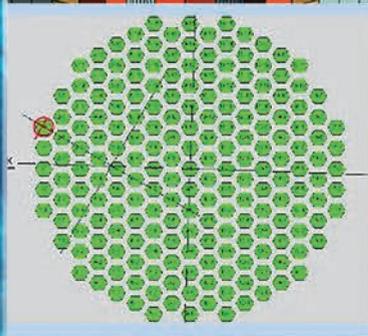
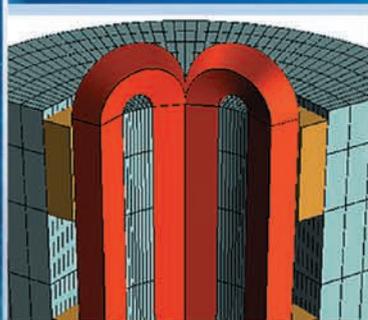
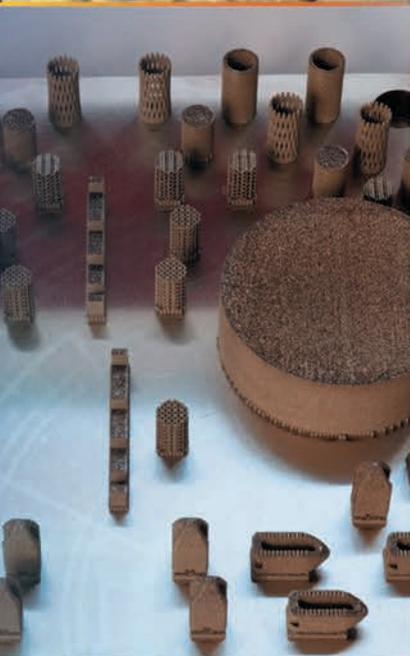


# ОСНОВНЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ

РФЯЦ-ВНИИЭФ

# 2021



САРОВ  
2022

# 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.

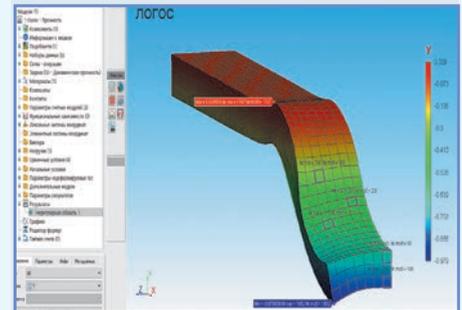
Заказать нашу продукцию можно:

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

## СОДЕРЖАНИЕ

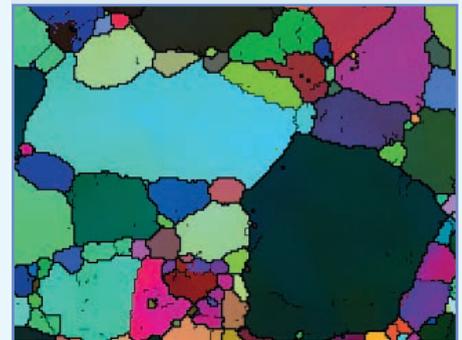
2

ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ  
И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ  
(ИТМФ)



15

ИНСТИТУТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ  
ГАЗОДИНАМИКИ И ФИЗИКИ ВЗРЫВА  
(ИФВ)

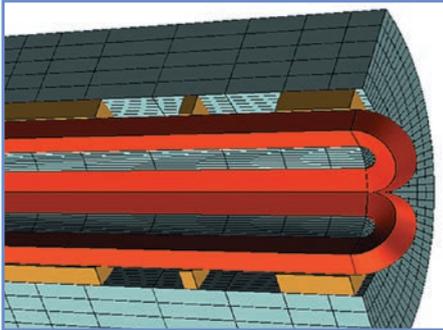


22

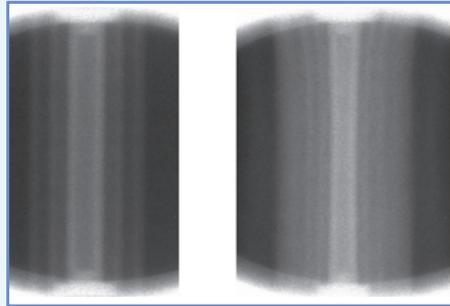
ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ (ИЛФИ)



**23** ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ  
И РАДИАЦИОННОЙ ФИЗИКИ (ИЯРФ)



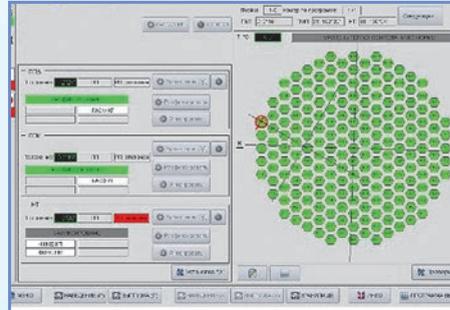
**30** НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ  
ЦЕНТР ФИЗИКИ ВЫСОКИХ  
ПЛОТНОСТЕЙ ЭНЕРГИИ (НПЦФ)



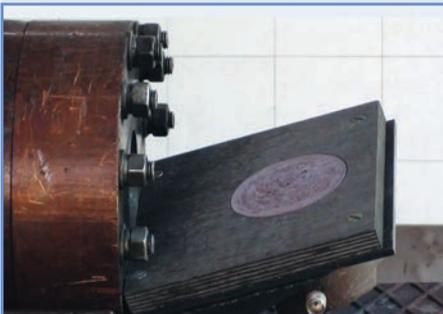
**25** ИНСТИТУТ ЦИФРОВЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ (ИЦТ)



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



**26** КОНСТРУКТОРСКИЕ  
БЮРО



**РЕДКОЛЛЕГИЯ ВЫПУСКА**

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

РЕДАКТОР *Н. Ю. Зимакова*

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

Подписано в печать 21.03.2022 г., Формат 60×84/8.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 4,3. Уч.-изд. л. ~ 4,6.  
Тираж 1000 экз. Зак. тип. 241-2022.  
Отпечатано в ИПЦ ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»  
607188, г. Саров Нижегородской обл.,  
ул. Силкина, д. 23

# ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ (ИТМФ)

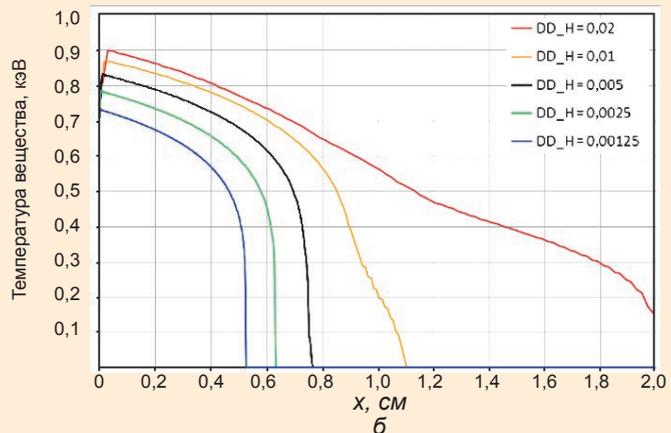
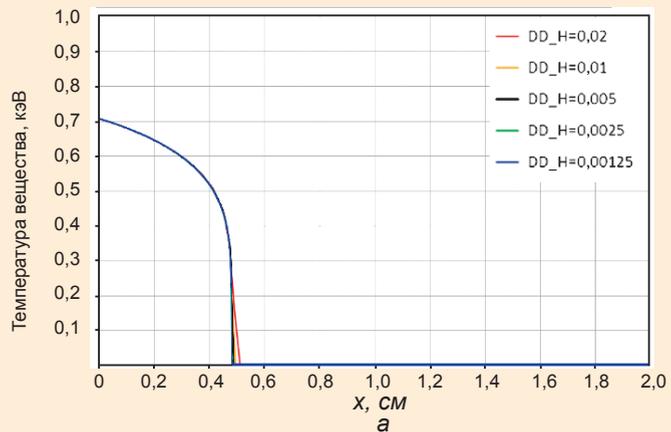
Как и в предыдущие годы, в числе основных направлений деятельности ИТМФ в 2021 г. оставались работы по созданию современной расчетно-теоретической базы моделирования сложных физических процессов, а также работы в области разработки, создания и совершенствования математических методик и программных комплексов для эффективного компьютерного моделирования широкого спектра прикладных задач в многомерной постановке на вычислительных системах нового поколения.

Также активно развивались технологии высокопроизводительных вычислений в интересах их внедрения в высокотехнологичные отрасли промышленности и осуществлялись работы по развитию осваиваемой продуктовой линейки.

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

В 2021 г. специалисты ИТМФ продолжали разработку новых и совершенствование существующих разностных схем типа  $DS_n$ , которые лежат в основе многих методик численного решения уравнения переноса частиц в многомерной постановке.

При решении задач переноса излучения в двумерной постановке на ортогональных пространственных сетках был обнаружен эффект ускоренного прогрева вещества, не соответствующий физике исследуемого процесса. Численные исследования на модельной задаче по распространению излучения в плоском слое из оптически плотного вещества



Профиль температуры вещества в расчетах по DD-схеме: а – с изотропным входящим потоком; б – с анизотропным входящим потоком

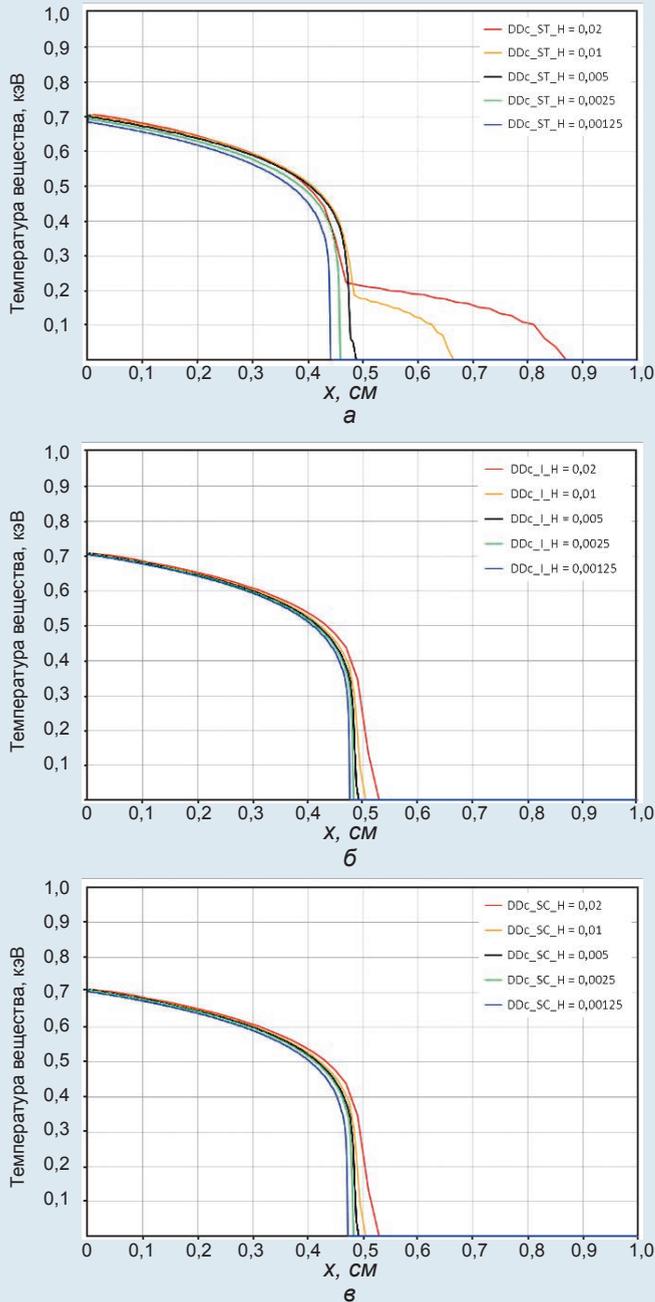
на сгущающихся равномерных пространственных сетках показали, что эффект нефизического прогрева вещества вызван сочетанием двух факторов: сильной анизотропии входящего потока излучения по направлениям полета частиц и особенностью разностных схем 2-го порядка точности, использующих дополнительные аппроксимационные соотношения (например, DD-схемы).

Для борьбы с обнаруженным счетным эффектом были предложены и опробованы три модификации расчетной схемы, направленные на «изотропизацию» выходящего потока излучения из первой приграничной ячейки для соответствующих направлений полета частиц:

- 1) ST-схема 1-го порядка точности (DDc\_ST-схема);
- 2) схема, получаемая в предельном случае при разбиении ячейки на бесконечное число подъячеек, решаемых по DD-схеме, и эквивалентная SC-схеме для стационарного уравнения (DDc\_I-схема);

3) схема, в которой для замыкания системы сеточных уравнений совместно с уравнением баланса использовалось дополнительное соотношение на основе SC-схемы (DDc\_SC).

Все модифицированные схемы используются только в первой приграничной ячейке и обеспечивают положительность решения; во всех остальных случаях применяется DD-схема.



Профиль температуры вещества в расчетах с анизотропным входящим потоком по схемам  $DDc\_ST$  (а),  $DDc\_I$  (б) и  $DDc\_SC$  (в)

Результаты численных исследований продемонстрировали, что переход на  $DDc\_ST$ -схему позволил уменьшить счетный эффект нефизичного прогрева вещества анизотропным потоком излучения; при использовании  $DDc\_I$ - и  $DDc\_SC$ -схем результаты расчетов на всей совокупности рассмотренных пространственных сеток очень близки между собой и физически корректному результату.

Таким образом, предложенные модифицированные схемы являются эффективным средством борьбы со счетным эффектом нефизичного прогрева вещества анизотропным потоком излучения.

В направлении развития методик расчетного моделирования процессов турбулентного перемешивания в 2021 г. было проведено расчетно-теорети-

ческое исследование взаимодействия ударной волны (УВ) с зоной турбулентного перемешивания (ЗТП) на плоской границе воздух – аргон в опыте на ударной трубе. В исследовании предполагалось, что ЗТП развивается на плоской в начальный момент времени контактной границе, разделяющей воздух и аргон.

Отметим, что в опытах Невмержицкого и др. (Невмержицкий Н. В., Разин А. Н., Сотсков Е. А. и др. Экспериментальное исследование взаимодействия ударных волн с контактной границей и зоной турбулентного перемешивания различных газов // Приклад. механика и техн. физика. 2017. Т. 58, № 2. С. 16–25) наблюдался эффект уширения и «расслоения» УВ при ее распространении после прохождения ЗТП.

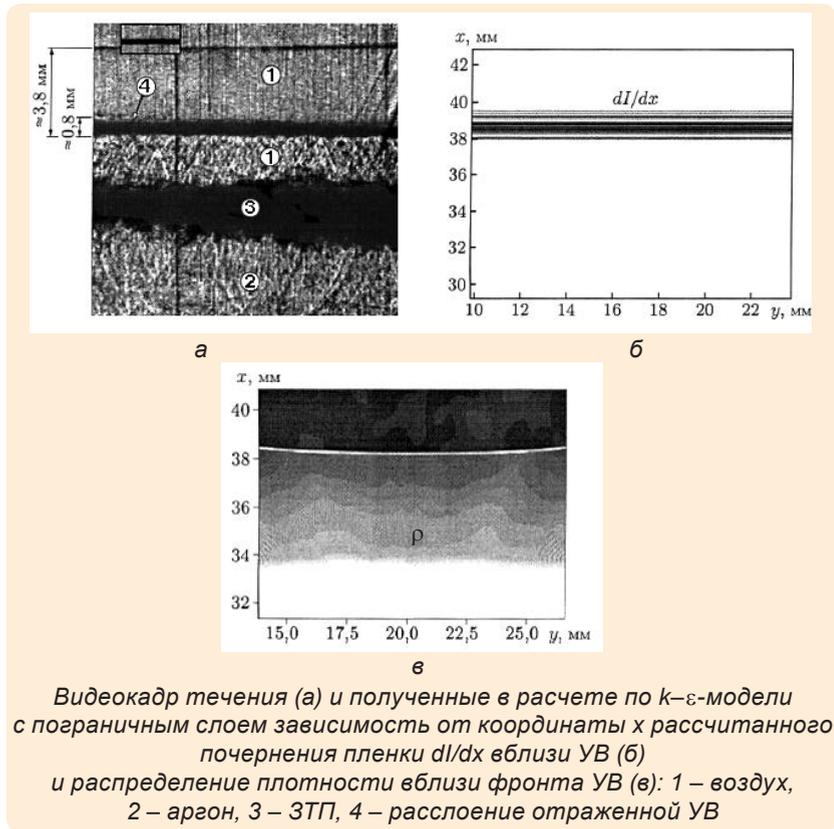
Однако численное моделирование, проведенное без учета пограничного слоя (как на основе прямого трехмерного численного моделирования, так и с использованием двумерной  $k-\varepsilon$ -модели турбулентности), не выявило уширения и расслоения ударной волны при распространении по невозмущенной среде после прохождения ЗТП, наблюдаемых в опытах Невмержицкого.

В то же время в двумерных расчетах с  $k-\varepsilon$ -моделью турбулентности с учетом пограничного слоя получены согласующиеся с наблюдаемыми в эксперименте результаты. Расчет градиента от интеграла показателя преломления по ширине канала позволил получить согласующуюся с опытом увеличенную ширину фронта УВ. Так называемое расслоение, отмеченное в статье Невмержицкого и др., представляется оптическим эффектом, связанным с искривлением плоскости УВ вследствие взаимодействия с пограничным слоем. Косвенным аргументом

в пользу такого объяснения служит то, что в опытах расслоение наблюдается только для отраженной ударной волны, которая проходит по уже имеющемуся пограничному слою, и не наблюдается для прямой волны, перед которой пограничного слоя нет.

Таким образом, на основе численных расчетов дано объяснение экспериментально наблюдаемого эффекта уширения и расслоения УВ после прохождения ЗТП.

В 2021 г. было выполнено расчетно-теоретическое исследование по развитию неустойчивости Рихтмайера – Мешкова с использованием неявного метода крупных вихрей (ILES) по методике МИМОЗА (комплекс МИД). При моделировании рассматривалось развитие турбулентного перемешивания на контактных границах трехслойных газовых систем после прохождения ударной волны. После прохождения УВ через шероховатую контактную границу (КГ) разноплотных веществ на ней развивается неустойчивость Рихтмайера – Мешкова, а на наклонной границе – и неустойчивость Кельвина – Гельмгольца. В результате роста шероховатости тяжелое вещество проникает в легкое в виде струй, а легкое в тяжелое – в виде пузырей. С течением времени струи разрушаются и в окрестности контактной границы образуется область, в которой контактирующие вещества перемешаны либо на молекулярном, либо на гетерогенном уровне. Подобные задачи часто возникают в физике высоких плотностей энергии, в частности в задачах по управляемому термоядерному синтезу. Если движение слоистых систем происходит под действием ударных волн, то в исследуемой области поле течения может иметь довольно сложную структуру, а характеристики исследуемого



Видеокадр течения (а) и полученные в расчете по  $k$ - $\varepsilon$ -модели с пограничным слоем зависимость от координаты  $x$  рассчитанного почернения пленки  $dI/dx$  вблизи УВ (б) и распределение плотности вблизи фронта УВ (в): 1 – воздух, 2 – аргон, 3 – ЗТП, 4 – расслоение отраженной УВ

течения зависят от процесса турбулентного перемешивания.

В исследовании численно изучалось влияние начальной шероховатости КГ на структуру газодинамического течения, возникающего в трехслойных газовых системах после прохождения ударной волны. Моделирование проводилось с опорой на эксперименты со слойками воздух –  $SF_6$  – воздух и воздух –  $He$  – воздух, которые ранее были выполнены в одном из научных центров Великобритании (Holder D., Barton C. Shock-tube Richtmyer-Meshkov experiments: inverse chevron and half height // Proc. of the 9<sup>th</sup> int. Workshop on the Physics of Compressible Turbulent Mixing. – UK: University of Cambridge, 2004).

В трубе устанавливались две мембраны – контактные границы

КГ1 и КГ2, которые поддерживались тонкими проволочными сетками. Между мембранами закачивался тяжелый газ ( $SF_6$ ), а слева и справа от мембран – воздух. До начала опытов все газы находились под давлением 1 бар. На левом конце трубы формировалась УВ с числом Маха  $M = 1,26$ , которая двигалась по трехслойной газовой системе в сторону правого торца трубы, отражалась от торца и взаимодействовала с контактными границами, вследствие чего на КГ развивалась неустойчивость Рихтмайера – Мешкова (на наклонных КГ присутствовала и неустойчивость Кельвина – Гельмгольца) с последующим переходом в турбулентное перемешивание. На стенках и правом торце трубы ставились граничные условия «жесткая стенка».

