих в межкомпонентных интерфейсах технических систем, устройство может применяться для преобразования информации, обрабатываемой в рамках коллективного доступа к супервычислительным центрам.

Реализация данного устройства в каналах связи гетерогенных информационных структур с многоуровневым резервированием позволяет создавать защищенные телекоммуникационные платформы в рамках



реализации приоритетных направлений в области информационно-телекоммуникационных технологий.

На устройство получен патент РФ № 2704879. Патент удостоен золотой медали XXIII Московского международного Салона изобретений и инновационных технологий «Архимед». Решением комиссии

Федеральной службы по интеллектуальной собственности изобретение «Устройство адаптивного преобразования данных в режиме реального времени» включено в список «100 лучших изобретений России за 2019 и первое полугодие 2020 гг.».



Патент, диплом и золотая медаль XXIII Московского международного Салона изобретений и инновационных технологий «Архимед»

НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЦЕНТР ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ПЛОТНОСТЕЙ ЭНЕРГИИ (НПЦФ)

АППАРАТ ДЛЯ ТЕРАПИИ ОКСИДОМ АЗОТА «ТИАНОКС»

Разработанный в НПЦФ аппарат для ингаляционной терапии оксидом азота ТИАНОКС выведен на рынок. Аппарат предназначен для производства, мониторинга и подачи оксида азота в дыхательный контур пациента при проведении терапии. Синтез оксида азота осуществляется в импульсно-периодическом диффузном разряде из окружающего воздуха. В 2020 г. успешно пройдены клинические испытания аппарата и получено регистрационное удостоверение № РЗН 2020/10977 от 22.06.2020. В НПЦФ организовано серийное производство аппаратов и их сервисное обслуживание. Аппараты поставляются в ведущие медицинские центры России и применяются для лечения легочной гипертензии, вызванной различными патологиями, в том числе пневмонией, протекающей на фоне инфекции Covid-19. Основные потребители аппарата – блоки интенсивной терапии и отделения анестезиологии реанимации, начиная с уровня районных стационаров и выше, а также кардиоцентры, отделения неонатологии и перинатальные центры.



Аппарат ТИАНОКС в отделении неонатологии ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России, г. Санкт-Петербурга

В НПЦФ разработан и изготовлен источник питания со средней мощностью порядка 180 кВт.

В качестве источника первичного электропитания используется высоковольтный источник ВИП-303 совместно с системой накопления энергии SE-604-500КБ, представляющей собой автономный программно-аппаратный комплекс, который включает в себя накопитель энергии на основе литий-ионной аккумуляторной батареи номинальным напряжением 532 В, емкостью 50 А·ч

и защитно-коммутационную аппаратуру, работающую под управлением системы контроля заряда/разряда. Источник ВИП-303 заряжает емкостный накопитель формирователя высоковольтных импульсов. Энергия, запасенная в формирователе, через импульсный трансформатор коммутируется на входной узел электровакуумного прибора.

Основные параметры мощного источника питания электровакуумных приборов:

– выходное напряжение источника ВИП-303 – до 30 кВ;

АВТОНОМНЫЙ МОЩНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫХ ПРИБОРОВ

Одной из актуальных проблем в рамках работ по созданию мощных электровакуумных приборов является построение систем питания.



Структурная схема мощного источника питания для электровакуумных приборов

– амплитуда выходного импульса с формирующей линии – не менее 15 кВ;

– выходное напряжение импульсного трансформатора – до 270 кВ.

Источник питания обеспечивает импульсно-периодический режим работы электровакуумного прибора с длительностью импульса порядка 2,5 мкс и частотой следования импульсов до 200 Гц.

МОБИЛЬНЫЙ ЦИКЛИЧЕСКИЙ УСКОРИТЕЛЬ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ ИМПУЛЬСНОЙ РАДИОГРАФИИ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ

В НПЦФ продолжаются работы по созданию образца мобильного ускорителя нового поколения БИМ234-1500Ф, входящего в многолучевой комплекс для исследований быстропротекающих процессов при проведении газодинамических исследований. В состав ускорителя входят два модуля: ускорительный модуль и модуль системы импульсного питания электромагнита бетатрона. Размеры ускорительного модуля 6×2×3 м, масса около 5 т. Размеры модуля системы импульсного питания электромагнита бетатрона 5×2×2 м, масса около 3 т. В 2020 г. за-



Мощный источник питания для электровакуумных приборов

вершены сборочно-монтажные и пусконаладочные работы. Пробные включения показали следующие параметры:

– граничная энергия электронного пучка 12 МэВ при емкости накопителя системы импульсного питания электромагнита бетатрона 300 мкФ (максимальная емкость 2400 мкФ);

– ток электронного пучка, захваченного в ускорение и доведенного до мишени, 80 А.

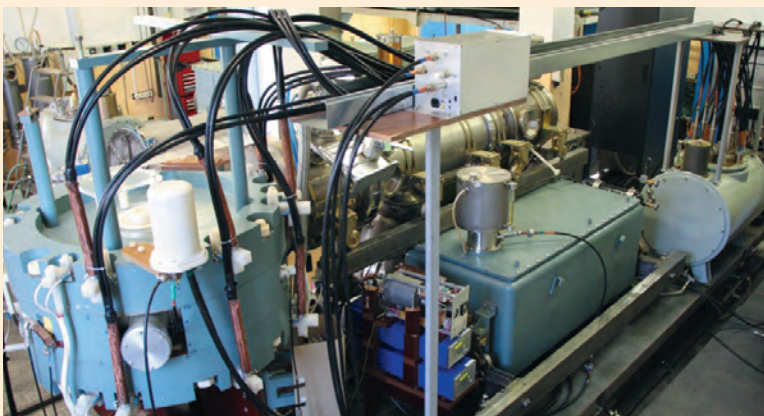
РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ СИЛЬНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ДЛЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В совместном научно-образовательном центре (НОЦ) НПЦФ РФЯЦ-ВНИИЭФ и СарФТИ НИЯУ «МИФИ» ведутся

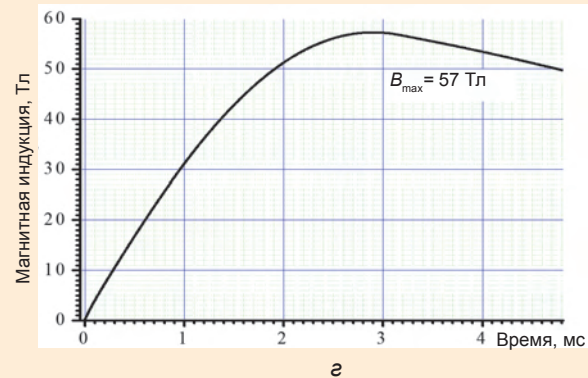
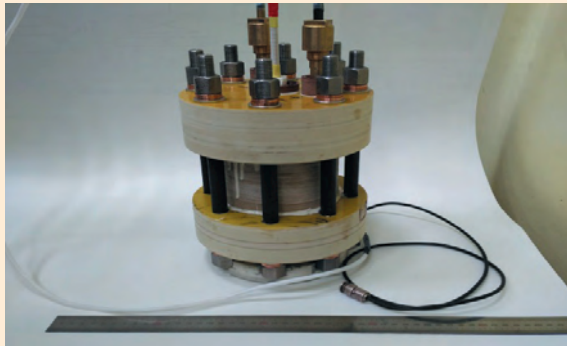
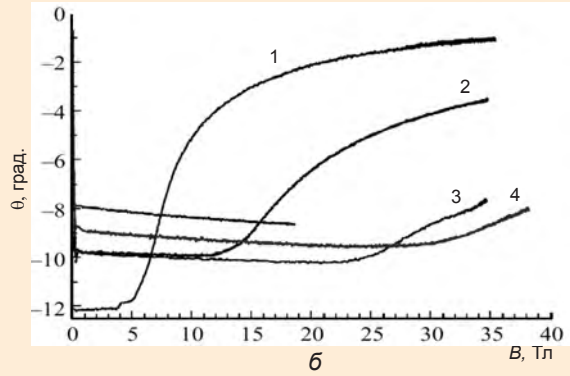
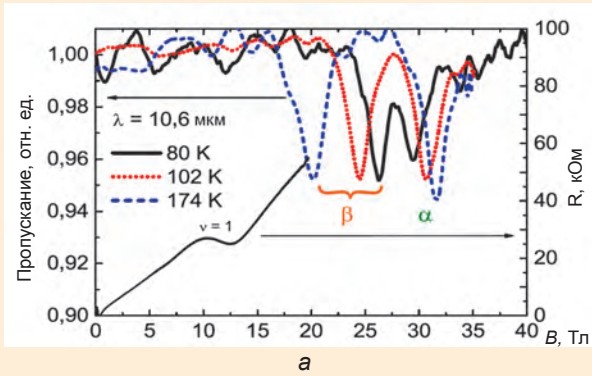
работы по созданию неразрушаемых соленоидов сильного магнитного поля и изучаются свойства новых магнитных и полупроводниковых материалов в сильных импульсных магнитных полях. Была создана компактная установка по генерации магнитных полей до 50 Тл. Эта установка успешно применяется для проведения совместных с российскими университетами и академическими научными организациями исследований магнитосопротивления и циклотронного резонанса в полупроводниковых гетероструктурах, фарадеевского вращения в магнитных пленках и т. д.