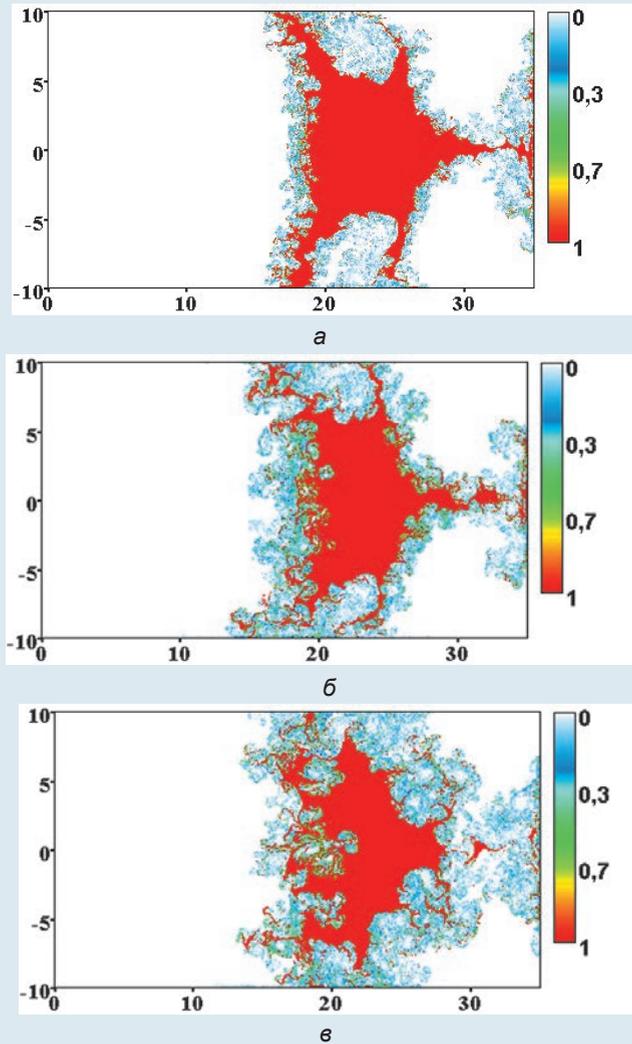


Математическое моделирование лабораторных опытов выполнялось в двумерной постановке по методике МИМОЗА с использованием уравнений Эйлера без привлечения каких-либо моделей учета турбулентного перемешивания (ILES моделирование). Для изучения влияния начальной шероховатости КГ на развитие неустойчивости и турбулентного перемешивания проводились три серии расчетов, отличающихся начальной шероховатостью КГ и подробностью разностной сетки по пространству. Расчеты проводились на сетках с квадратными ячейками со сторонами  $h = 1/16$  см,  $1/32$  см,  $1/64$  см.

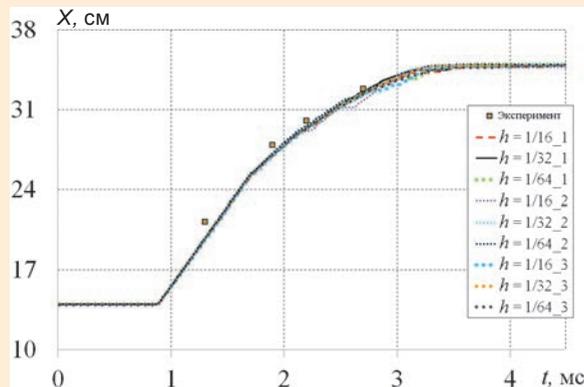
В первой серии расчетов для слойки воздух –  $SF_6$  – воздух контактные границы не возмущались. Неустойчивость на контактных границах развивалась вследствие несовпадения направлений граней ячеек сетки с направлениями КГ. Во второй серии на КГ задавались одномодовые синусоидальные возмущения, в третьей серии – двухмодовые. Шероховатость КГ формировалась путем возмущения концентраций газов в ячейках, через которые проходит синусоида. В таких ячейках объемные концентрации рассчитывались в соответствии с долями площадей ячейки, на которые синусоида (кривая) делит данную ячейку.

Сравнивая  $X-t$  диаграммы движения вершины струи в расчетах и опыте (см. рисунки), можно отметить удовлетворительное согласие результатов расчетов и экспериментов.

В расчетно-теоретическом исследовании установлено, что при использовании ILES стратегии моделирования масса перемешанных газов и энтропия заметно зависят от начальной шероховатости границ и размера счетной ячейки разностной сетки. Следует отметить, что  $X-t$  диаграмма вершины струи и форма центральной области



Поле концентрации  $SF_6$  в расчетах 1-й (а), 2-й (б) и 3-й (в) серий экспериментов,  $t = 4,4$  мс,  $h = 1/64$  см



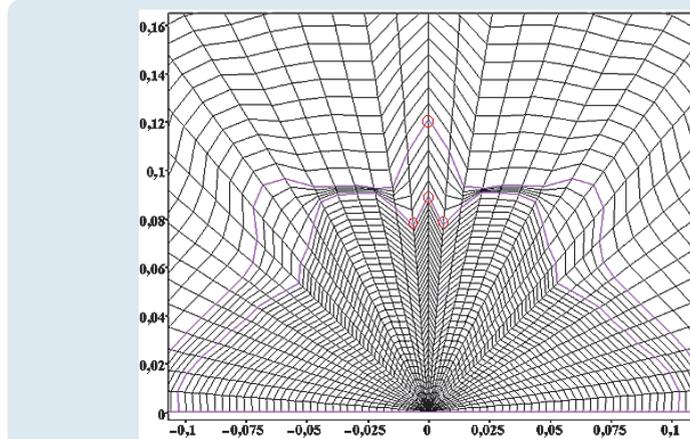
$X-t$  диаграмма вершины струи в расчете и эксперименте:  $h$  – линейный размер стороны ячейки сетки (в см), конечная цифра – номер серии расчета

удовлетворительно согласуются с опытными данными, полученными в Великобритании.

В 2021 г. продолжались работы по внедрению новых подходов для оптимизации расчетных исследований, в том числе

с использованием технологий искусственного интеллекта и машинного обучения. Например, сегодня средствами технологии машинного обучения решается проблема коррекции движения сферической разностной сетки в процессе счета по лагранжево-эйлеровой методике МИМОЗА. Данная проблема в значительной степени влияет на сроки проведения расчета, поскольку возникают потери времени на вынужденное ручное вмешательство расчетчика в счет задачи для исправления дефектных зон пространственной сетки в ходе возникшего аварийного останова. Преимуществом системы коррекции узлов на основе искусственных нейронных сетей (ИНС) перед традиционными алгоритмами с многочисленными логическими ветвлениями, условными переходами и недостаточно обоснованным определением пороговых критериев является простота механизма принятия решения, когда фактически изначальная проблема становится близка к проблеме распознавания образов (сбор обучающих данных, обучение ИНС).

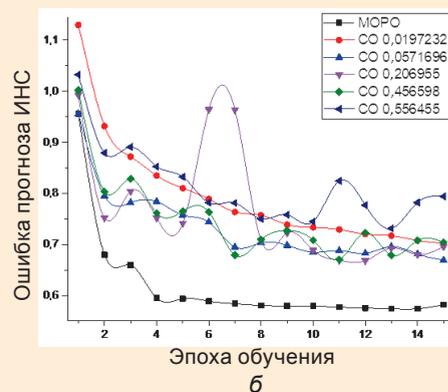
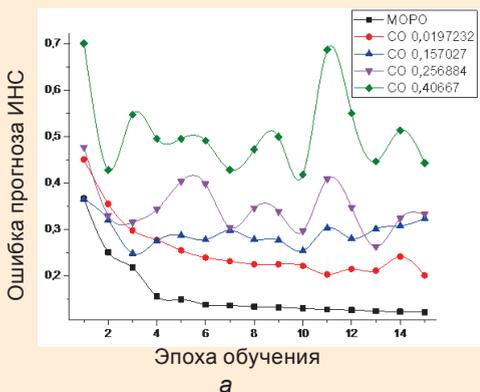
Проведена существенная работа по реализации и апробации различных архитектур ИНС. Определен шаблон-набор входных данных для обучения всех ИНС, участвующих



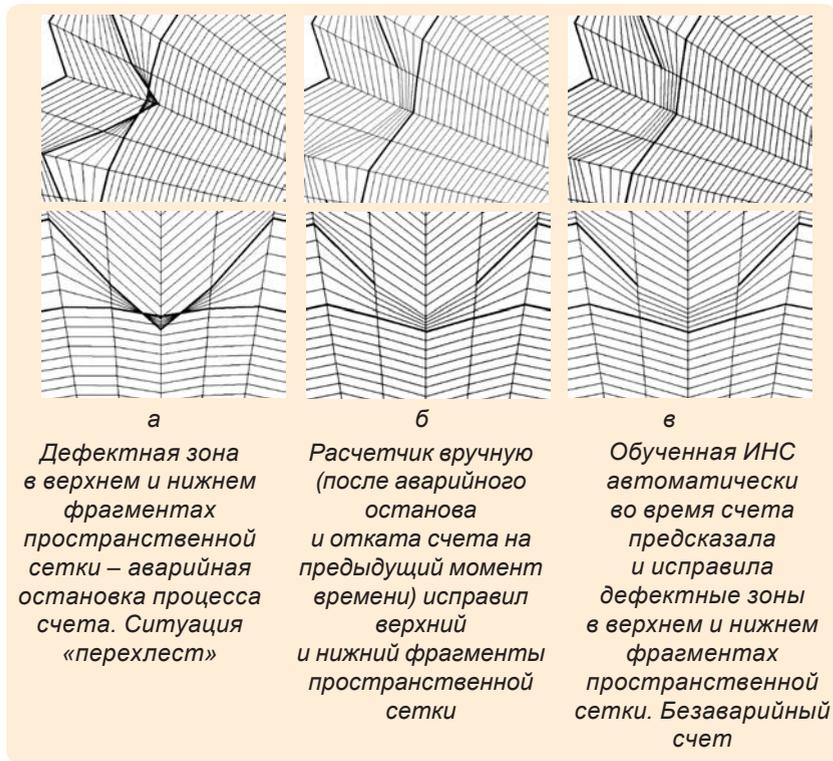
Пример деформации линий пространственной сетки. Окружности – дефектные точки, которые могут привести к аварийной остановке процесса счета

в коррекции узлов пространственной сетки – коррекция граничных точек, внутренних узлов и узлов «лагранжевых» линий (запрет на перетекание массы через линии пространственной сетки). Реализованы различные алгоритмы ускорения обучения ИНС, в том числе и многосетевой алгоритм обучения МОРО собственной разработки, основанный на программном интерфейсе MPI и методе оптимизации «рой частиц». Метод МОРО позволил в разы ускорить процесс поиска минимума на поверхности функции ошибки и избавил от ряда проблем обучения ИНС: попадание в локальные минимумы, эмпирический подбор оптимального коэффициента ско-

рости обучения (шаг коррекции весовых коэффициентов ИНС), длительность процесса обучения, «паралич» весовых связей ИНС (экстремальные значения некоторых весовых коэффициентов). Для демонстрации эффективности применения метода МОРО как алгоритма обучения ИНС на рисунке показаны результаты обучения ИНС по стандартному алгоритму обучения – «обратное распространение ошибки» (ОРО) с различными коэффициентами скорости обучения (для наглядности приведены графики с наименьшей ошибкой) – и результаты обучения ИНС по методу МОРО для задачи распознавания визуальных образов библиотеки MNIST.



Сравнение графиков функции ошибки прогноза ИНС при обучении ИНС по методу МОРО и обучении множества ИНС с различными коэффициентами скорости обучения (CO) по стандартному алгоритму обучения ОРО на данных задачи распознавания рукописных цифр (а) и предметов одежды (б) пакета визуальных образов библиотеки MNIST



В итоге для двумерных сферических разностных сеток выбран шаблонный набор индикаторов, служащих входными данными для ИНС. Разработана методика формирования и расширения базы обучающей выборки для обучения ИНС. Для сеток описанного типа сконфигурированы и обучены ИНС различной топологии, по-

зволяющие с высокой вероятностью предупреждать и устранять дефектные узлы, которые могут создавать потенциально опасные области разностной сетки и приводить к преждевременной остановке процесса счета задачи. При этом результаты расчетов, выполненных с использованием ИНС, хорошо согласуются с результатами

расчетов, выполненных специалистами. Имеет место и сокращение числа временных шагов до 25 %, что является следствием увеличения шага по времени.

Описанная технология позволила сократить календарное время счета (устранение аварийных остановок) и нивелировать влияние человеческого фактора (стратегия счета расчетчика) на результаты расчетов для установленного класса задач. На сегодняшний день ведутся работы по расширению списка установленного класса задач путем увеличения уже существующей обучающей выборки.

В интересах повышения эффективности вычислений на супер-ЭВМ и сокращения времени расчетов задач газовой динамики в 2021 г. в производственную эксплуатацию была введена версия библиотеки УРС-ОФ (Уравнения Состояния Общего Фонда) для вычисления теплофизических свойств веществ, ориентированная на параллельные вычисления с использованием автовекторизации и стандарта OpenMP. Библиотека включает: специально разработанные обменные

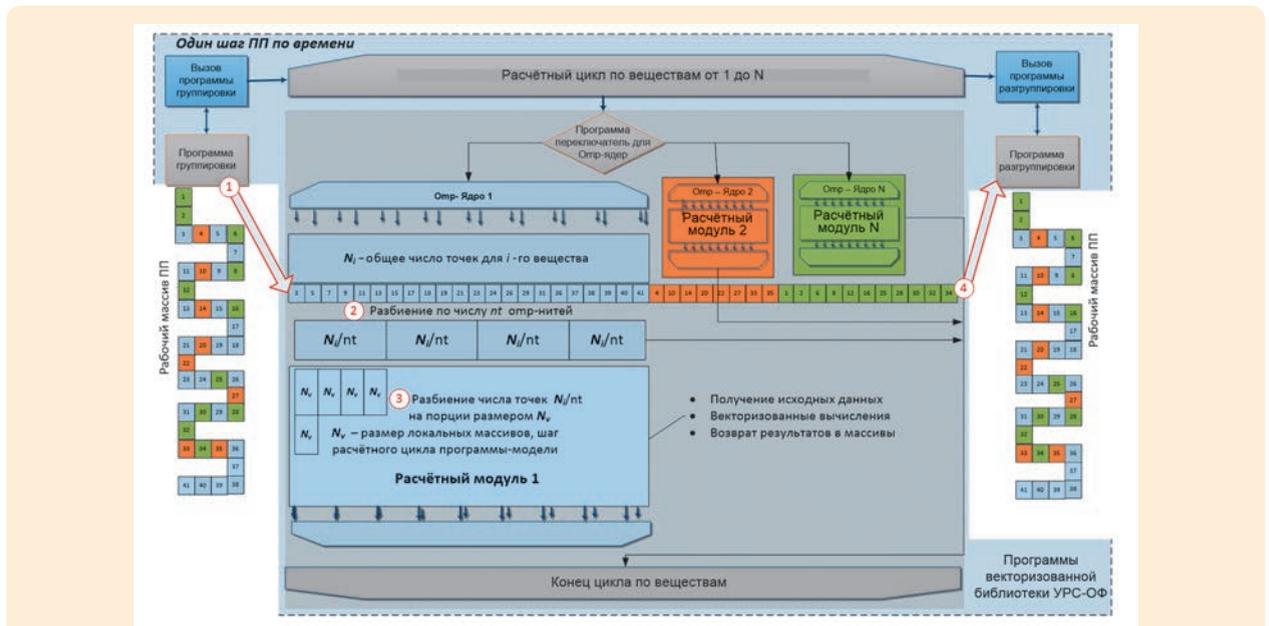


Схема организации вычислений в векторизованной версии библиотеки УРС-ОФ

структуры, содержащие адреса массивов исходных данных и результатов, размещенных в прикладной программе; программы, организующие распределение вычислений по отрядам; набор векторизованных расчетных модулей, реализующих компьютерные модели.

По результатам тестирования при расчете на вычислителе с шириной векторного регистра, равной четырем числам двойной точности, получено сокращение времени счета от 2,8 до 4 раз. При расчете на вычислителе с шириной векторного регистра, равной восьми числам двойной точности, получено сокращение времени от 4 до 7 раз по сравнению с не векторизованной версией в зависимости от сложности компьютерных моделей. То есть в настоящий момент новая версия библиотеки УРС-ОФ обеспечивает эффективность распараллеливания более 70 %.

### РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ И СУПЕРКОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ, ИХ ПРОМЫШЛЕННОЕ ВНЕДРЕНИЕ

Важной составляющей технологий суперкомпьютерного моделирования является развитие отечественного прикладного программного обеспечения. В связи с этим в 2021 г. в ИТМФ продолжалась работа по дальнейшему расширению функциональных возможностей пакетов программ, разрабатываемых в рамках продуктовой линейки ИТМФ, и расширению классов прикладных задач, решаемых с использованием развиваемых пакетов программ в интересах предприятий высокотехнологичных отраслей промышленности и ВПК.

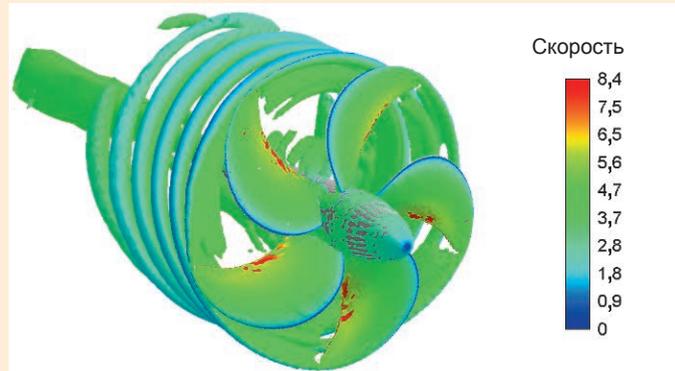
Так, для развития аэрогидродинамического модуля

пакета программ инженерного анализа и суперкомпьютерного моделирования ЛОГОС (ПП ЛОГОС) сделан шаг к расширению возможности использования этого модуля при решении новых классов задач судостроения. Для моделирования комплексных задач судостроения по расчету характеристик надводных объектов с учетом различных режимов эксплуатации и ветроволновых нагрузок требуется проведение расчетов динамики движения одиночного судна и связанной группы судов на поверхности раздела вода – воздух. Решение подобных задач требует применения современных физико-математических моделей и численных алгоритмов, специализированных сеточных генераторов, а также современных средств распараллеливания и постобработки. В мировой практике

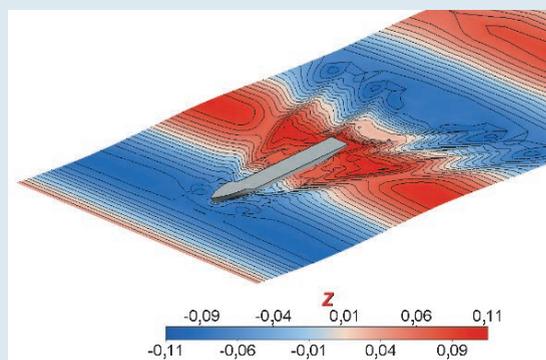
существуют решения подобного уровня, широко применяемые на практике.

Аэрогидродинамический модуль ПП ЛОГОС позволяет проводить численные расчеты следующих основных классов задач судостроительной промышленности:

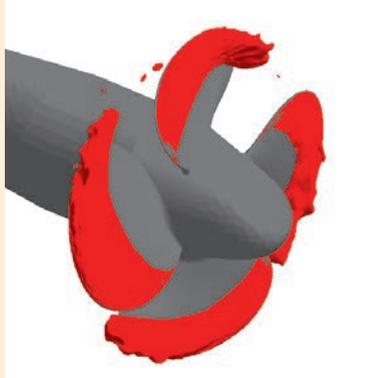
- моделирование внешнего обтекания тел;
- моделирование вращения винтов и движителей;
- моделирования течений со свободной поверхностью и их воздействие на объекты морской техники;
- моделирование процессов кавитации;
- моделирование движения моделей судов с учетом вращения движителей;
- моделирование движения одиночного объекта и связанной группы объектов вблизи поверхности водной среды с учетом ветроволновых нагрузок.



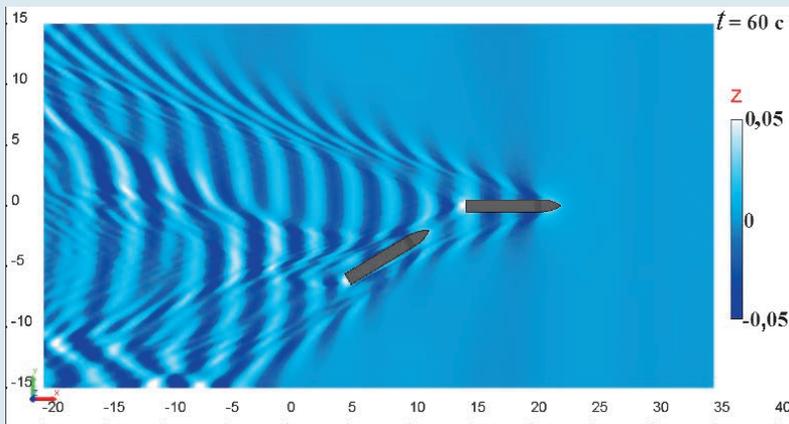
Моделирование вращения гребного винта с учетом ламинарно-турбулентного перехода



Моделирование качки судна на встречном волнении



Моделирование работы гребного винта в условиях кавитации



Моделирование движения модели корпуса судна в сцепке за моделью судна

Решение задач из указанных классов основано на заложенном в данном модуле ПП ЛОГОС численном решении трехмерных уравнений Навье – Стокса, где ядром численного алгоритма является итеративный SIMPLE-подобный метод с конечно-объемной дискретизацией уравнений. Учет движения твердых тел осуществляется путем использования заложенной в ПП ЛОГОС технологии деформирующихся и перекрывающихся сеток, а также динамической сшивки сеток на скользящих интерфейсах. Эти методы дополнены и адаптированы для внедрения в технологический цикл проектирования объектов морской техники виртуальной лаборатории по проведению автоматизированного численного моделирования в области теории корабля.

Достигнутые в 2021 г. результаты показали, что в настоящий момент аэрогидродинамический модуль ПП ЛОГОС позволяет с достаточной точностью прогнозировать динамику процессов, характерных для корабельной гидродинамики.

Значительное развитие в 2021 г. получил также модуль прочности ПП ЛОГОС.

Так, в интересах решения динамических задач прочности в ПП ЛОГОС произошло расширение библиотеки операторов сглаживания для устранения деформаций типа «песочные часы»; введены новые модели материалов (модифицированная модель Джонсона – Кука, модель мягких грунтовых сред Григоряна, модель бетона Уинфрита, модель композитного материала с прогрессирующим разрушением и учетом влияния скорости деформации).

В интересах решения квазистатических задач деформирования конструкций в 2021 г. выполнено: развитие контактных алгоритмов; введение моделей гиперупругого деформирования Нео – Гука и Муни – Ривлина; развитие модели неявной ползучести за счет учета температурного вклада в расчет скорости деформации ползучести; реализация элемента гибкой связи для моделирования канатов/швартовочных соединений; реализация объемного шестигранного слоистого конечного элемента для моделирования слоистых композиционных материалов. В интересах развития модели термопластичности Ю. Г. Коротких и моделирования ресурса проведена модификация базовых соотношений деформирования и накопления усталостных повреждений при различных режимах мало- и многоциклового нагружения.

Наконец, в области решения задач вибрационного анализа конструкций основными достижениями прошедшего года являются: появление возможности проведения модального анализа для конструкций с учетом циклической симметрии; добавление элементов роторной динамики как во вращающейся системе координат, так и в инерциальной; разработка модуля для проведения спектрального анализа конструкций.

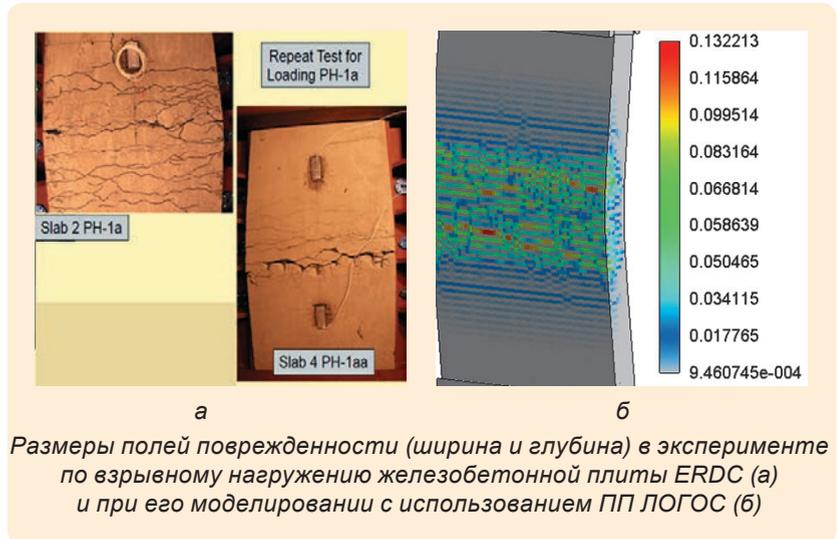
Кроме того, для расширения возможностей внедрения ПП ЛОГОС в атомную энергетику в модуле прочности был разработан верификационный базис для решения задач моделирования импульсного воздействия на железобетонные конструкции, включающий как тестовые задачи, так и задачи с экспериментальными данными, в том числе задачи:

- растяжения бетонной плиты;
- сжатия цилиндрического образца бетона;

- ударного нагружения железобетонной плиты SUGANO;
- четырехточечного изгиба железобетонной балки Леонарда;
- четырехточечного изгиба преднапряженной бетонной балки с натяжением арматуры на упоры;
- испытания падающим грузом преднапряженной бетонной балки с натяжением армоканата на бетон;
- преднапряженной защитной оболочки под внутренним давлением;
- взрывного нагружения железобетонной плиты ERDC.

Комплексные работы по развитию аэрогидродинамического модуля и модуля прочности ПП ЛОГОС в интересах судостроения в 2021 г. заложили возможность дальнейшего развития специализированных версий ПП ЛОГОС, ориентированных на разработку и внедрение технологий суперкомпьютерных двойников при проектировании отдельных элементов, процессов и систем новых судов. Это обеспечит:

- дальнейшее совершенствование ядерных энергетических установок;
- улучшение гидродинамических характеристик на основе суперкомпьютерной оптимизации облика корабля;
- расчет характеристик движителей;



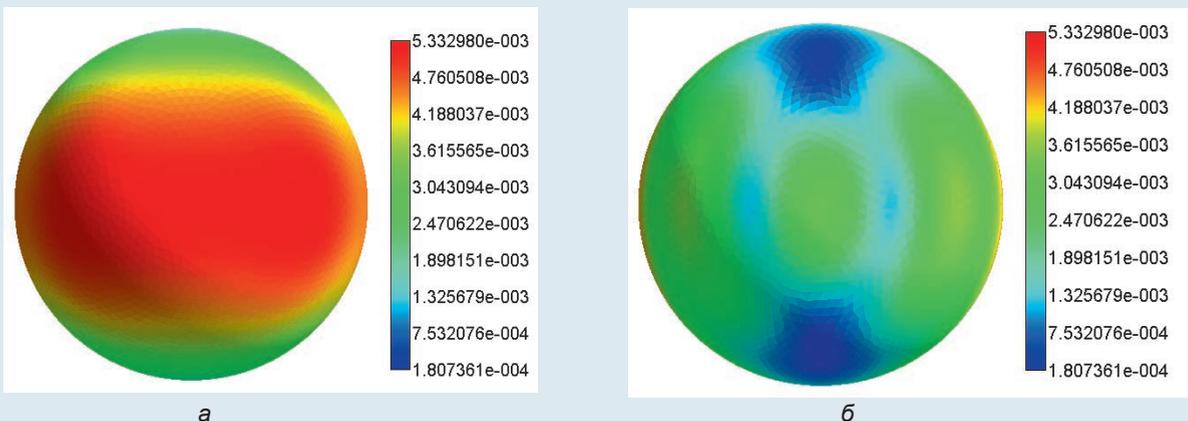
Размеры полей поврежденности (ширина и глубина) в эксперименте по взрывному нагружению железобетонной плиты ERDC (а) и при его моделировании с использованием ПП ЛОГОС (б)

- расчет теплового состояния при пожарах и микроклимат;
- обоснование повышения ресурса оборудования, подверженного циклическим нагрузкам;
- учет кавитации при проведении расчетов;
- расчет прочности элементов конструкции при внешних воздействиях;
- совершенствование общекорабельных систем гидравлики и сжатого воздуха;
- оптимизацию конструктивных элементов;
- развитие модулей систем вооружений (пусковые установки).

Согласно утвержденному техническому заданию (ТЗ) в математическом отделении ИТМФ до 2023 г. в интересах

улучшения работы антенно-фидерных устройств (АФУ) должны быть созданы базовые версии пакета программ ЛОГОС-ЭМИ для расчета эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) электромагнитного излучения объектами различной геометрической формы. В 2021 г. в рамках ТЗ выполнен первый этап работ по созданию программного модуля ЛОГОС-ЭМИ расчета воздействия и распространения электромагнитного излучения. На данном этапе:

- созданы базовые версии программ, реализующих метод моментов с одноуровневым мультипольным приближением и метод конечных элементов для решения задач ЭПР на идеально проводящих объек-



Распределение поверхностных токов (в амперах) на заданной сфере ( $r = 0,6$  м) на частоте 300 МГц при облучении плотной электромагнитной волной: а – вид с освещенной стороны; б – вид с теневой стороны

тах в частотном представлении;

- разработан верификационный базис для верификации программных средств расчета ЭПР;

- реализован базовый функционал для задания параметров расчета с использованием графического интерфейса препроцессора ЛОГОС;

- расширен функционал постпроцессора ЛОГОС для возможности обработки и визуализации результатов расчета задач взаимодействия и распространения электромагнитного излучения ЛОГОС-ЭМИ.

В 2021 г., в рамках проекта «Создание цифрового продукта ЛОГОС» продолжалось развитие единой системы препостпроцессинга для продукта ЛОГОС-Прочность на базе ЛОГОС-Препост:

- постобработка расширена набором алгоритмов «изоповерхность», «сечение плоскостью», «фигура», «история», «профиль»;

- обеспечена калькуляция сеточных величин, поиск экстремумов и интегралов;

- поддержаны отбор сеточных элементов и отображение экстремальных значений отображаемых полей;

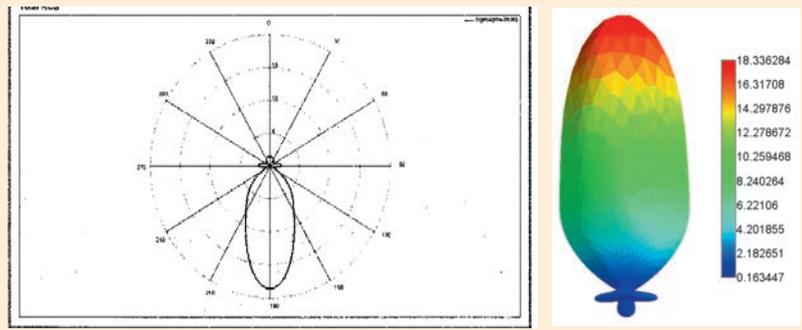
- реализована возможность интерактивной обработки прямоугольных объектов.

В 2021 г. в ЛОГОС-Препост осуществлялось развитие алгоритмов обработки данных, заданных на регулярных сетках с дробными ячейками:

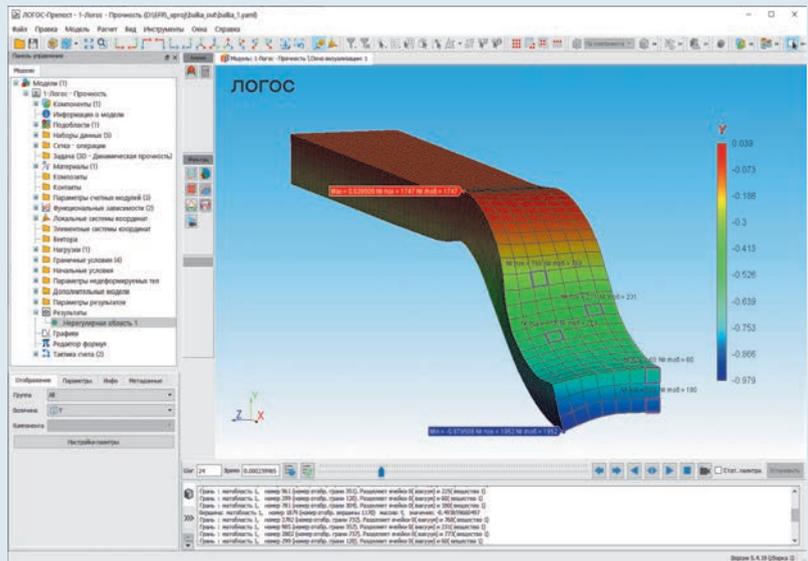
- реализовано отображение сеток с заданным уровнем дробления;

- алгоритмы фильтрации «интервал» и «регулярная под-область» модернизированы для учета дробных ячеек;

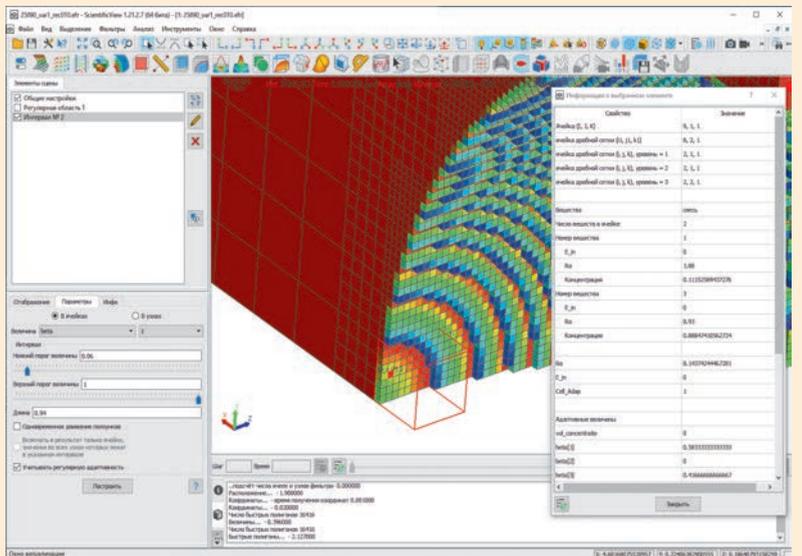
- реализованы алгоритмы интерактивного выбора и получения информации о значениях величин в дробных ячейках и узлах сетки.



*Зависимость ЭПР от угла наблюдения (вывод графических результатов в декартовой или полярной системе координат)*



*Интерфейс и некоторые новые возможности постобработки результатов моделирования в ЛОГОС-Прочность*



*Визуализация результата работы алгоритма фильтрации «интервал» с выбором дробной ячейки и выводом информации о ней*

В 2021 г. продолжалось развитие и внедрение пакета программ НИМФА 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 "Росатом" на подземные, поверхностные воды и грунты в качестве отраслевого стандартного программного продукта в период с 2018 по 2021 г.». В соответствии с данной программой успешно выполнен договор между Госкорпорацией «Росатом» и ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». В ходе работ по договору совместно с ФГБУ «Гидроспецгеология» выполнены следующие пункты:

- подготовлена матрица верификации ПК НИМФА 6.0, проведены верификационные расчеты, проанализированы результаты;
- аттестационный отчет и проект аттестационного паспорта ПК НИМФА 6.0 направлены в ФБУ «НТЦ ЯРБ» на аттестацию;
- разработан пакет документов по ПК НИМФА 6.0, включая руководство пользователя, тьюториалы и большой объем обучающих материалов;
- на базе ФГБУ «Гидроспецгеология» проведен обучающий семинар для пользователей ПК НИМФА 6.0, актуализирован сайт ПК НИМФА 6.0.

В соответствии с решением управляющего совета стратегической программы «Цифровой Росатом» Госкорпорации «Росатом» в 2021 г. стартовал проект «Создание цифрового продукта ЛОГОС-Гидрогеология». Целью работы является создание цифрового продукта на основе программного пакета НИМФА 5.0. В рамках данного проекта

в 2021 г. выполнены следующие работы.

- Разработан программный модуль «Поверхностный сток» для расчета задач поверхностного стока, содержащий реализацию следующих программных средств:
  - модель «мелкой воды»;
  - модель переноса загрязнителя в поверхностных водах;
  - модель инфильтрации по Хортону и Грину – Ампу;
  - интерфейс для введения начальных данных расчетов, обработки и анализа результатов в задачах поверхностного стока.
- Проведено аналитическое и маркетинговое исследование мирового и российского рынков программного обеспечения для математического моделирования в гидрогеологии.
- Разработана база верификационных тестов для модуля «Поверхностный сток», подготовлена программная документация и руководство пользователя по данному модулю.
- Сервер системы лицензирования цифрового продукта ЛОГОС адаптирован для продукта ЛОГОС-Гидрогеология.
- Создана система сборки, подготовки и выпуска дистрибутива для задач поверхностного стока.
- Разработан регламент технической поддержки продукта.
- Выпущена первая версия дистрибутива цифрового продукта ЛОГОС-Гидрогеология для задач поверхностного стока.

В направлении развития точного генератора ПК НИМФА в 2021 г. выполнены:

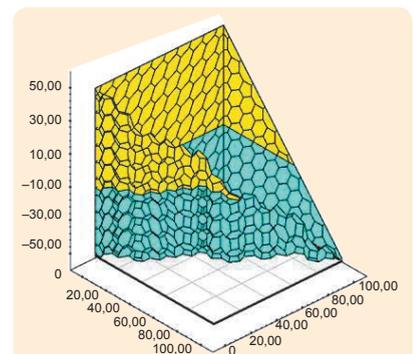
- разработка и реализация алгоритмов построения сетки с учетом выклинивания областей;
- разработка и реализация алгоритмов поиска несвязных областей модельной области;
- реализация учета внутренних граничных условий (береговые линии, абсолютная отметка рельефа, фильтраци-

онный барьер) при построении сетки;

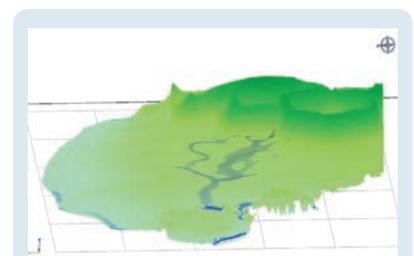
- реализация построения сетки совместно с зонами дробления.

В 2021 г. в ИТМФ продолжались работы по развитию и внедрению программного комплекса Time Dependent Monte-Carlo Code (TDMCC) для решения задач совместного переноса нейтронов и гамма-квантов методом Монте-Карло.

Так как процессы обоснования и получения аттестационных паспортов, разрешающих РФЯЦ-ВНИИЭФ проведение работ по оценке ядерной безопасности и радиационной защиты от заданных источников нейтронного и фотонного излучения, к 2021 г. были завершены, основные усилия в прошедшем году сосредоточились на наполнении верификационной базы задач. В результате на текущий момент верификационная база в обоснование ядерной безопасности содержит более 1000 задач различного уровня сложности, поэтому



Пример отображения области с выклиниванием



Пример отображения дневной поверхности рельефа с рекой

программный комплекс TDMCC получает статус полноправного коммерческого элемента продуктовой линейки ИТМФ и может быть широко представлен заказчиком.

В 2021 г. в ИТМФ продолжались активные работы по разработке программного комплекса «Виртуальный 3D-принтер» для моделирования процессов лазерных аддитивных технологий. Программный комплекс ориентирован на решение следующих задач:

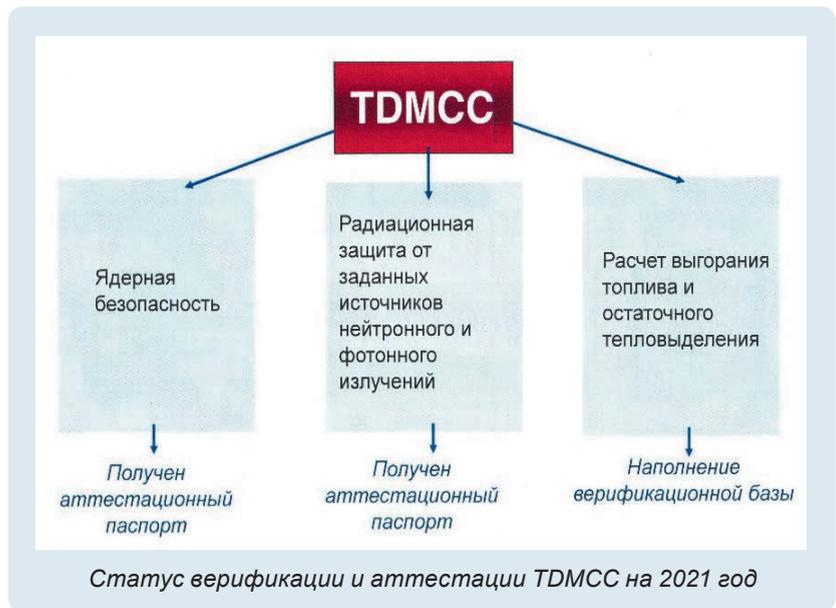
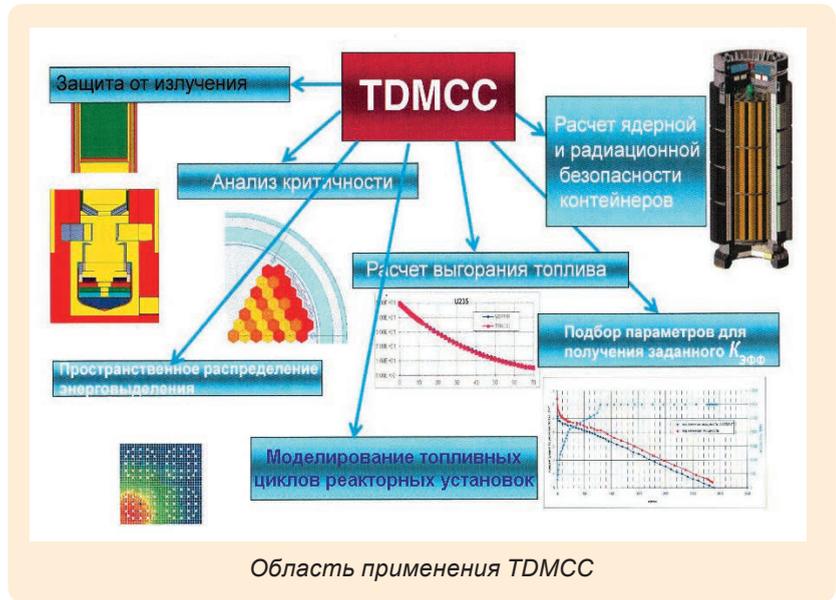
- проектирование деталей сложных форм посредством генеративного дизайна с использованием топологической оптимизации и решетчатых структур;

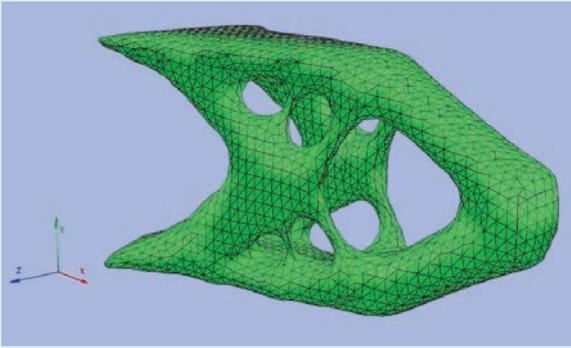
- предсказание свойств изготавливаемых деталей, минимизация остаточных напряжений, короблений и деформаций посредством моделирования физических процессов на мезо- и макроуровне;

- выбор оптимальных режимов работы оборудования с целью обеспечения качества синтезируемых деталей, повышения скорости, снижения количества использованного порошка, минимизации брака при производстве;

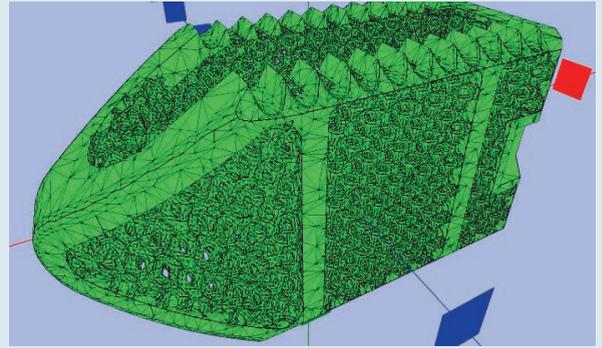
- полный цикл предпечатной подготовки деталей: размещение на платформе, выбор настроек оборудования и режимов его работы, разрезание на слои и задание штриховок, генерация управляющего кода.