В усовершенствованной конструкции компактного соленоида было получено поле 57 Тл без разрушения соленоида. Таким образом, преодолен так называемый предел Капицы, составляющий 50 Тл. Усовершенствованный соленоид изготовлен полностью на основе новых материалов российского производства: микрокомпозитный проводник, парармидная нить и т. д.

В работах, проводимых в НОЦ, наряду со специалистами РФЯЦ-ВНИИЭФ активное участие принимают студенты и аспиранты СарФТИ НИЯУ «МИФИ».



Ускорительный модуль



Спектры магнитосопротивления и магнитопоглощения гетероструктур $\text{HgTe}/\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (а); зависимости угла поворота плоскости поляризации в пленке $(\text{Lu,Bi})_3(\text{Fe,Ga,Al})_5\text{O}_{12}$ от магнитной индукции (б), внешний вид соленоида новой конструкции (в); зависимость магнитной индукции от времени (г)

АВТОНОМНЫЙ ПОРТАТИВНЫЙ РАДИО- ЧАСТОТНЫЙ ГЕНЕРАТОР МИГ-К125 С ИМПУЛЬСНОЙ МОЩНОСТЬЮ МЕГАВАТТНОГО УРОВНЯ

В настоящее время в НПЦФ РФЯЦ-ВНИИЭФ интенсивно ведутся работы по созданию радиочастотных комплексов метрового диапазона длин волн на базе газоразрядных генераторов высокочастотных импульсов. Приборы данного типа являются уникальной разработкой ВНИИЭФ, не имеющей аналогов в России и за рубежом. Стержневым элементом такого генератора является газоразрядная камера, в которой инициируются импульсные сверхплотные газовые разряды низкого давления с полым катодом; возникающие при этом ВЧ-модуляции разрядного напряжения являются источником ВЧ-энергии. Одним из приоритетных направлений проводимых работ является реализация мобильных

Электротехнические характеристики генератора метрового диапазона длин волн МИГ-К125

Параметр	Значение
Напряжение питания, В	11,1
Частота максимума спектральной характеристики, МГц	125 ± 1
Максимальная мощность импульса, МВт	До 0,3
Длительность импульса, нс	200–300
Частота следования импульсов, Гц	100–1100
Время автономной работы от аккумулятора, мин	Не менее 300
Ресурс работы	10^7 импульсов
Максимальные габаритные размеры корпуса (длина×ширина×высота), мм	272×200×112
Масса корпуса без аккумуляторной батареи, кг	3,760



Внешний вид генератора метрового диапазона длин волн МИГ-К125

компактных комплексов, обладающих малыми массой и габаритами. Для проведения научных исследований создан и испытан малогабаритный, автономный генератор метрового диапазона длин волн МИГ-К125 с импульсной мощностью мегаваттного уровня.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ КОМПОЗИЦИОННЫЙ АНТИФРИКЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ

В технологическом отделении разработаны новый высокотемпературный антифрикционный материал на основе никеля и технология его изготовления методом порошковой металлургии.