На текущий момент разрабатываемый комплекс состоит из трех блоков программных модулей, отражающих этапы жизненного цикла разработки деталей: «Проектирование» (с элементами CAD), «Моделирование» (CAE), «Производство» (CAM). Все программные модули интегрированы в единую оболочку с графическим интерфейсом пользователя.

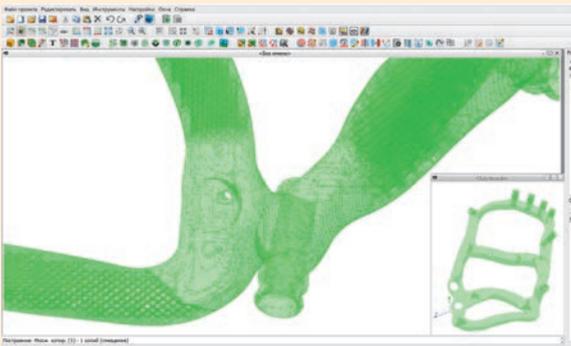




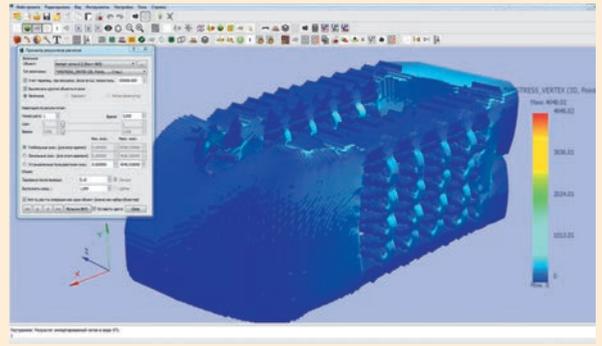
Деталь «Кронштейн», полученная в результате топологической оптимизации



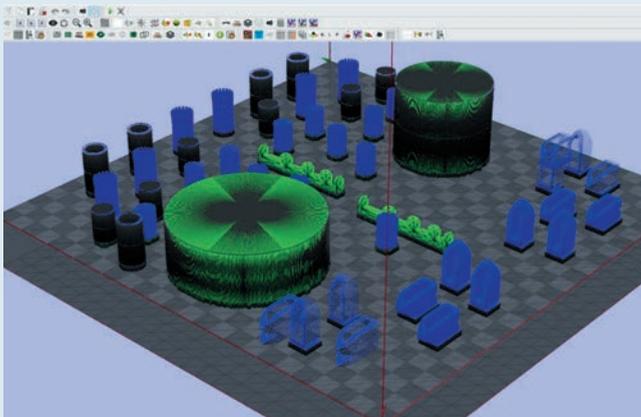
Деталь «Спинной кейдж» с вписанными решетчатыми структурами



Деталь «Челюстной имплант» с вписанными решетчатыми структурами



Поле напряжений в детали «Спинной кейдж», полученное в результате теплового и прочностного расчета на макроуровне



а

Платформа с множеством деталей: а – вид в «Виртуальном 3D-принтере», б – фотография после выпекания



б

Еще с 2016 г. специалисты ИТМФ занимаются разработкой сертификацией защищенной операционной системы (ЗОС) «Арамид» под разные архитектуры супер-ЭВМ. ЗОС «Арамид» является единственным в России дистрибутивом защищен-

ной операционной системы типа А (ОС общего назначения) 2-го класса защиты (по классификации ФСТЭК России), обеспечивающим возможность создания информационных систем в защищенном исполнении для проведения распределенных высо-

копроизводительных вычислений на супер-ЭВМ с разделением прав доступа в многопользовательском режиме. В состав дистрибутива ЗОС «Арамид» входят уникальные компоненты общесистемного программного обеспечения, благодаря кото-

рым ЗОС «Арамид» является незаменимым и эффективным решением при создании супер-ЭВМ различной производительности и может успешно использоваться при создании супер-ЭВМ как в защищенном исполнении, так и для обработки несекретной информации.

В 2021 г. продолжались работы по модернизации ЗОС «Арамид» в интересах предприятий высокотехнологичных отраслей промышленности и ВПК. Так, в этом направлении были решены следующие важные задачи:

– осуществлен переход на современную кодовую базу Linux-дистрибутива ОС с характеристиками: бесплатный; свободно распространяемый; RHEL-совместимый; стабильный с периодическими обновлениями пакетов с устранением ошибок и проблем без-

опасности. При переходе были приняты меры по обеспечению автономности и независимости сборки программных пакетов и дистрибутива ОС в целом от применяемой кодовой базы;

– обеспечено централизованное управление базовыми конфигурациями комплекса средств защиты информации и служебных сервисов, функционирующих на компонентах супер-ЭВМ.

Решение указанных задач позволило на базе ЗОС «Арамид» в ИТМФ создать ряд высокопроизводительных супер-ЭВМ на современной аппаратной компонентной базе в защищенном исполнении.

Кроме того, в 2021 г. осуществлены поставки ЗОС «Арамид» на предприятия Госкорпорации «Росатом» и оборонно-промышленного комплекса: ФГУП «НИТИ им. А. П. Алек-

сандрова», АО «Корпорация «Тактическое ракетное вооружение», АО «ЦСМ». Ожидается завершение работ по включению ЗОС «Арамид» в Единый реестр российского программного обеспечения.

В ходе работ по развитию продуктовой линейки в ИТМФ на базе ЦКО продолжалось мелкосерийное производство программно-аппаратных комплексов терафлпсного класса на основе компактных супер-ЭВМ. По заказам сторонних организаций (ИПФ РАН, ГСПИ, СарФТИ, Гидропресс и др.) в 2021 г. были собраны и сданы заказчикам вычислительные системы с суммарной пиковой производительностью 29 Тфлопс. По итогам их реализации от заказчиков поступило 26,7 млн рублей.

## ИНСТИТУТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ГАЗОДИНАМИКИ И ФИЗИКИ ВЗРЫВА (ИФВ)

### КВАЗИИЗОЭНТРОПИЧЕСКОЕ СЖАТИЕ ГАЗООБРАЗНЫХ ГЕЛИЯ И ДЕЙТЕРИЯ В СФЕРИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЯХ ПРИ ТЕРАПАСКАЛЬНЫХ ДАВЛЕНИЯХ

В прошедшем году в ИФВ проведена серия экспериментов по исследованию предварительно статически сжатых газообразных гелия и дейтерия при их последующем обжатии во взрывных сферических каскадных конструкциях, обеспечивающих квазиизоэнтропическое сжатие исследуемых газов. Цель исследований – уточнить экспериментальные данные о сжимаемости гелия и дейтерия в терапаскальной области давлений.

Средняя плотность газов определялась рентгенографическим методом по положению

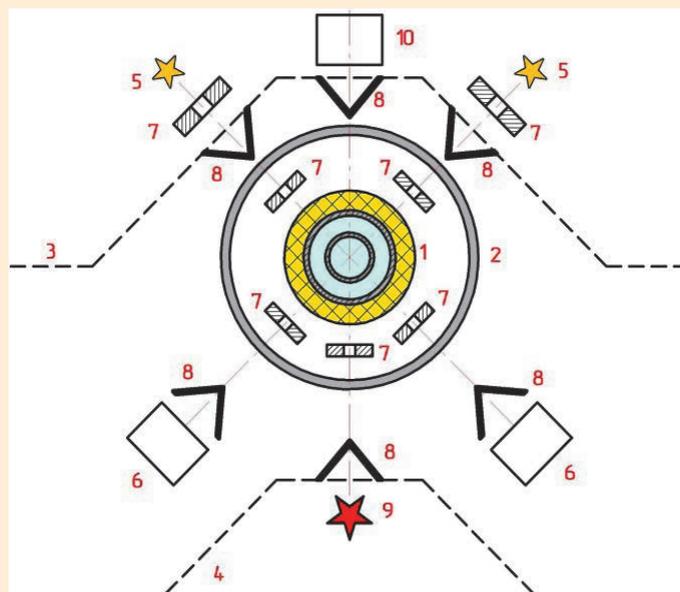


Схема проведения взрывных экспериментов с использованием многокадровой рентгеновской установки: 1 – экспериментальное устройство в сборе; 2 – локализующее устройство; 3, 4 – защитные сооружения; 5 – бета-троны БИМ234.3000; 6 – регистраторы; 7 – коллиматоры; 8 – защитные конусы; 9 – ЛИУ-Р-Т; 10 – пакет ADC-экранов

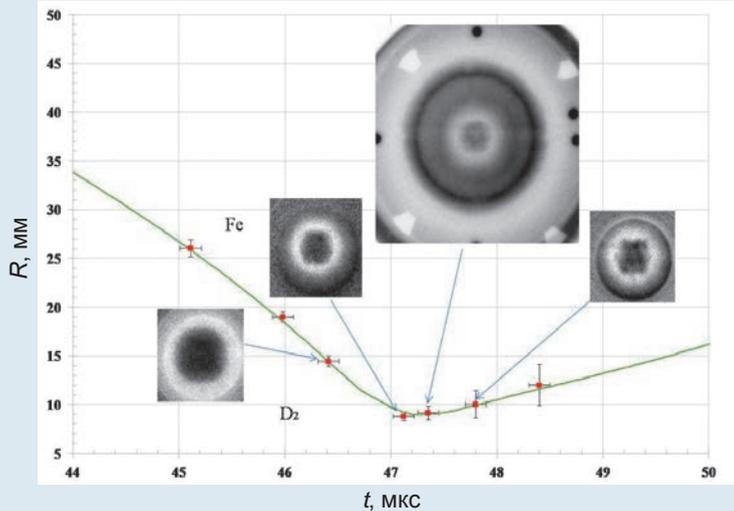
границ оболочек, сжимающих газ. С помощью одномерной газодинамической программы и уравнения состояния Копышева – Хрусталева для исследуемых газов выполнен расчетно-теоретический анализ проведенных опытов. Давление сжатия гелия составило  $P \approx 4,9$  ТПа при плотности  $\rho \approx 7$  г/см<sup>3</sup>, при этом степень сжатия  $\delta = \rho/\rho_0 \approx 350$ . Для дейтерия:  $P \approx 3,4$  ТПа,  $\rho \approx 6,3$  г/см<sup>3</sup>, степень сжатия  $\delta \approx 175$  в одном эксперименте;  $P \approx 13,3$  ТПа,  $\rho \approx 11,9$  г/см<sup>3</sup>, степень сжатия  $\rho \approx 540$  – в другом. Давление определено расчетным путем при численном моделировании экспериментов. Показано, удовлетворительное согласие ранее имевшихся и вновь полученных результатов.

#### Список литературы

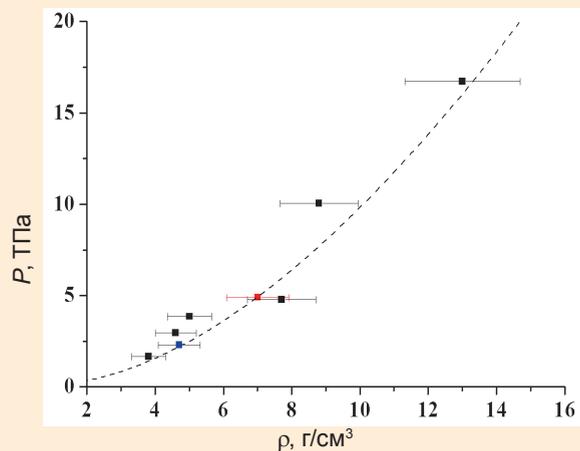
1. Копышев В. П., Хрусталева В. В. // 1980. № 1. С. 122.
2. Мочалов М. А., Ильяев Р. И., Фортов В. Е. и др. // ЖЭТФ. 2021. Вып. 151. С. 592.
3. Мочалов М. А., Ильяев Р. И., Фортов В. Е. и др. // ЖЭТФ. 2017. Т. 5. Вып. 10.
4. Мочалов М. А., Ильяев Р. И., Фортов В. Е. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2018. Т. 108. Вып. 10.
5. Жерноклетов М. В., Раевский В. А., Маначкин С. Ф. и др. // ФГВ. 2018. Т. 54, № 5.

### КВАЗИИЗОЭНТРОПИЧЕСКОЕ СЖАТИЕ НЕИДЕАЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ ДЕЙТЕРИЯ И ЕГО СМЕСИ С ГЕЛИЕМ В ОБЛАСТИ ДАВЛЕНИЙ ДО 250 ГПа

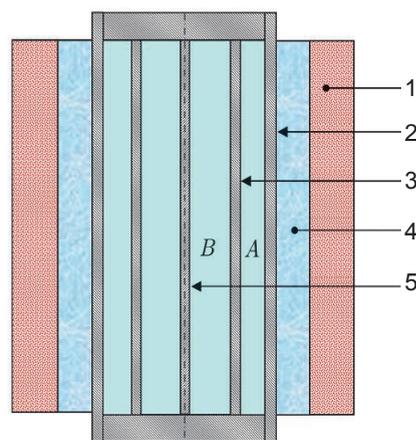
Проведены исследования квазиизоэнтропической сжимаемости сильнонеидеальной плазмы смеси дейтерия и гелия в области давлений 150–250 ГПа в устройствах цилиндрической геометрии. В эксперименте с «чистым» дейтерием при давлении около 200 ГПа получен новый результат. Траекто-



Сравнение экспериментальных данных с результатами одномерного расчета для второго эксперимента с дейтерием



Экспериментальные данные по сжатию газообразного гелия в сферических нагружающих устройствах: ---- расчетная изохронная кривая по УРС [1]; ■ – [2–4], ■ – [5], ■ – данные 2021 г.

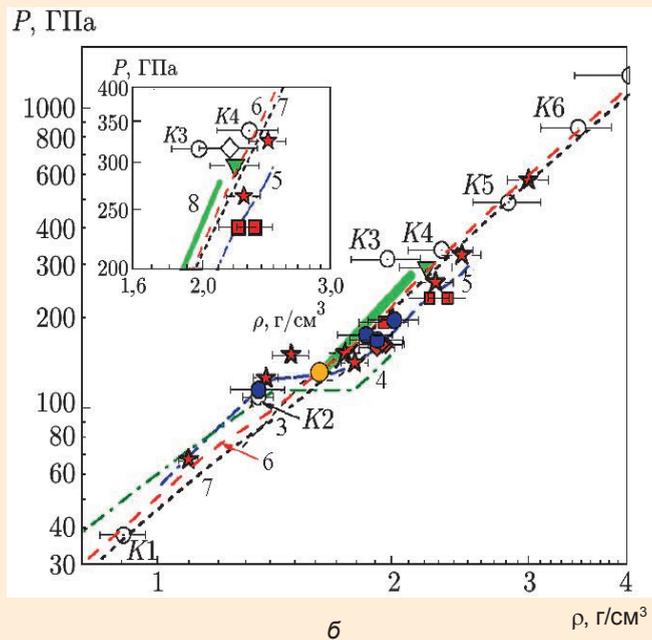
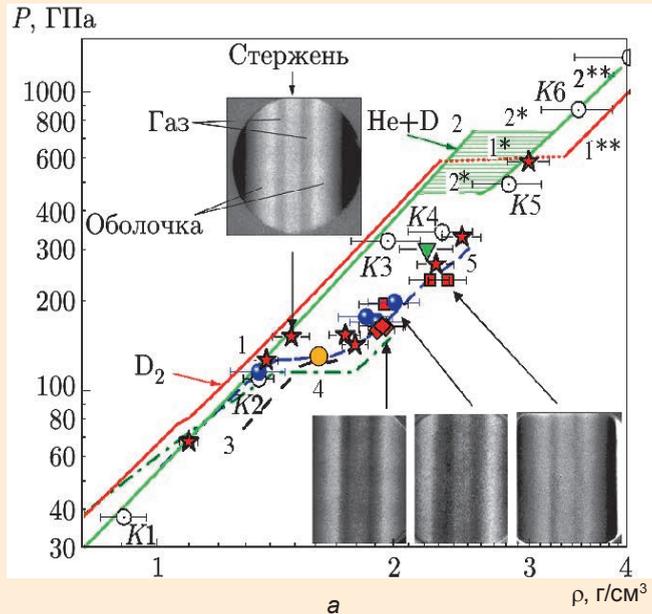


Цилиндрическое нагружающее устройство для квазиизоэнтропического сжатия газов

Эксперимент: ★ – [1, 2];  
○ – [3]; ▲ – не опубликованная ранее точка по сжимаемости дейтерия, полученная группой Кормера. Данные 2021 г.: ● – дейтерий (опыт M9); ◆, ■ – опыты M10 и M11 для смеси  $D_2 + He$ .

Расчеты: 1, 1\*, 1\*\* – изоэнтропа дейтерия ( $S = 29,5$  Дж/г·К) с участком фазового перехода 1\* (УРС SAHA [2]); 2, 2\*, 2\*\* – изоэнтропа смеси, опыт M11 ( $S = 23,7$  Дж/г·К) с межфазной зоной (УРС SAHA, 2021 г.); 3 – изотерма водорода,  $T = 1500$  К [4]; 4 – изотерма водорода,  $T = 5000$  К [5]; 5 – изоэнтропа (REMС-модель) [6]; 6 – изоэнтропа дейтерия из точки  $F$  (QMD-модель, 2021 г.); 7 – изоэнтропа смеси (QMD-модель, 2021 г.); 8 – критическая точка ( $T_c = 1400$  К,  $P_c = 130$  ГПа,  $\rho_c = 1,6$  г/см<sup>3</sup>); 8 – двухфазная область диссоциативно-плазменного фазового перехода (QMD-модель [7]). На вставке: ◇ – скорректированное положение состояния

рию движения металлических оболочек, сжимающих плазму, регистрировали с помощью мощных импульсных источников рентгеновского излучения с граничной энергией электронов до 60 МэВ. Значения плотности плазмы дейтерия и его смеси с гелием определены по измеренным радиусам оболочек в момент их «остановки». Давление сжатой плазмы получено на основании газодинамических расчетов, учитывающих реальные характеристики экспериментальных устройств. Полученные данные подтверждают сделанный ранее во ВНИИЭФ вывод о фазовом переходе в плазме сжатого дейтерия в области давлений 150–160 ГПа и свидетельствуют о том, что этот фазовый переход сохраняется в смеси дейтерия с гелием.