Антифрикционные материалы, характеризующиеся высокими триботехническими свойствами, широко применяются в промышленном оборудовании, где имеются вращающиеся детали, работающие при высоких динамических нагрузках – силе трения (коэффициент трения порядка $\kappa \leq 0,3$), вращениях, вибрациях. Особенно востребованы антифрикционные материалы, обладающие повышенной работоспособностью при высоких температурных воздействиях и в радиационных зонах (турби-

ны АЭС, авиационное оборудование и космические аппараты).

Испытания опытных образцов разработанного материала в составе узлов реакторных и промышленных установок продемонстрировали, что он соответствует заявленным физико-механическим характеристикам (особенно следует отметить прочность и износостойкость) в условиях высокоинтенсивных воздействий сил трения качения, вращения и высоких температур (800–1000 °С).

Антифрикционный материал и способ его изготовления защищены патентами:

- патент РФ № 2672975 «Шихта для получения горячим прессованием высокотемпературного композиционного антифрикционного материала на никелевой основе» / Д. Н. Кондрохин, С. С. Курганов, А. И. Рачковский, Г. Ю. Сморгчов, В. С. Трушин. Выдан 21.11.2018;
- патент РФ № 2695854 «Способ изготовления высоко-

котемпературного композиционного антифрикционного материала» / Д. Н. Кондрохин, С. С. Курганов, А. И. Рачковский, Г. Ю. Сморгчов, В. С. Трушин. Выдан 29.07.2019.

В интересах заказчиков изготовлено более 10 партий деталей из разработанного антифрикционного материала разного типоразмера (подшипники, подшипниковые кольца и др.) общим количеством 3000 шт. Применение данного материала позволило в несколько раз увеличить ресурс узлов и агрегатов, входящих в состав различных промышленных установок.

В 2020 г. изготовлена партия деталей в количестве 125 шт., предполагается увеличение объема производства в 2020–2021 гг. (изготовление партии деталей в количестве более 4000 шт.).



Партия деталей в виде колец из высокотемпературного антифрикционного материала

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ (НИИС)

СОЗДАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА ОПТИКО- ЭЛЕКТРОННОГО КОМПЛЕКСА ВИДЕОРЕГИСТРАЦИИ

В 2020 г. завершается работа по созданию экспериментального образца опτικο-электронного комплекса видеорегистрации на базе беспилотного вертолета «Горизонт Эйр S-100». Комплекс предназначен для видеорегистрации объектов на расстоянии до 10 км, а также быстропротекающих на них процессов на расстоянии до 1,5 км в видимом, инфракрасном и ультрафиолетовом диапазонах волн.

Комплекс способен выполнять задачи как в сфере обороны государства, так и гражданского сектора экономики в течение 6 ч в диапазоне высот до 1200 м при максимальной дальности управляемого полета до 100 км.

Достоинства комплекса:

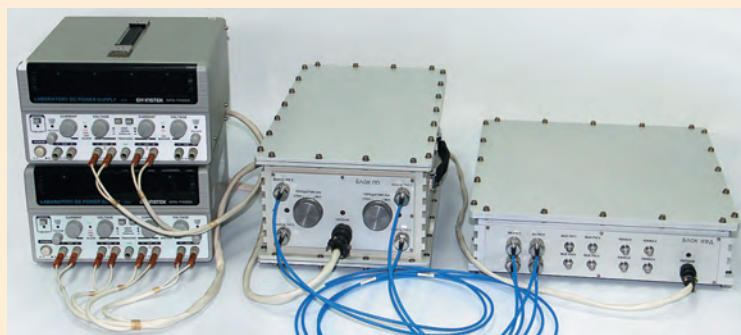
- работоспособность в любое время суток и любое время года;
- мобильность (транспортируется в 20-футовом контейнере, возможна транспортировка самолетами типа Ан-26);
- возможность размещения непосредственно в опасной зоне.