Зависимости давления от плотности в квазиизоэнтропически сжатом дейтерии и его смеси с гелием

### Список литературы

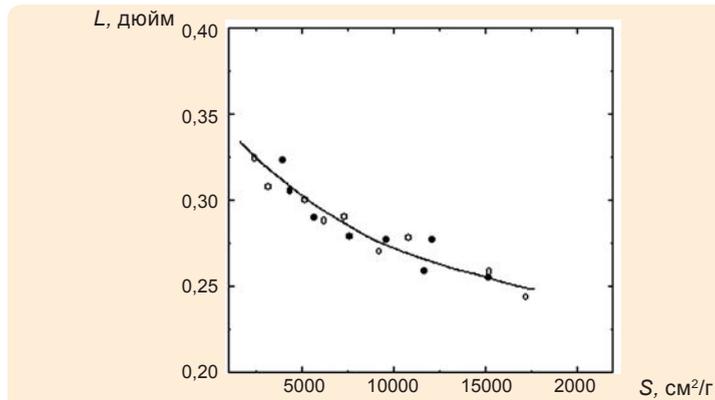
1. Fortov V. E., Il'kaev R. I., Arinin V. A. et al. // Phys. Rev. Lett. 2007. Vol. 99. P. 185001.
2. Мочалов М. А., Илькаев Р. И., Фортов В. Е. и др. // ЖЭТФ. 2017. Т. 152. С. 1113.
3. Григорьев Ф. В., Кормер С. Б., Михайлова О. Л. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1972. Т. 16, № 5. С. 286; ЖЭТФ. 1975. Т. 69, № 2(8). С. 743; ЖЭТФ. 1978. Т. 75. С. 1683.
4. Scandolo S. // Proc. Nat. Acad. Sci. 2003. Vol. 100. P. 3051.
5. Beule D., Ebeling W., Forster A. et al. // Contrib. Plasma Phys. 1999. Vol. 39. P. 21.
6. Filinov V. S., Levashov P. R., A. V. Botsan // J. Phys. 2009. Vol. 42. P. 212002; Levashov P. R., Filinov V. S., Botan A. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2008. Vol. 121. P. 012012.
7. Lorenzen W., Holst B., Redmer R. // Phys. Rev. B. 2010. Vol. 82. P. 195107.

## О ЗАВИСИМОСТИ ДЕТОНАЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ ВВ ОТ ДЕФЕКТНОСТИ КРИСТАЛЛОВ ВЗРЫВЧАТОГО НАПОЛНИТЕЛЯ

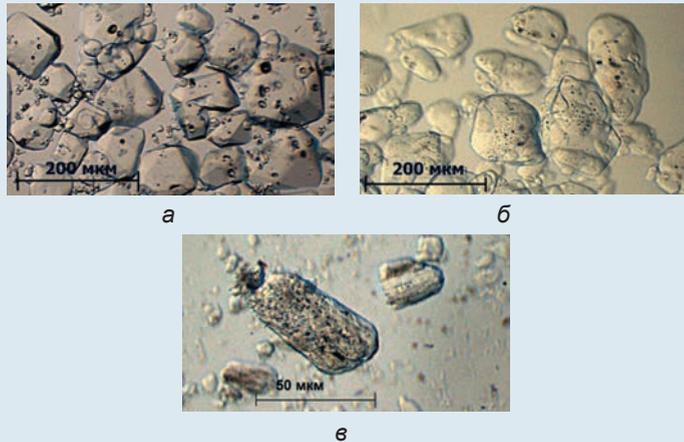
Проанализирована связь между структурными особенностями кристаллов взрывчатых веществ (ВВ) и их детонационной способностью. Показано, что внутренние дефекты в кристаллах ВВ могут оказывать преобладающее влияние на критический диаметр детонации. Предложен ряд технологических способов управления дефектностью кристаллов ВВ и, тем самым, значением критического диаметра детонации (или толщины детонирующего слоя). Наиболее предпочтительным для создания малогабаритных устройств взрывной логики и автоматики является способ термовакuumной перекристаллизации ВВ, обеспечивающий существенное снижение критического диаметра детонации при сохранении термостабильности и чувствительности к механическим воздействиям на уровне ВВ заводского изготовления.

## СЖИМАЕМОСТЬ НЕИДЕАЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ ДЕЙТЕРИЯ И ГЕЛИЯ ДО 20 ТПа

Проведены экспериментальные исследования по сжимаемости сильнонеидеальной вырожденной плазмы дейтерия и гелия, квазиизоэнтропически сжатой до давлений  $P \sim 20$  ТПа в устройствах сферической геометрии. Траектории движения металлических оболочек, сжимающих плазму, регистрировались с помощью мощных импульсных источников рентгеновского излучения (бетатронов) с граничной энергией электронов 60 МэВ. Впервые в экспериментах в качестве источника рентгеновского излучения при-



Зависимость ударно-волновой чувствительности ТЭНа плотностью  $0,95 \text{ г/см}^3$  от удельной площади поверхности его частиц:  $\circ$  – ТЭН, перекристаллизованный из ацетона;  $\bullet$  – механически измельченный ТЭН



Микрофотографии «малодефектного» (а), «среднедефектного» (б) гексогена заводского производства и «высокодефектного» (в) гексогена, переработанного методом термовакuumной возгонки

менялся сильноточный ускоритель с просвечивающей способностью объектов с эквивалентной толщиной 250 мм свинца. Значения плотностей плазмы до  $\rho \approx 14 \text{ г/см}^3$  определены по измеренному радиусу оболочки в момент ее «остановки». Давление сжатой плазмы получено на основе газодинамических расчетов, учитывающих реальные характеристики экспериментальных устройств.

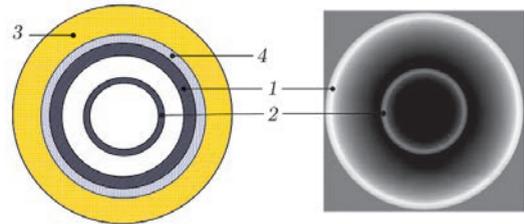
Результаты динамических экспериментов наглядно демонстрируют две особенности термодинамического поведения дейтерия (водорода) и гелия при квазиизоэнтропическом сжатии в очень широком диапазоне давлений и плотностей:

1) совокупность экспериментальных данных образует единую монотонно растущую зависимость; анализ экспериментальных данных показывает, что в области давлений 5000–20000 ГПа не обнаружено существенного различия между квазиизоэнтропической сжимаемостью дейтерия и гелия в координатах *давление – плотность*;

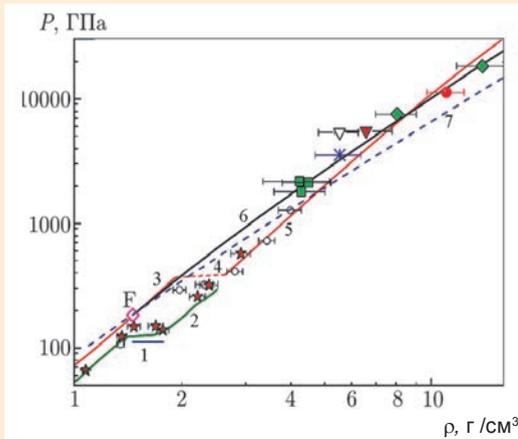
2) эксперименты не обнаруживают новых разрывных аномалий типа фазовых переходов первого рода в дейтерии, кроме зафиксированной ранее аномалии в области давлений  $P \approx 150\text{--}300$  ГПа, и никаких разрывных аномалий типа фазовых переходов первого рода в плазме гелия.



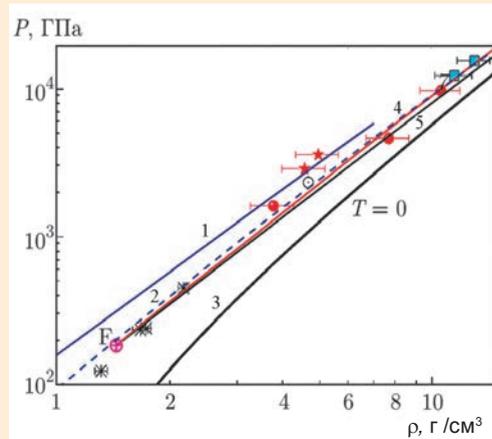
Сильноточный линейный ускоритель ПЛУ-Р-Т



Двухкаскадное сферическое экспериментальное устройство: слева – схема конструкции; справа – рентгенограмма устройства в исходном состоянии (1 – внешняя оболочка Fe<sub>1</sub>, 2 – внутренняя оболочка Fe<sub>2</sub>, 3 – ВВ, 4 – оргстекло)



а

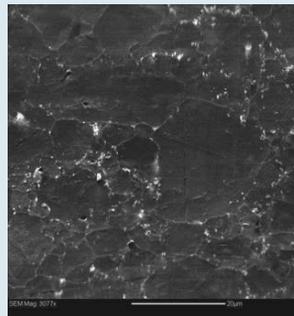


б

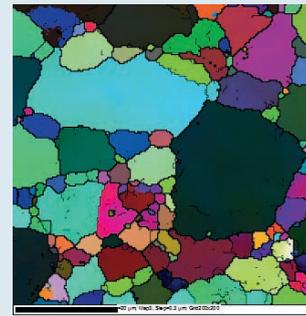
Обобщенные результаты исследований сжимаемости дейтерия (а) и плазмы гелия (б)

### ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО СЖАТИЯ БЕРИЛЛИЯ МЕТОДОМ СОСТАВНОГО СТЕРЖНЯ ГОПКИНСОНА

Исследовано высокоскоростное деформирование (сжатие) образцов бериллия российского производства методом составного стержня Гопкинсона. Зависимости напряжения от деформации указывают на высокое деформационное упрочнение бериллия. В реализованном диапазоне скоростей деформаций условный предел текучести не зависит от скорости деформирования; с увеличением скорости деформирования пластичность отечественного бериллия возрастает. Срав-



а



б

Участок дифракционного анализа поверхности образца Be (а) и ориентационная карта с границами зерен (б) (масштаб 20 мкм)



Схема постановки исследований: 1, 2 – взрывчатые материалы; 3 – ударник; 4 – алюминиевый крешер; 5 – переходник; 6 – нагружающий стержень; 7 – тензометрические датчики; 8 – образец; 9 – опорный стержень

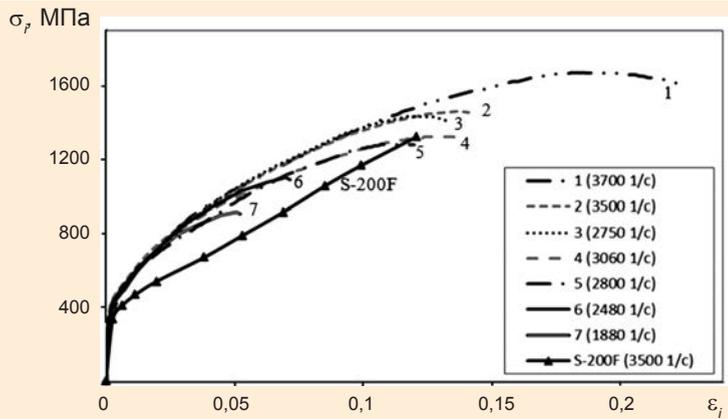
нение химического состава, микроструктуры и диаграмм сжатия исследуемого бериллия и бериллия марки S-200F производства США демонстрирует различия прочностных и пластических свойств этих материалов. Полученные данные о свойствах бериллия будут полезны при проектировании, расчетном моделировании и конструировании бериллиевых деталей изделий, испытывающих динамические нагрузки, характерные, например, для аварийных ситуаций в ядерной технике.

### ЛАБОРАТОРНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ

Разработан лабораторный экспериментальный комплекс, позволяющий исследовать гидродинамические неустойчивости и турбулентное перемешивание с микронным пространственным и наносекундным временным разрешением с последующей высокоточной обработкой результатов.

Проведена экспериментальная апробация комплекса в опытах по исследованию зон турбулентного перемешивания (ЗТП), развивающихся при неустойчивостях Рэлея – Тейлора, Кельвина – Гельмгольца на контактных границах газ – жидкость и неустойчивости Рихтмайера – Мешкова на контактной границе газов.

Показано, что из ЗТП могут выбрасываться тонкие микрокумулятивные струи жидкости; ЗТП газов после прохождения по ней ударной волны стремится к однородности, ударная волна искажается и расширяется. Получены размеры частиц жидкости в зоне турбулентного перемешивания веществ.



Диаграммы динамического сжатия бериллия

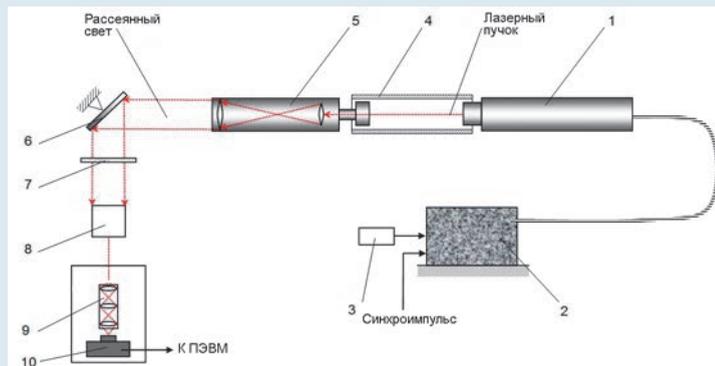
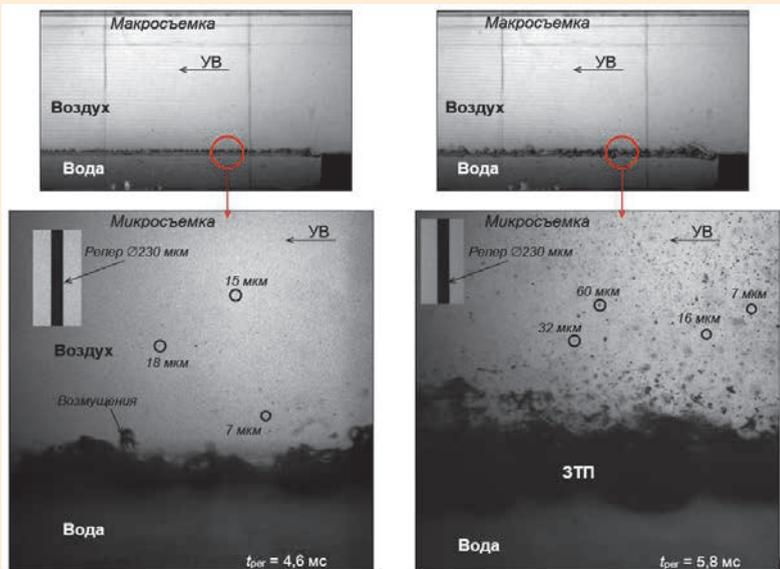


Схема регистрации комплексом течения в режиме рассеянного лазерного излучения: 1 – лазерная головка, 2 – блок питания лазера, 3 – пульт управления, 4 – труба защитная, 5 – телескоп-рассеиватель, 6 – поворотное зеркало, 7 – матовое стекло, 8 – легкогазовая пушка, 9 – короткофокусный телескоп, 10 – видеокамера



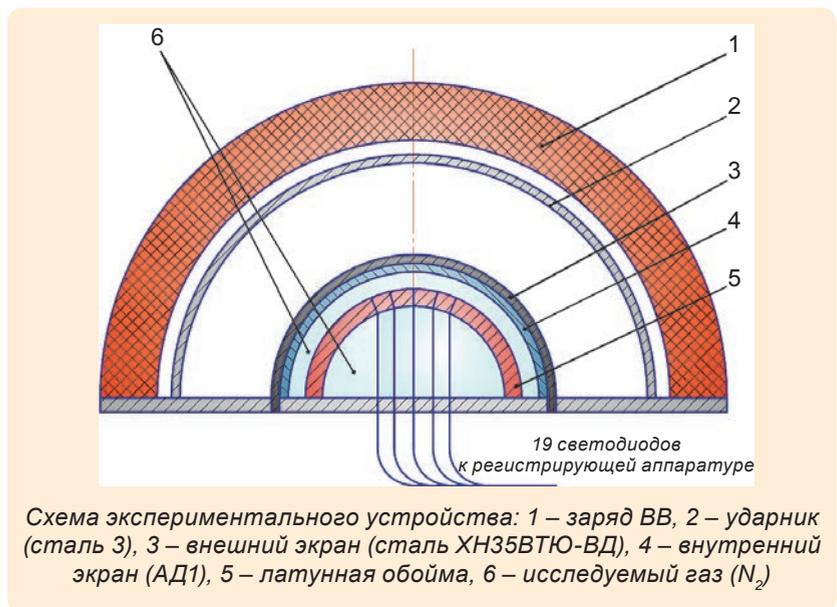
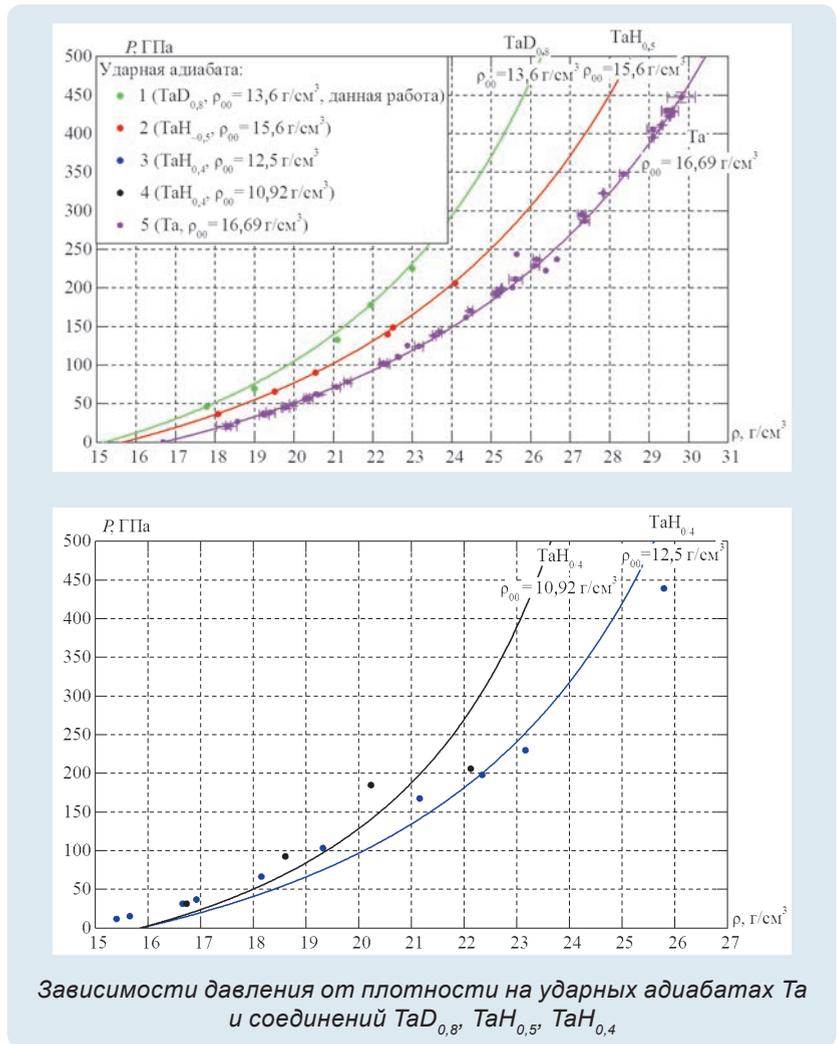
Развитие ЗТП на границе «газ – жидкость» при неустойчивости Кельвина – Гельмгольца (двухкадровый режим регистрации при рассеянном лазерном излучении). УВ – направление воздушной ударной волны

## УДАРНОЕ СЖАТИЕ ГИДРИДА ТИТАНА, ДЕЙТЕРИДОВ ТИТАНА, ТАНТАЛА И ЦИРКОНИЯ

В 2021 г. проведены эксперименты по исследованию в диапазоне давлений 30–220 ГПа ударного сжатия образцов гидрида титана  $\text{TiH}_2$ , дейтеридов циркония  $\text{ZrD}_2$  и тантала  $\text{TaD}_{0,8}$ , дейтеридов титана следующих составов:  $\text{TiD}_2$ ,  $\text{TiD}_{1,6}$ ,  $\text{TiD}_{1,1}$ . Применялась технология синтезирования образцов дейтеридов титана и циркония с использованием порошков титана и циркония и танталовых прутков для получения дейтеридов тантала с содержанием основных веществ не менее 99,7%. Опыты по определению ударных адиабат дейтеридов и гидридов выполнялись с использованием метода отражения. Для сжатия образцов применялись генераторы ударных волн, основанные на использовании зарядов взрывчатых веществ разной мощности.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПЛОТНОГО ГАЗООБРАЗНОГО АЗОТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕРАТОРОВ УДАРНЫХ ВОЛН ПОЛУСФЕРИЧЕСКОЙ ГЕОМЕТРИИ

Ранее, при исследовании свойств ударно-сжатого жидкого азота в диапазоне давлений 100–330 ГПа, было зафиксировано максимальное сжатие азота и обнаружено, что зависимость давления от плотности приобретает необычный, практически изохорный характер со степенью сжатия  $\rho/\rho_0 \approx 4,2$ , близкой к максимальному сжатию идеального газа. Для подтверждения этого вывода в 2021 г. была проведена серия экспериментов по ударному сжатию предварительно сжатого статически до плотности  $\rho_0 = 0,8; 0,65$  и  $0,5 \text{ г/см}^3$  газообразного азота на гене-



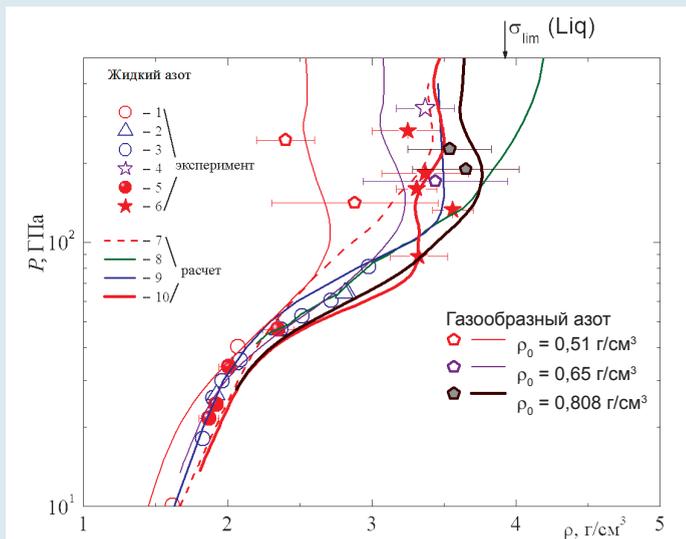
раторах ударных волн полусферической геометрии в диапазоне давлений 140–250 ГПа. Полученные результаты согла-

суются с экспериментальными данными для жидкого азота и расчетами по «химической» модели плазмы.