СОЗДАНИЕ РАДИОИНТЕР- ФЕРОМЕТРА-РАДИОМЕТРА МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

В 2020 г. завершается разработка средства измерений специального назначения – радиоинтерферометра-радиометра миллиметрового диапазона длин волн для измерения характеристик газодинамических систем. Прибор



Оптико-электронный комплекс во время работы



Внешний вид радиоинтерферометра-радиометра

позволяет одновременно измерять перемещение быстропротекающих газодинамических процессов в диапазоне от 10 до 100 мм с погрешностью $\pm 0,3$ мм и термодинамическую температуру объектов исследований в диапазоне от 500 до 5000 К с погрешностью ± 30 %. В приборе реализован двухчастотный режим работы: приемопередатчик имеет два когерентных канала двух- и трехмиллиметрового диапазонов длин волн.

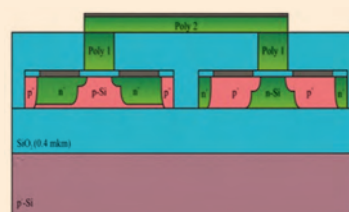
КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛО- ГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО СОЗДАНИЮ БАЗОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СПЕЦСТОЙКИХ СКОРОСТНЫХ МИКРОСХЕМ НА СТРУКТУРАХ «КРЕМНИЙ НА ИЗОЛЯТОРЕ»

Для повышения быстродействия, степени интеграции и уровня спецстойкости СБИС

разработана специализированная конструкция КМОП КНИ структуры и технология ее изготовления. Эта структура построена на так называемых бескраевых транзисторах с двойным поликремниевым затвором.

Основные преимущества бескраевых транзисторов:

- высокая степень интеграции (уменьшение площади топологии схем в 1,5–2 раза при сохранении токовых характеристик);



Поперечное сечение бескраевых МОП-транзисторов

- независимость спецстойкости от боковой изоляции;
- высокое быстродействие (за счет уменьшения паразитных емкостей в 250–350 раз);
- повышенная точность проектирования на полосковых транзисторах;
- повышенная надежность из-за отсутствия высоких электрических полей.

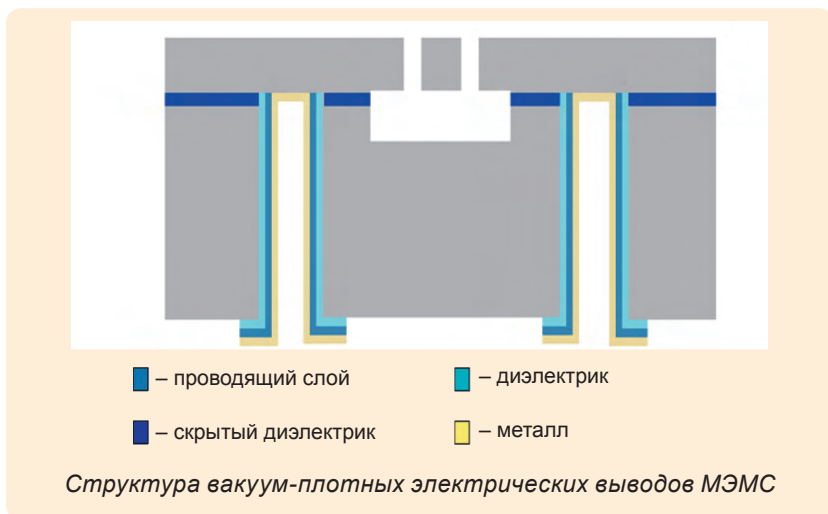
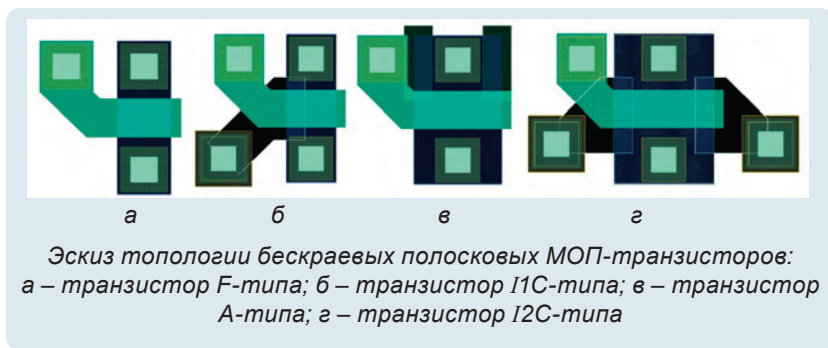
РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЭМС

В 2020 г. на участке изготовления изделий микросистемной техники изготовлены и поставлены заказчикам кристаллы с различными микроэлектромеханическими системами (МЭМС), включая чувствительные элементы датчика контроля уровня вакуума, микроакселерометра, микрогироскопа. Разработан блок технологических операций по формированию вакуум-плотных электрических выводов для высокоточных МЭМС, применяемых в перспективных приборах навигации.

Актуальность МЭМС продолжает расти. Это подтверждается их широким применением в различных существующих и перспективных устройствах промышленного и специального назначения – навигационной аппаратуре, системах безопасности, медицине, телемеханике, телеметрии и т. д.

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ LTCC ПЛАТ И СВЧ-МОДУЛЕЙ ИЗ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

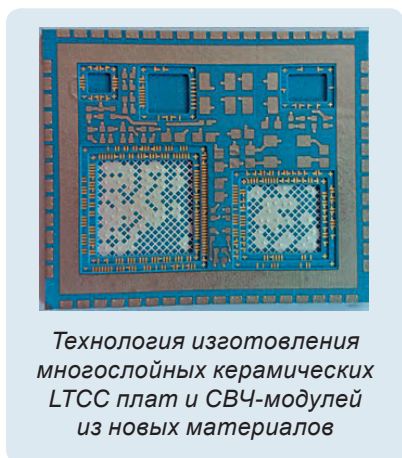
В настоящее время в НИИИС при изготовлении многослойных керамических LTCC плат применяются два материала: DuPont (производство США) и СКМ (производство



Россия). Для расширения возможности применения LTCC технологии при изготовлении многослойных керамических плат был исследован новый перспективный конструкционный керамический материал SK-47 ТУ 6365-001-05717914-2019 и проводниковые пасты ТУ 6365-002-05717914-2019 фирмы «Кеко».

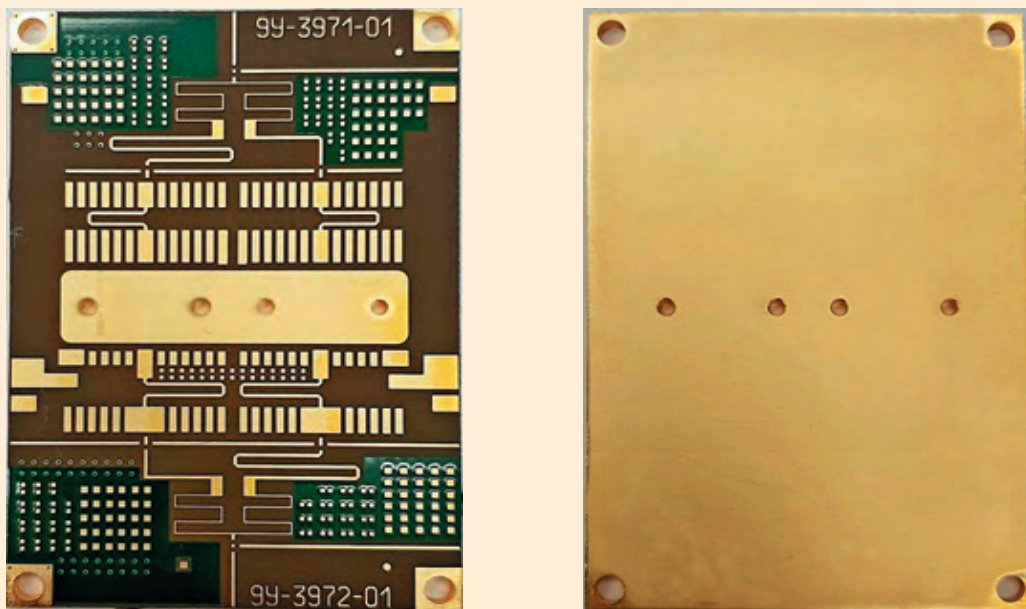
Проведены исследования режимов изготовления многослойных керамических LTCC