Ударное сжатие жидкого азота, эксперимент: 1 – [1], 2 – [2], 3 – [3], 4 – [4], 5 – [5], плоские системы, 6 – [5], сферические системы;

расчет: 7 – SAHA-N [5], 8 – интерполяционная модель М. Росс [6], 9 – модель «сжимаемого коволюма» [5, 7], 10 – SAHA-N с учетом молекул  $N_3$ .

Ударное сжатие предварительно сжатого газообразного азота: эксперимент и расчет SAHA-N (с включенными молекулами  $N_3$ ) при различных начальных плотностях. Вместе с начальной плотностью  $0,808 \text{ г/см}^3$  указана экспериментальная точка с начальной плотностью  $0,786 \text{ г/см}^3$



Зависимость давления от плотности в ударно-сжатом азоте

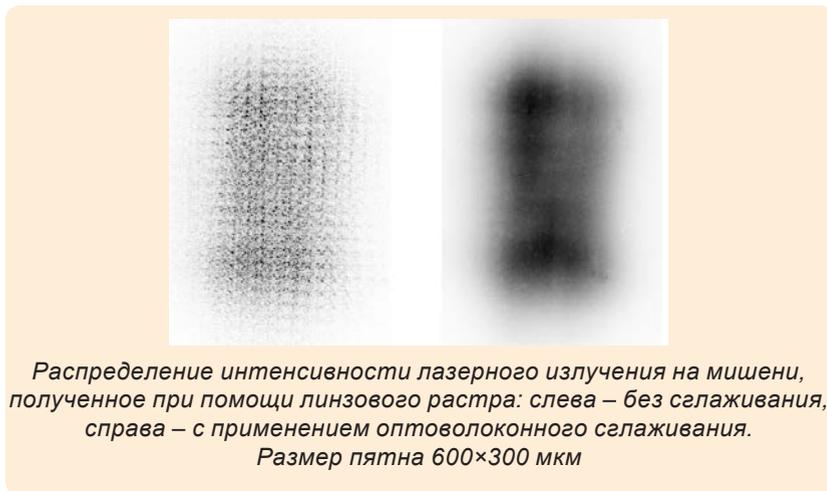
### Список литературы

1. Зубарев Н., Телегин Г. С. // Докл. АН СССР. 1962. Т. 142, № 2. С. 309–312.
2. Nellis W., Mitchell A. // J. Chem. Phys. 1980. Vol. 73. P. 6137–6145.
3. Nellis W., Radousky H. B., Hamilton D. C. et. al. // J. Chem. Phys. 1991. Vol. 94. P. 2244–2257.
4. Трунин Р. Ф., Борисков Г. В., Быков А. И. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2008. Т. 88. Вып. 3. С. 220–223.
5. Мочалов М. А., Жерноклетов М. В., Ильяев Р. И. и др. // ЖЭТФ. 2010. Т. 137. Вып. 1. С. 77–92.
6. Ross M., Rogers F. // Phys. Rev. B. 2006. Vol. 74. P. 024103-6.
7. Медведев А. Б. // Ударные волны и экстремальные состояния вещества. – М.: Наука, 2000. С. 315–341.

## ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ (ИЛФИ)

### СИСТЕМА ОПТОВОЛОКОННОГО СГЛАЖИВАНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА УСТАНОВКЕ «ЛУЧ»

На лазерной установке «Луч» создана система формирования опорного излучения с пространственно-временным сглаживанием с помощью многомодового оптического волокна. На выходе усилительного канала получена энергия импульса первой гармоники до 1200 Дж при длительности 4 нс, коэффициент преобразования во вторую гармонику до 44 %, расходимость  $0,2\text{--}0,25$  мрад. Энергия импульса и КПД преобразования почти не отличаются от несглаженного



Распределение интенсивности лазерного излучения на мишени, полученное при помощи линзового растра: слева – без сглаживания, справа – с применением оптоволоконного сглаживания. Размер пятна  $600 \times 300$  мкм

излучения. При использовании оптоволоконного сглаживания практически полностью устранена спеклованная структура в дальней зоне: интегральная по

времени импульса мелкомасштабная неоднородность облучения мишени снижена на 1–2 порядка по сравнению с несглаженным излучением.

# ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ И РАДИАЦИОННОЙ ФИЗИКИ (ИЯРФ)

## ПОЛУЧЕНИЕ НОВЫХ СВЕРХТЯЖЕЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В рамках комплексной программы «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до 2024 года» РФЯЦ-ВНИИЭФ совместно с Лабораторией ядерных реакций (ЛЯР) ОИЯИ, АО «ГНЦ НИИАР» и ФГУП «Комбинат ЭХП» реализует проект «Разработка комплекса по синтезу сверхтяжелых элементов, включая разработку технологий и получение изотопов для синтеза», целью которого является получение новых элементов с  $Z = 119$  и  $Z = 120$  в результате реакций  ${}_{97}^{249}\text{Bk} + {}_{22}^{50}\text{Ti}$  и  ${}_{98}^{251}\text{Cf} + {}_{22}^{50}\text{Ti}$  соответственно.

Синтез новых сверхтяжелых элементов (СТЭ) позволит глубже понять строение ядерной материи, моделировать процессы образования тяжелых элементов во Вселенной, прогнозировать их существование в природе. Элемент с  $Z = 119$  станет первым элементом в восьмом периоде Периодической таблицы химических элементов.

Проект, головным исполнителем которого является РФЯЦ-ВНИИЭФ, предусматривает следующие направления работ:

- разработка комплекса для синтеза СТЭ, включающего высокоточный инжектор многозарядных ионов на базе сверхпроводящего ионного источника электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР), – ЛЯР ОИЯИ;
- разработка комплекса разделения изотопов трансурановых элементов на базе высокоэффективного масс-сепаратора нового поколения – РФЯЦ-ВНИИЭФ;

- разработка технологий и получение изотопов для синтеза СТЭ:

- создание новых технологий радиохимического выделения и очистки изотопов трансурановых элементов – АО «ГНЦ НИИАР»;

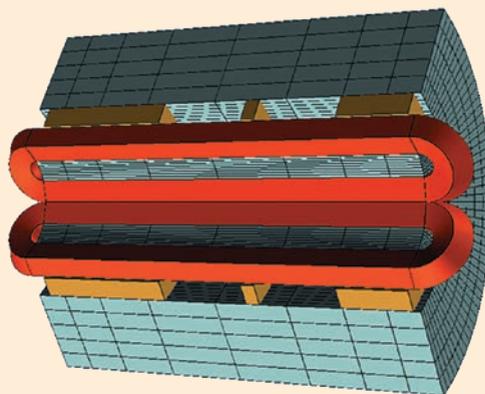
- получение изотопов  ${}^{48}\text{Ca}$  и  ${}^{50}\text{Ti}$  для создания интенсивных пучков ионов ЭЦР источника – ФГУП «Комбинат ЭХП».

В результате выполнения проекта в 2021 г.:

- в ЛЯР ОИЯИ разработана конструкторская документация (КД) на ряд подсистем ЭЦР источника, КД на сверхпроводящую магнитную систему, проведены исследования

оптимальных условий инжекции полученных из источника ЭЦР низкоэнергетичных пучков ионов  ${}^{48}\text{Ca}$  в циклотрон, разработана технология изготовления сегментов ускорительных мишеней с изотопами  ${}^{243}\text{Am}$ ,  ${}^{248}\text{Cm}$ ;

- в РФЯЦ-ВНИИЭФ разработана КД на составные части экспериментального образца масс-сепаратора – приемник изотопов и вакуумную систему, КД на составную часть технологического участка комплекса разделения изотопов – участок сбора и регенерации неразделенного вещества; проведены исследования с целью обоснования технических характеристик технологи-



3D изображение базовой модели магнитной системы источника ЭЦР

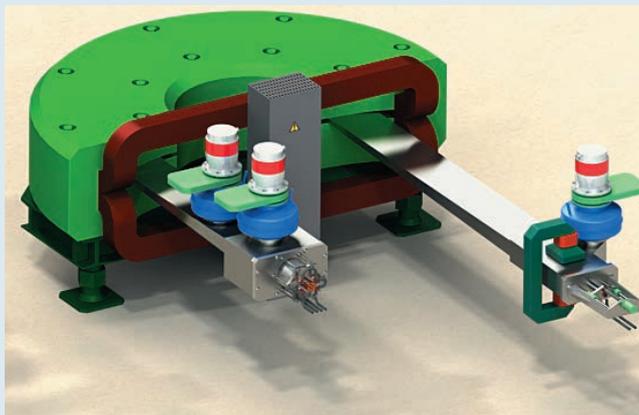


Схема электромагнитного масс-сепаратора

ческого участка комплекса разделения изотопов;

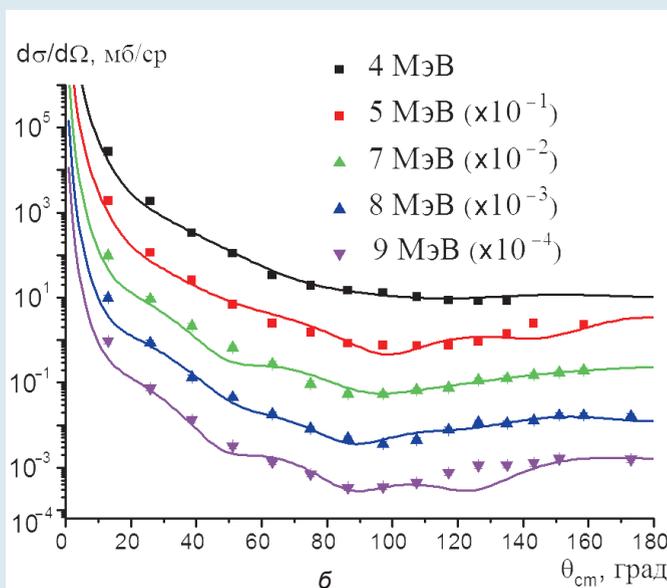
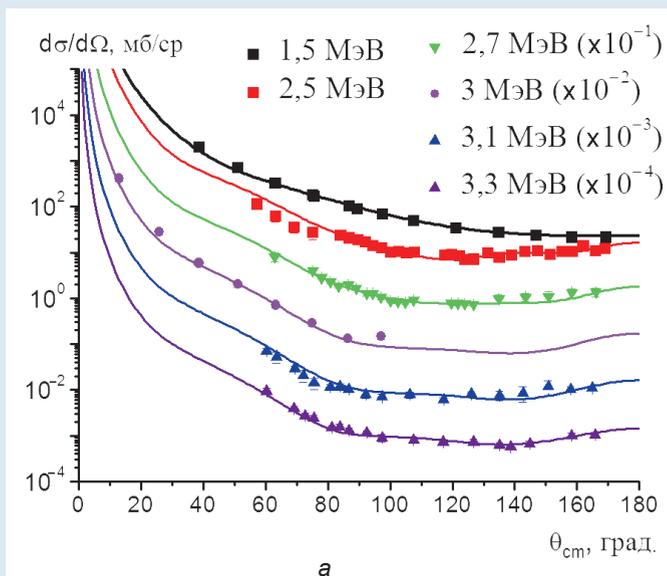
– в АО «ГНЦ НИИАР» проведены радиохимическая переработка, очистка и паспортизация препарата  $^{242}\text{Pu}$ ; изготовление, облучение и радиохимическая переработка двух опытных мишеней с кадмиевым экраном с миллиграммовыми количествами тяжелых изотопов кюрия; экспериментально определен эффективный выход изотопов берклия и калифорния при облучении кюрия в опытных мишенях с кадмиевым экраном.

### ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

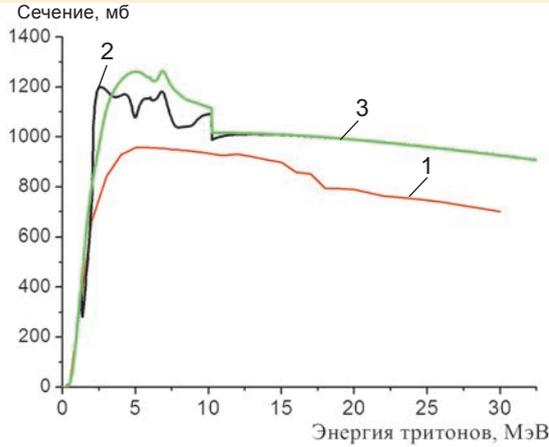
Выполнено экспериментально-теоретическое исследование упругого рассеяния тритонов на ядре  $^{10}\text{B}$ . На электростатическом ускорителе ЭГП-10 измерены дифференциальные сечения  $^{10}\text{B}(t, t_0)^{10}\text{B}$  при энергиях тритонов 3, 4, 5, 7, 8, 9 МэВ в интервале углов от  $10^\circ$  до  $170^\circ$  с шагом  $10^\circ$  с использованием мишени из бора с изотопным составом 60 %  $^{10}\text{B}$  и 40 %  $^{11}\text{B}$ . Литературные данные по рассматриваемой реакции охватывают энергетический диапазон только от 1,5 до 3,3 МэВ. Экспериментальные данные описаны (см. рисунки) по оптической модели с помощью разработанного в ИЯРФ программного кода OptModel (свидетельство о государственной регистрации № 2014619860), в котором когерентно учтена амплитуда резонансной составляющей упругого рассеяния. Нарушение унитарности матрицы рассеяния составляло 5 %. Роль резонансного рассеяния проявляется при углах более  $100^\circ$ , что показано на последнем рисунке, где представлено описание экспериментальных данных при энергии тритонов 3,1 МэВ по имеющимся оптическим пара-



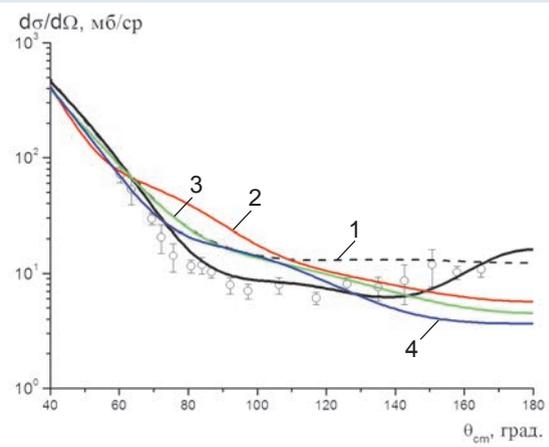
Мишенный модуль



Описание дифференциальных сечений упругого рассеяния для различных энергий налетающих тритонов



Полные сечения реакции  $^{10}\text{B} + t$ : 1 – суммирование сечений основных каналов реакций  $^{10}\text{B} + t$  из ENDF-B/VIII; 2 – анализ ИЯРФ по оптической модели с учетом резонансного рассеяния; 3 – анализ ИЯРФ по оптической модели



Описание экспериментальных данных (o) при энергии тритонов 3,1 МэВ по оптическим параметрам ИЯРФ с учетом резонансов (—) и по оптическим параметрам, взятым из литературы: 1 – Phys. Rev. 1969. Vol. 178. P. 1551; 2 – Phys. Rev. 1978. Vol. 17. P. 1283; 3 – Nucl. Phys. A. 1971. Vol. 169. P. 521; 4 – Phys. Rev. C. 2015. Vol. 91. P. 024611

метрам с учетом резонансов и по оптическим параметрам, взятым из литературных источников.

Таким образом, впервые

получены экспериментальные данные по упругому рассеянию тритонов на ядре  $^{10}\text{B}$  в диапазоне энергий тритонов до 9 МэВ и показана необходимость

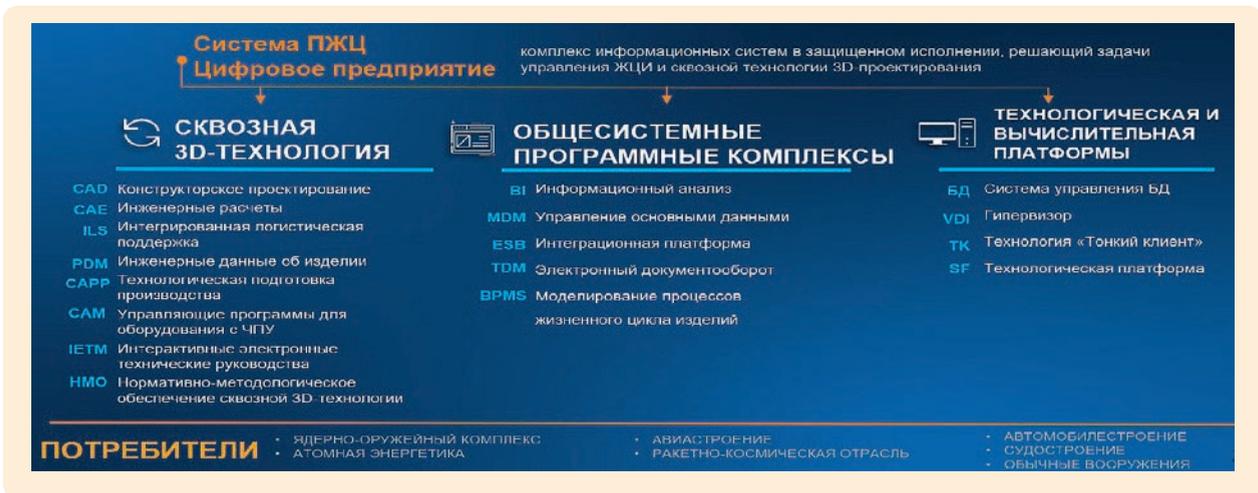
учета резонансного рассеяния в оптико-модельном анализе.

## ИНСТИТУТ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ (ИЦТ)

Внедрена импортнезависимая система собственной разработки – СПЖЦ «Цифровое предприятие» версии 2 в контуре в 7 НИИ, 4 конструкторских бюро и на 4 опытных производствах. Система СПЖЦ «Цифровое предприятие» обеспечивает защиту

всех видов конфиденциальной информации (ГТ, КТ, ДСП) до уровня «совершенно секретно» включительно. Более 20 тысяч сотрудников ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» успешно используют систему СПЖЦ «Цифровое предприятие» в ежедневной работе.

Выходит на финишную прямую трехлетняя разработка уникальной программной системы управления всеми процессами предприятия СПЖЦ «Цифровое предприятие» версии 3, разрабатываемой по заказу Правительства РФ, которая состоит из 17 отдельных про-



граммных модулей, разработанных как единая цифровая платформа. СПЖЦ станет ключевым элементом импортозамещения в сфере информационных технологий в российской промышленности и на данный момент демонстрирует высокий уровень своих функциональных возможностей на протяжении всего жизненного цикла высокотехнологических изделий.

Под кураторством Правительства РФ и в рамках 10-го юбилейного форума ИТОПК-2021 заместитель председателя кол-

легии ВПК Бочкарев Ю. И. дал старт программе апробации на 10 пилотных предприятиях ОПК РФ системы СПЖЦ «Цифровое предприятие» в рамках выполнения плана мероприятий по созданию и внедрению совместимых цифровых технологий в ОПК от 30.04.2020 № 3829-П-П7, утвержденного заместителем Председателя Правительства РФ Борисовым Ю. И.

Активно идет процесс внедрения отечественного решения класса СПЖЦ MES на дискретном производстве в девяти це-

хах на трех основных производственных площадках ПАО «КАМАЗ»: механосборочном производстве автомобильного завода, прессово-рамном заводе и заводе двигателей. Проект реализуется в рамках программы «Цифровая экономика». В ходе выполнения проекта будет модернизировано 775 существующих рабочих мест, а эффективность проекта продемонстрирует снижение себестоимости и повышение качества продукции ПАО «КАМАЗ».

## КОНСТРУКТОРСКИЕ БЮРО

В 2021 г. в рамках выполнения контракта с АО «НПО Лавочкина» завершена отработка технологической документации и изготовлены радионуклидные тепловые блоки ТБ-8,5 АВБ8Р.

Впервые в России изготовлен радионуклидный генератор космического назначения РИТЭГ-238-6,5/3 АВР002Р.

Продукция упакована в ТУК АТ738-1 и АТ748 и готова к транспортированию на космодром «Восточный» для установки на космическом аппарате «Луна-Глоб».