плат и СВЧ-модулей с применением новых материалов, изготовлены опытные образцы СВЧ-модулей и внедрен в производство комплект технологической документации изготовления многослойных керамических LTCC плат с применением новых материалов. Выявлено, что материалы фирмы «Кеко» обладают более стабильными свойствами при изготовлении керамических плат по сравнению с отечественным СКМ.



ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ И ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ НА МЕТАЛЛИЧЕСКОМ ОСНОВАНИИ

Проведены исследования режимов изготовления многослойных печатных плат с различными способами отвода тепла от теплонагруженных компонентов: отводом тепла от электронных компонентов,



Внешний вид многослойной печатной платы на металлическом основании

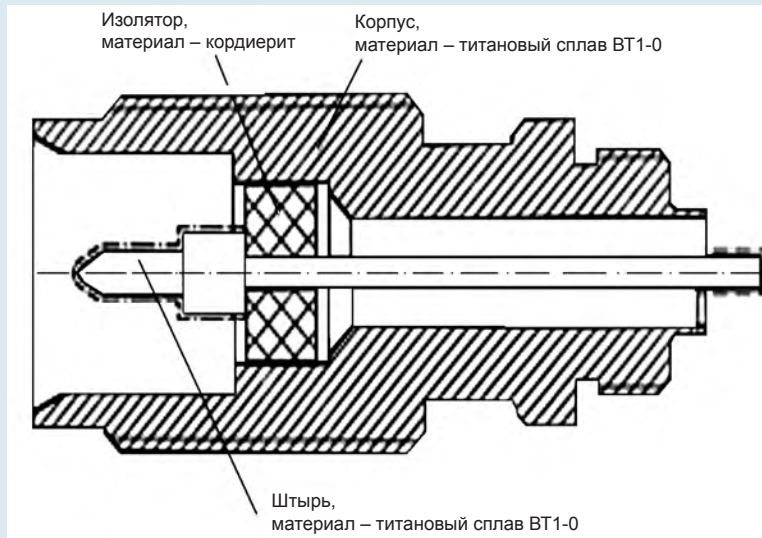
установленных на металлическое основание, через паз на плате; отводом тепла через глухие металлизированные отверстия. Изготовлены экспериментальные образцы, разработана и внедрена в производство технология изготовления многослойных печатных плат и электронных модулей на медном основании, в конструкции которых применены теплопроводящие и низкотекучие препреги для соединения металлического основания с платой. Платы с металлическим основанием позволяют снизить массогабаритные характеристики электронных модулей с мощными тепловыделяющими элементами, повышая при этом их стойкость к механическим воздействиям.

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗОЛЯТОРОВ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКОЙ ВИЛКИ ИЗ КЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА С НИЗКОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТЬЮ

Проведены исследования, разработана и внедрена

в производство технология изготовления металлокерамической вилки методом вакуумной пайки с использованием изоляторов из керамического материала «Кордиерит», диэлектрическая проницаемость которого $4,5 \pm 0,5$. Стабильность диэлектрической проницаемости керамического материала «Кордиерит» создает условия повторяемости

выходных электрических характеристик СВЧ-устройств. Применение разработанной технологии позволяет изготавливать соединитель с увеличенным волновым сопротивлением, пониженным коэффициентом затухания сигнала и КСВ, тем самым обеспечивая согласование в тракте «блок ВЧ – АФС» в диапазоне частот 10 ГГц и выше.



Эскиз металлокерамической вилки, изготовленной методом вакуумной пайки

2020