В рамках работ по договору с ПАО «НЗХК» в 2021 г. были изготовлены три транспортных упаковочных комплекта ТК-С72. Комплект ТК-С72 предназначен для перевозки двух тепловыделяющих сборок реактора РWR 14-футовой активной зоны всеми видами транспорта, кроме воздушного. Комплекты успешно прошли приемочные испытания, получен сертификат на конструкцию и перевозку ТК-С72.

Разработаны типовые конструкции транспортных упаковочных комплектов ТУК 137-й

серии (транспортный ТУК-137Т.Р для российских АЭС и двухцелевой ТУК-137Т.Е для зарубежных АЭС с РУ ВВЭР-1200/1300). ТУК предназначен для транспортирования и длительного хранения отработавшего ядерного топлива.

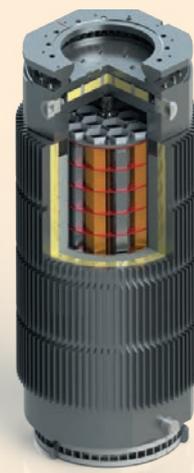
В 2021 г. на конструкцию ТУК были получены патенты № 2746959 и № 2743788. Создано произведение науки «Технический проект «Транспортный упаковочный комплект ТУК-137Т.Р».



Радионуклидный генератор РИТЭГ-238-6,5/3 АВР002Р на теплоотводящей подставке



Комплекты ТК-С72



Общий вид ТУК 137-й серии

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ РАДИОПРОЗРАЧНЫХ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Исследования перспективных радиопрозрачных теплозащитных материалов (РТЗМ), которые защищают бортовые антенны спускаемого космического летательного аппарата, необходимы для минимизации потерь в радиоканале после интенсивного теплового воздействия (плазмы) на них.

В процессе функционирования летательного аппарата необходимо обеспечивать радиосвязь с ним для передачи информации о характеристиках и условиях полёта, а также о состоянии его узлов и агрегатов. Передача информации осуществляется через бортовые антенны. Летательные аппараты, имеющие теплонагруженный участок полёта, подвергаются воздействию интенсивных аэротермомеханических нагрузок, возникающих при движении в плотных слоях атмосферы. Бортовые антенны, расположенные на поверхности летательного аппарата и установленные внутри него, излучают информацию через антенное окно (отверстие) в корпусе летательного аппарата. Для защиты бортовых антенн от интенсивного теплового воздействия (плазмы) это окно заполнено антенной вставкой из РТЗМ. Интенсивное тепловое воздействие приводит к обгару и уносу части РТЗМ и, как следствие, появлению дополнительных потерь в радиоканале, которые влияют на согласование бортовых антенн и дальность радиосвязи. Неправильный выбор РТЗМ антенных вставок может привести к частичной или полной потере информации, а в край-



Расположение имитатора относительно сопла кислородо-водородной установки



Составные части имитатора: 1 – отверстия для крепления теплозащитной пластины к кронштейну; 2 – окно под антенную вставку; 3 – отверстия для крепления кронштейна к кислородо-водородной установке



Со стороны установки антенной вставки

Со стороны установки антенны

Имитатор в сборе

нем случае – и летательного аппарата.

Задача исследования перспективных РТЗМ, позволяющих минимизировать потери в радиоканале после интенсивного теплового воздействия на бортовые антенны, в настоящее время является важной и актуальной, так как позволяет уменьшить количество натуральных испытаний. ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» обладает экспериментальной базой для проведения исследований РТЗМ до/при/после интенсивного теплового воздействия на

материалы в наземных условиях с фиксацией результатов изменения характеристик антенны, защищенной исследуемым РТЗМ, и потерь в радиоканале. Экспериментальные исследования аэротермомеханической стойкости различных материалов радиопрозрачных теплозащитных вставок антенн проводятся на кислородо-водородной установке, создающей тепловой поток высокотемпературной струи газа. Подана заявка на изобретение «Способ определения ослабления радиосигнала в РТЗМ в усло-

виях воздействия интенсивных тепловых потоков с использованием радиоканала».

В ходе исследований перспективных РТЗМ:

- проведены анализ характеристик перспективных РТЗМ и оценка возможности их применения в качестве антенной вставки;

- разработана конструкция антенных вставок и оснастки для исследования;

- изготовлены образцы антенных вставок и составных частей имитатора – теплозащитной пластины и кронштейна;

- проведены экспериментальные исследования по влиянию изменения диэлектрических характеристик РТЗМ на характеристики радиоканала при воздействии аэротермомеханических нагрузок на имитаторы боковой поверхности летательного аппарата.

Анализ результатов экспериментальных исследований показал, что РТЗМ ПКО-1-2-15, силикохромит-5, НБ + РТП-200 (композиционная вставка), ВРК-КМ, силихрит (ТСМ-983) могут применяться для защиты антенн летательных аппаратов, в том числе имеющих теплонагруженный участок полета, с целью минимизации потерь в радиоканале после интенсивного теплового воздействия на бортовые антенны. Все исследованные образцы антенных вставок изготовлены из РТЗМ отечественного производства, а часть исследованных РТЗМ успешно применяется в конструкциях антенных окон летательных аппаратов.



Образцы антенных вставок до и после испытаний

### ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ СЛОЖНЫМИ ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

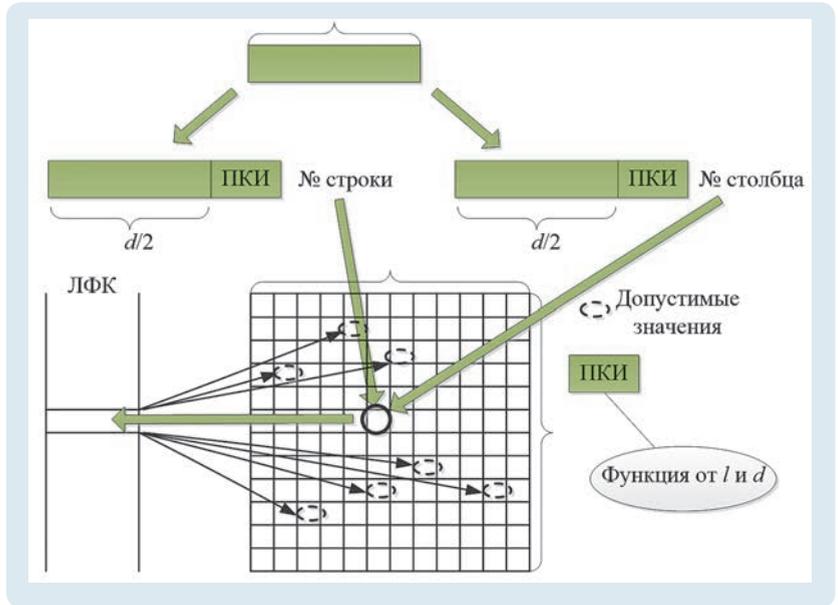
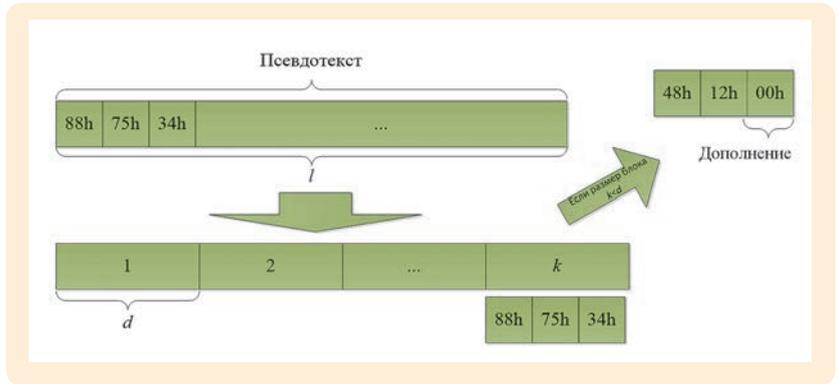
В рамках фундаментальных поисковых исследований разработан и адаптирован принципиально новый подход к созданию информационных трактов управления. Данный принцип базируется на концептуальных постулатах

стеганографии, реализующей надежную передачу информации по каналам связи. На вход схемы подаются структурированные команды или управляющие последовательности заданного вида, структуру и смысловую нагрузку которых необходимо «скрыть» от «посторонних глаз». В качестве преобразователя исходного текста может использоваться реализация любого криптографического алгоритма (ГОСТ 28147-89, AES



и т. д.) или алгоритма, формирующего псевдослучайные последовательности (RC-4, Dragon-128, HC-256 и др.). В результате преобразований данные будут представлены в виде последовательностей с характеристиками, близкими к равномерному распределению (псевдотекст). Данный тип информации совершенно не стоек к фильтрации, так как имеет отличную от других передаваемых сообщений структуру.

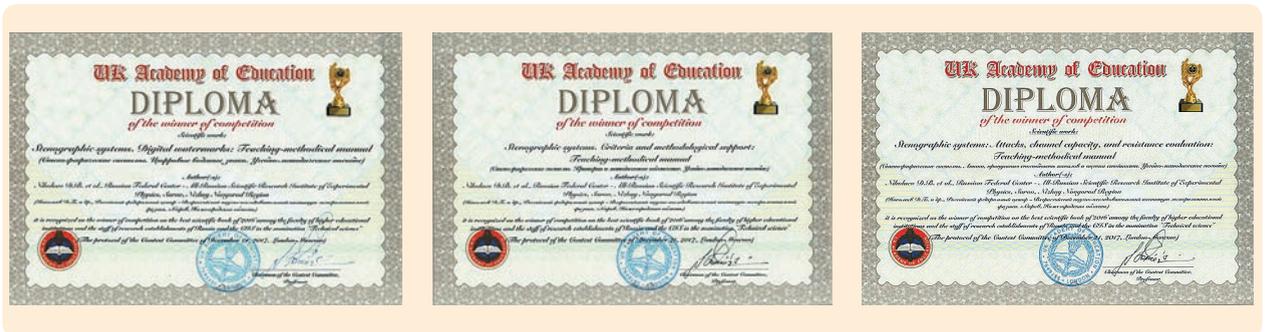
Для устранения этого недостатка псевдотекст анализируется и преобразуется в блоке транслитерационного анализа с использованием адаптивного полиалфавитного словаря (АПС). После этого полученное сообщение может быть передано в устройства формирования пакетов или другие транспортные системы для передачи, так как воздействие фильтрацией уже не приведет к желаемому результату. На приемном конце полученное смысловое выражение претерпевает обратные преобразования при помощи блока транслитерационной декомпозиции, использующего АПС, аналогичный АПС для кодирования. Полученный псевдотекст восстанавливается соответствующими криптографическими методами в исходную структурированную команду или управляющую последовательность. Кодирование конкретного блока осуществляется с использованием АПС. Блок разбивается на две равные части, к каждой из ко-



торых добавляется поле контрольной информации (ПКИ) (номер слова как функция от длины сообщения). В нашем случае в структуре АПС с каждой ячейкой матрицы транслитерации связана лингвоформирующая комбинация (ЛФК), однозначно определяющая множество разрешенных комбинаций. Первая часть блока является номером строки, вторая – номером столбца матрицы транслитерации, состав-

ляющей основу АПС. Ячейка с данными координатами содержит первое слово из смыслового выражения. Восстановление информации происходит в обратном порядке с использованием ЛФК, упрощающих поиск слова в матрице транслитерации. Корректирующий сдвиг однозначно вычисляется с помощью поля контрольной информации по номеру блока.

Разработанный подход является универсальным и мо-



жет применяться для решения ряда аналогичных задач, связанных с обеспечением безопасности информации и повышением удобства использования систем разграничения доступа. На способ получен патент РФ № 2546238 «Способ транслитационного преобразования информации и передачи ее по каналам связи». Способ реализуется в не имеющем аналогов программно-техническом комплексе управления и контроля сложными техническими объектами.

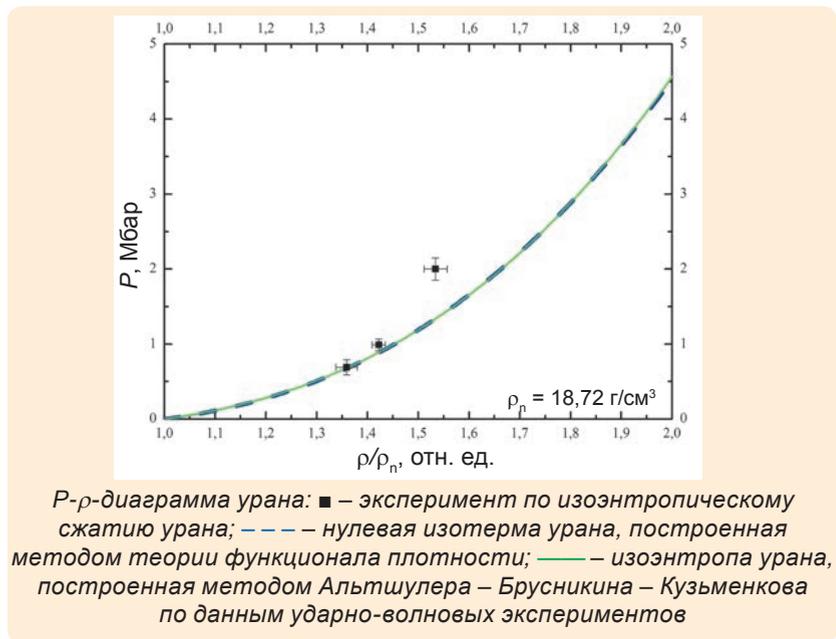
Теоретические и практические результаты работы были положены в основу учебно-методического пособия «Прикладная стеганография», которое является квинтэссенцией серии исследований «Стеганографические системы» – победителя конкурса Международной академии образования в номинации «Лучшая научная книга».



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

Для исследования свойств веществ в области низких температур и мегабарных давлений в НПЦФ разработан метод изоэнтропического сжатия давлением сверхсильного магнитного поля генератора МК-1. Полученные этим методом экспериментальные результаты, широко признанные мировым научным сообществом, связаны, в основном, с построением нулевых изотерм изотопов водорода – протия и дейтерия, а также инертных газов. В последнее время метод был распространен на исследования высокоплотных конструкционных материалов, в частности сплавов вольфрама.

В 2021 г. были успешно проведены первые взрывные эксперименты по исследованию нулевой изотермы образцов тантала и урана в мегабарной области давлений при их изоэнтропическом сжатии давлением сверхсильного магнитного поля генератора МК-1. Камеры сжатия урана и тантала конструкционно незначительно отличались друг от друга, при этом в качестве эталонного вещества использовался сверхчистый алюминий, что позволяет при



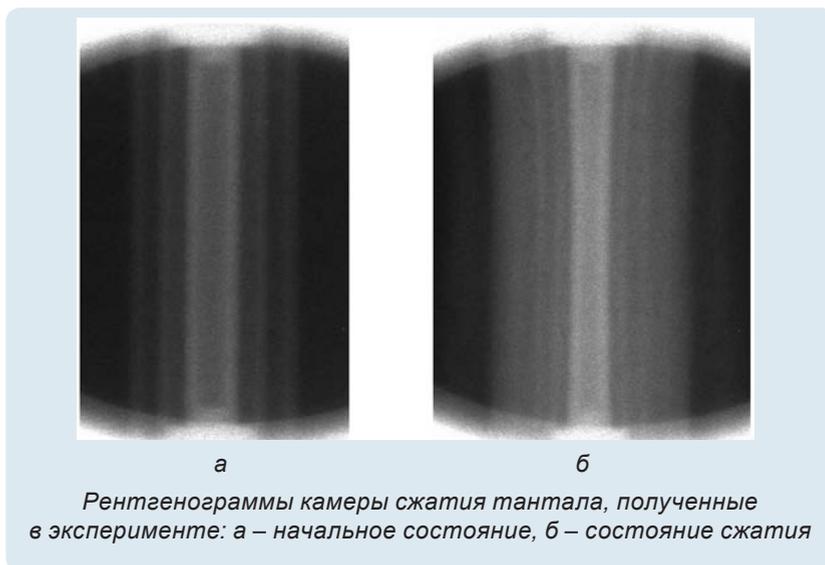
рентгенографировании процесса сжатия определять не только плотность, но и давление в сжатых образцах урана и тантала.

Для тантала с использованием бетатрона с низкой интенсивностью излучения получена одна точка на *P*- $\rho$ -диаграмме:  $P = 2,75 \pm 0,20$  Мбар,  $\rho = 28,35 \pm 0,45$  г/см<sup>3</sup>.

Эксперимент по исследованию нулевой изотермы урана в мегабарной области давлений

был проведен НПЦФ совместно с ИФВ на внутреннем полигоне ИФВ. Начальное магнитное поле генератора МК-1 (177 кГс) создавалось запиткой от спирального взрывомагнитного генератора ВМГ-200, разработанного в НПЦФ. Сжатие веществ внутри камеры сжатия определялось путем регистрации границ раздела сред методом многокадровой импульсной рентгенографии с помощью трехлучевого бета-

тронного комплекса РГК-Б ИФВ и системы CR-радиографии на основе пакетов фотохромных экранов с металлическими конверторами. Полученные рентгенограммы были обработаны НПЦФ и ИФВ по собственным независимым методикам, при этом геометрические параметры камеры сжатия урана, измеренные с точностью не хуже 0,05 мм, различались не более чем на 3 %. Были получены три точки на кривой сжатия урана в области давлений до 2 Мбар с точностью определения сжимаемости ~ 1,5 % и давления ~ 7 %.



Рентгенограммы камеры сжатия тантала, полученные в эксперименте: а – начальное состояние, б – состояние сжатия

## НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ (НИИС)

### ПОДСИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ НЕШТАТНЫХ СОБЫТИЙ

В соответствии с планом реализации трехсторонней дорожной карты по взаимодействию ПАО «Газпром» с промышленным комплексом Нижегородской области успешно проведены опытно-промышленные испытания подсистемы обнаружения нештатных событий (ПОНС) в Моркинском ЛПУ ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород».

ПОНС представляет собой программное обеспечение, функционирующее в составе УНК ТМ и производящее расчеты в режиме реального времени в соответствии с запатентованными алгоритмами для определения:

- места утечки газа из многониточного магистрального газопровода;
- несанкционированной перестановки запорной арматуры;
- перетока газа между магистральными газопроводами с разными газодинамиче-

скими режимами транспорта газа.

ПОНС внедрена в промышленную эксплуатацию на объектах ПАО «Газпром».

### РЕКОНСТРУКЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Реконструкция позволила создать производство многослойных печатных плат всех видов до 7 класса точности. Производство оснащено современным автоматизированным

Дата	Время	Форм.	Событие	Объект	Автор/Состояние
07/07/21	14:15:34	00:00:00	Первый перепад	Кр 2235-1_201 [ПОНС]	
07/07/21	14:15:55	00:00:00	Перепад	Кр 2232-2_201 [ПОНС]	
07/07/21	14:15:55	00:00:00	Авария [2217км]	Разрыв 2232-2_201 [ПОНС]	
07/07/21	14:15:55	00:00:00	Предупреждение [0.12кгс/см2]	Волна 2232-2 [ПОНС]	
07/07/21	14:27:07	00:00:00	Предупреждение [0.12кгс/см2]	Волна 2232-2 [ПОНС]	Сброшена [АРМ_1:Диспетчер]
07/07/21	14:27:08	00:00:00	Авария [2217км]	Разрыв 2232-2_201 [ПОНС]	Сброшена [АРМ_1:Диспетчер]
07/07/21	14:32:42	00:00:00	Перепад	Кр 2232-2_201 [ПОНС]	Сброшена [АРМ_1:Диспетчер]
07/07/21	14:32:45	00:00:00	Первый перепад	Кр 2235-1_201 [ПОНС]	Сброшена [АРМ_1:Диспетчер]

Журнал событий УНК ТМ при проверке зоны действия ПОНС во время проведения приемочных испытаний



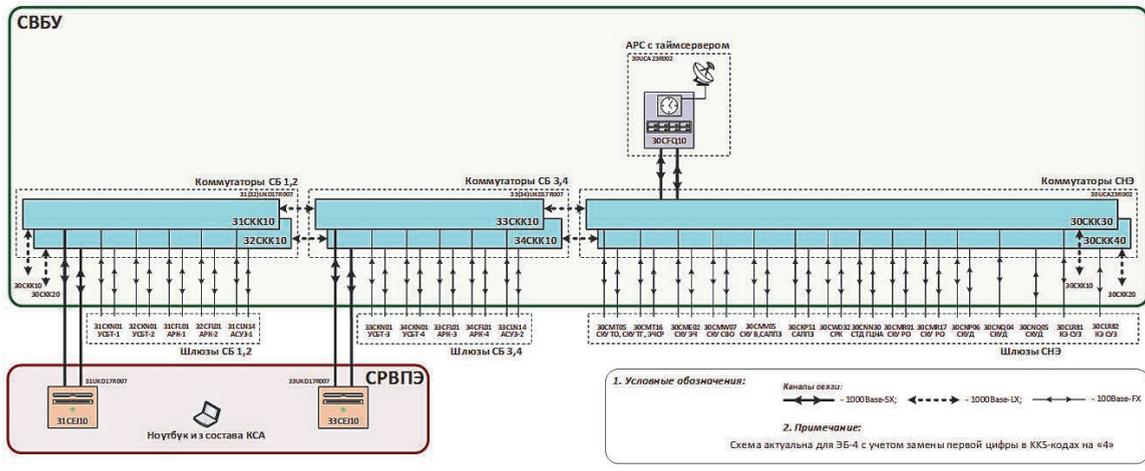
### СОЗДАНИЕ СИСТЕМ ВЕРХНЕГО УРОВНЯ АСУ ТП ЭНЕРГОБЛОКОВ АЭС «КУДАНКУЛАМ»

В сентябре 2021 г. завершена разработка системы верхнего блочного уровня (СВБУ) и системы регистрации важных параметров эксплуатации

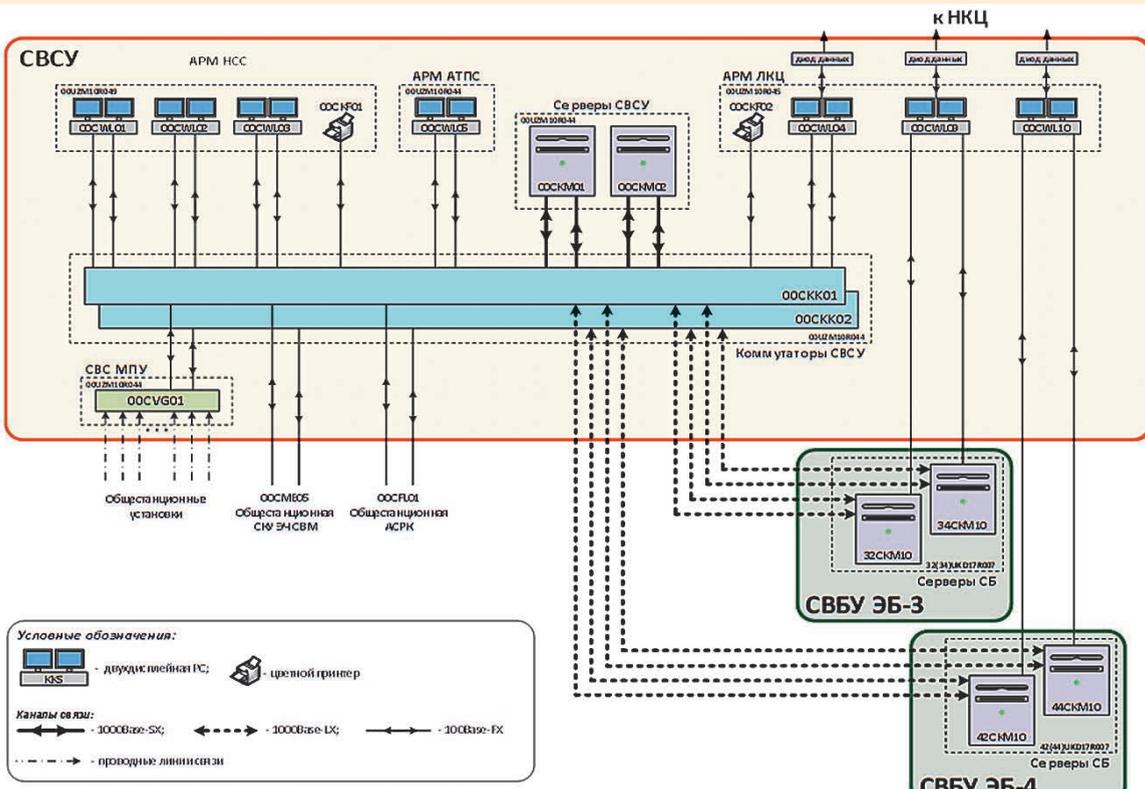
(СРВПЭ) энергоблока № 3, а также системы верхнего станционного уровня (СВСУ) энергоблоков № 3, 4 АЭС «Куданкулам». Об этом свидетельствует успешное проведение комплексных интеграционных испытаний и аудита в рамках процедуры независимой верификации и валидации с участием представителей Индийской

корпорации по атомной энергии (ИКАЭЛ).

СВБУ и СВСУ предназначены для выполнения централизованного контроля и управления энергоблоком и оборудованием общестанционных систем АЭС, включая соблюдение пределов безопасной эксплуатации. СРВПЭ выполняет на АЭС функцию «черного ящика».

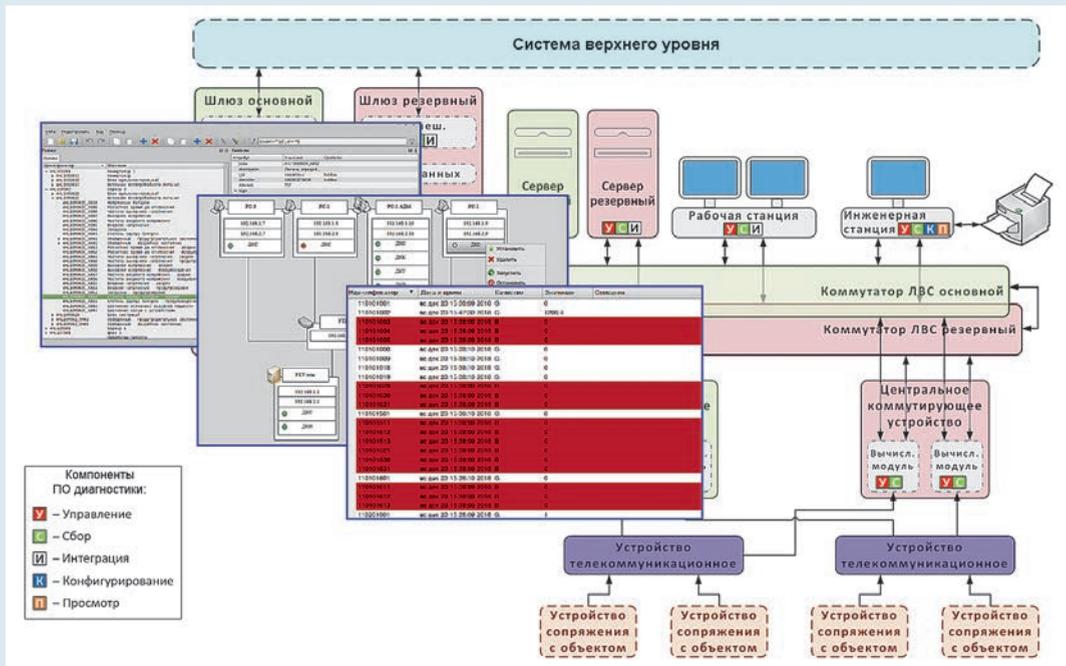


Структурная схема СРВПЭ ЭБ № 3 (№ 4) АЭС «Куданкулам»



Структурная схема СВСУ АСУ ТП АЭС «Куданкулам»

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ (НИИИС)



Пример использования ПО диагностики ПТС АСУ ТП

### КОМПОНЕНТ ДИАГНОСТИКИ ПО АНАЛИЗУ СЕТЕВОЙ АКТИВНОСТИ ИЗ СОСТАВА ПО ДИАГНОСТИКИ ПТС АСУ ТП

В рамках НИОКР «Кибербезопасность» разработан новый компонент программного обеспечения (ПО) диагностики программно-технических средств (ПТС) АСУ ТП – компонент по анализу сетевой активности (КДАСА).

Программное обеспечение диагностики ПТС АСУ ТП предназначено для сбора, обработки и передачи в SCADA информации о состоянии ПТС АСУ ТП на этапе эксплуатации.

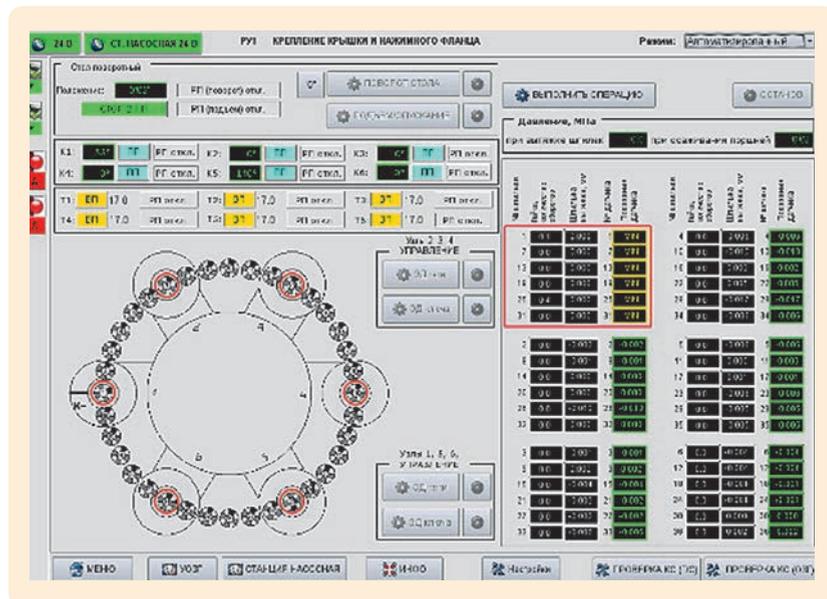
КДАСА обеспечивает диагностирование событий на сетевых устройствах (коммутаторы, маршрутизаторы, межсетевые экраны, системные блоки) и расширяет функционал ПО диагностики ПТС АСУ ТП в части обработки диагностических данных для формирования информации по сетевой активности (текущая загрузка узлов сети, подключение к сети несанкционированных абонентов и т. д.).

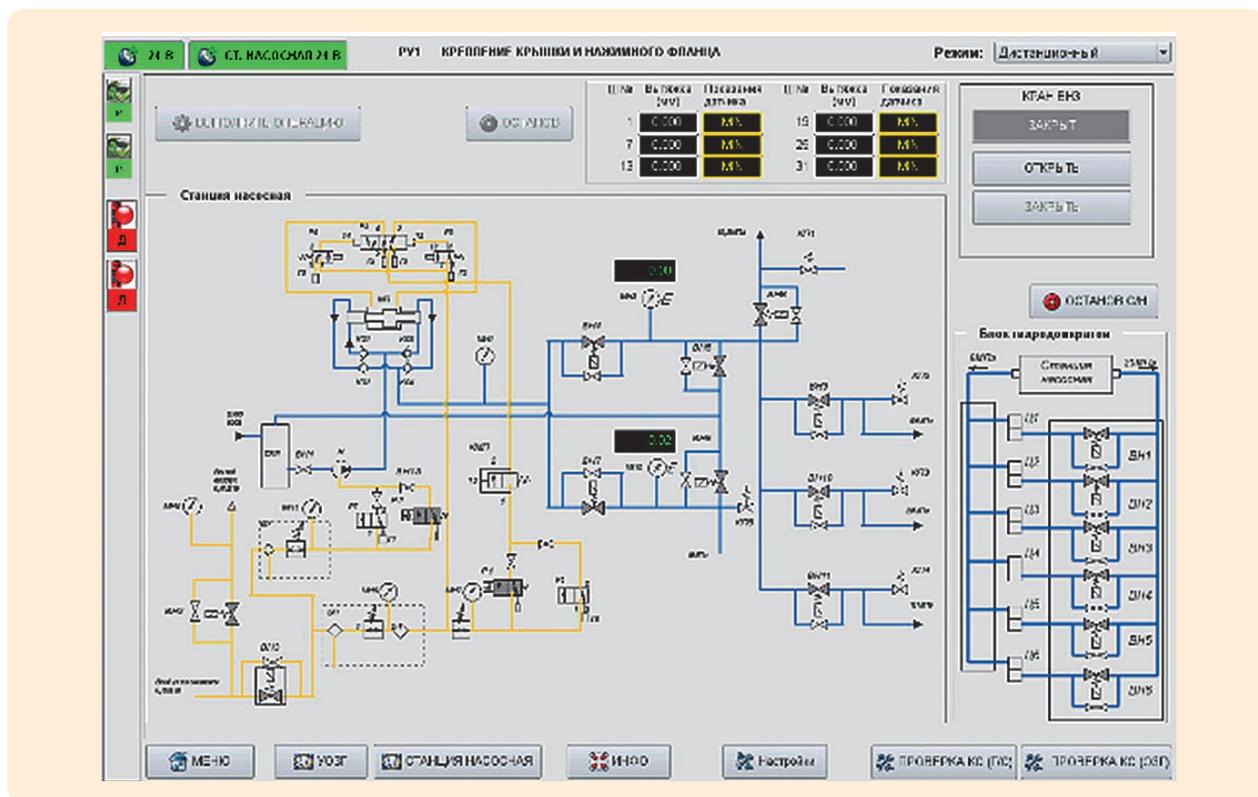
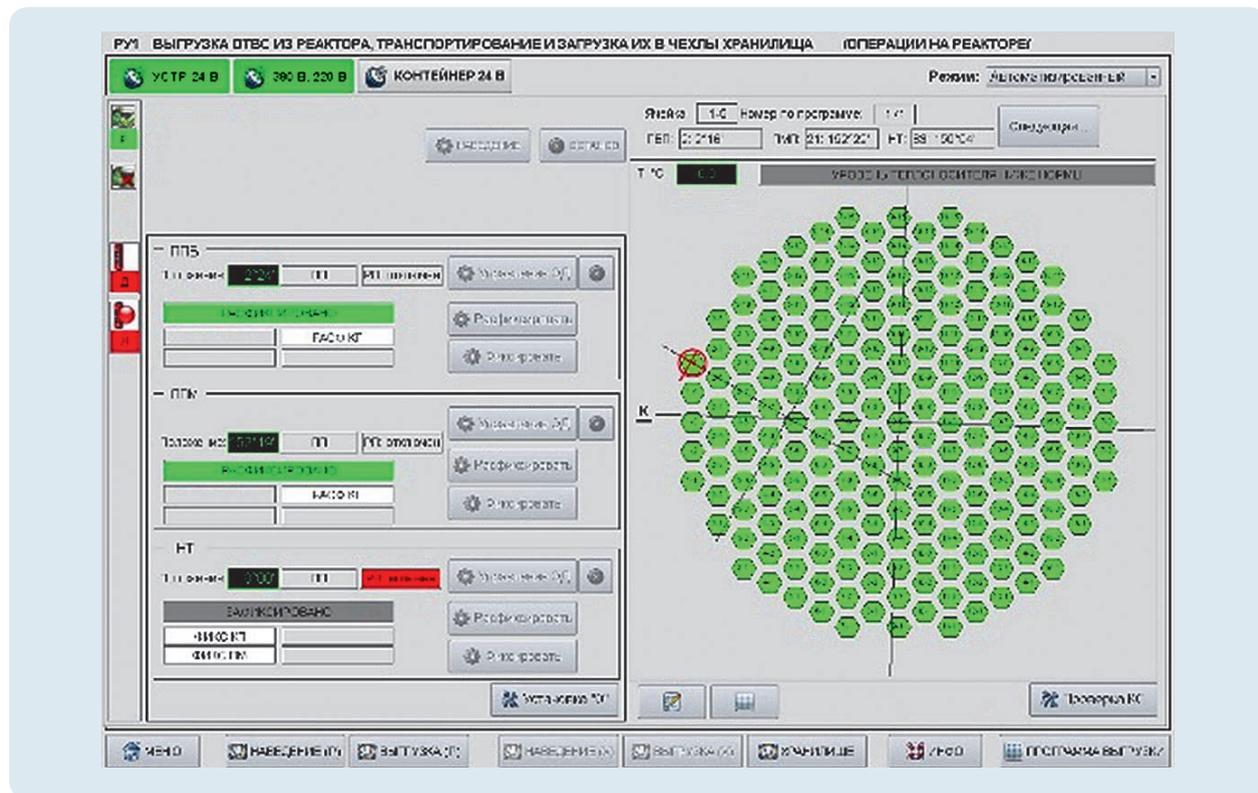
### СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ КОМПЛЕКС ПЕРЕГРУЗОЧНЫМ ДЛЯ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК РИТМ-200 УНИВЕРСАЛЬНЫХ АТОМНЫХ ЛЕДОКОЛОВ

Система управления комплексом перегрузочным (СУ КП) предназначена для управления устройствами комплекса и контроля за работой этих устройств

при выполнении последовательных технологических операций по перегрузке ядерного топлива в процессе эксплуатации универсальных атомных ледоколов.

СУ КП – комплекс программно-технических средств, обеспечивающий совместную работу с электрооборудованием (датчиками и исполнительными механизмами), размещенным на устройствах комплекса перегрузочного.





При перегрузке ядерного топлива СУ КП осуществляет безопасное выполнение технологических операций, при этом обеспечивает поочередное управление устройствами ком-

плекса перегрузочного, контролирует положение исполнительных органов устройств, выполняет измерение параметров, регистрацию и протоколирование данных в последо-

вательности, заданной технологическим регламентом.

Работа СУ КП по назначению выполняется при участии и под контролем персонала.

### РАЗРАБОТКА МОБИЛЬНОГО ПРИЕМНО-РЕГИСТРИРУЮЩЕГО ПУНКТА НА БАЗЕ АВТОТРАНСПОРТА ПОВЫШЕННОЙ ПРОХОДИМОСТИ

В 2021 г. завершается работа по разработке мобильного приемно-регистрающего пункта на базе автотранспорта повышенной проходимости, обеспечивающего прием, регистрацию, запоминание и ретрансляцию телеметрической

информации с квантованной времяимпульсной модуляцией (комплект ИП-АПП).

Комплект ИП-АПП позволяет с использованием аппаратуры ПРА из состава комплекса ПРК-СК организовать пункт приема информации при проведении испытаний изделий на полигонах Минобороны России в труднодоступных или опасных зонах.

Достоинства комплекта:

– выполнение задач в любое время суток и любое время года;

– мобильность, развертывание приемно-ретрансляционного пункта без привлечения дополнительной техники (погрузка/разгрузка контейнера ПРА);

– возможность размещения непосредственно в опасной зоне;

– возможность приема информации, в том числе ретрансляции и управления по радиомодемному каналу, до 8 часов.



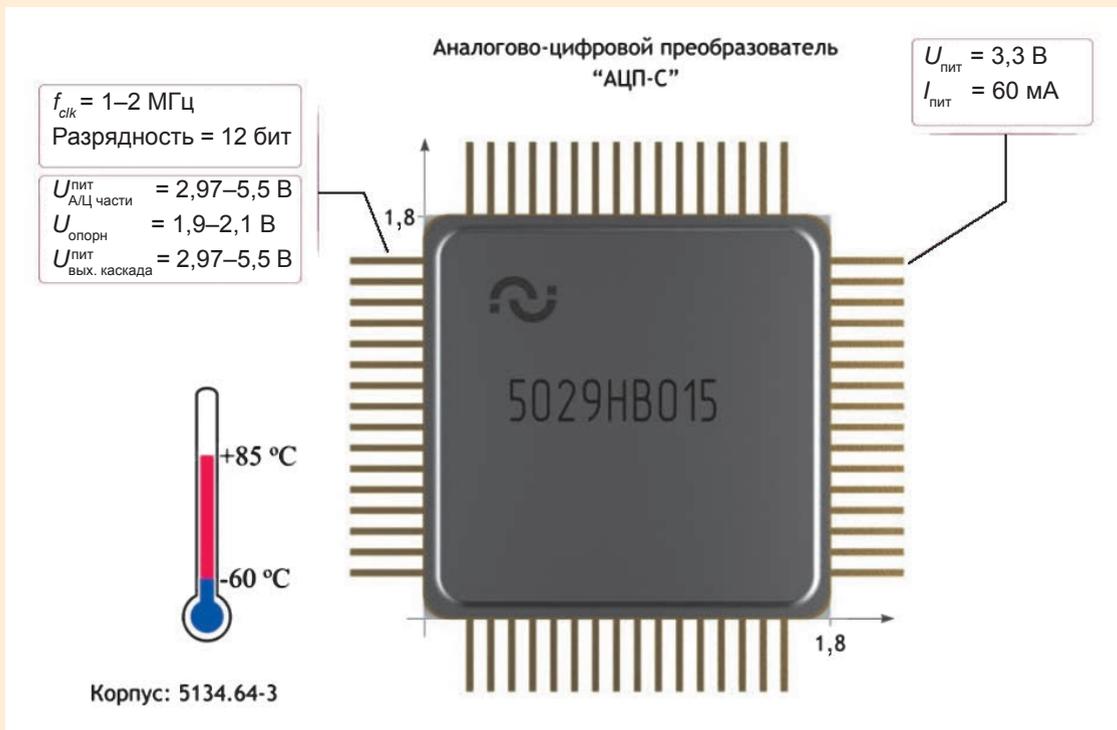
*Внешний вид комплекта ИП-АПП в состоянии транспортирования*



*Внешний вид комплекта ИП-АПП в рабочем состоянии в режиме ретрансляции и управления по радиомодемному каналу*

## СОЗДАНИЕ МИКРОСХЕМЫ 12-РАЗРЯДНОГО АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

В 2021 г. завершена разработка микросхемы 12-разрядного аналого-цифрового преобразователя (АЦП), предназначенного для применения в аппаратуре телеметрии. Частота тактового сигнала АЦП 2,0 МГц, номинальное напряжение питания 3,3 В. Микросхема работает в диапазоне температур от  $-60 + 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



Внешний вид микросхемы аналого-цифрового преобразователя 5029HB015

