

ИНСТИТУТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ГАЗОДИНАМИКИ И ФИЗИКИ ВЗРЫВА (ИФВ)

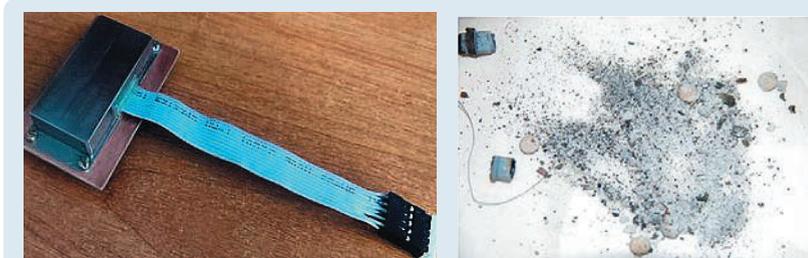
МАЛОГАБАРИТНОЕ УСТРОЙСТВО ЭКСТРЕННОГО УНИЧТОЖЕНИЯ РАДИОЭЛЕМЕНТОВ

Устройство представляет собой конструктивно законченное изделие, способное менее чем за 10 мс физически разрушить без возможности восстановления радиоэлементы, носители информации. Изделие изготавливается полностью на отечественной электронной компонентной базе и не имеет действующих аналогов.

Полученные технические решения направлены на экспертизу ФИПС.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МОЩНЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ СОСТАВОВ

Проведены экспериментальные исследования взрывчатых составов (ВС) на основе индивидуального взрывчатого вещества ГАВ (CL-20). Данные составы имеют на 4–5 % более высокие начальные плотности и скорости детонации по сравнению с применяющимися в настоящее время мощными составами на основе октогена-

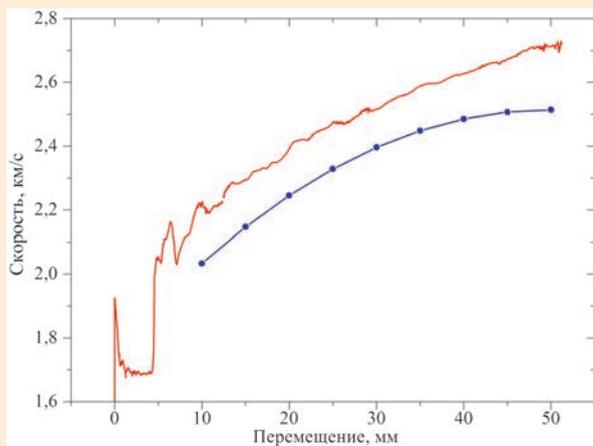


Внешний вид опытного образца устройства с имитатором разрушаемого носителя информации (слева) и результат работы устройства (осколки кристалла микросхемы)

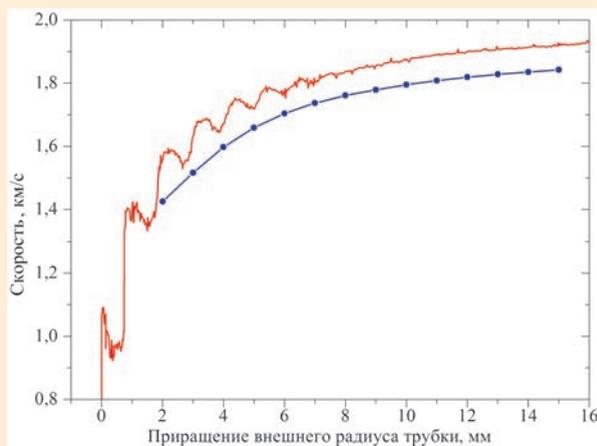
на, следовательно, метательная способность ВС на основе ГАВ также выше. На рисунках приведены результаты сравнительных экспериментов по исследованию метательного действия продуктов взрыва ВС на основе октогена и ГАВ. Видно, что метательная способность ВС на основе ГАВ примерно на ~10 % выше по сравнению с наиболее энергичным составом на основе октогена. Проведенные инженерные расчеты и математическое моделирование кумулятивных зарядов с взрывчатыми составами на основе ГАВ свидетельствуют об увеличении бронепробития на 7 % по сравнению с зарядом на основе октогена.

ПРИМЕНЕНИЕ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ УДАРНО-ВОЛНОВОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ДЕТАНАЦИИ ВО ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВАХ

Радиография с применением синхротронного излучения (СИ) позволяет «снимать» рентгеновское «кино» с частотой 8 МГц, т. е. получать рентгеновские снимки каждые 125 нс. Это свойство обусловлено применением для генерации СИ кольцевых ускорителей и чрезвычайно полезно при исследовании взрывных процессов.

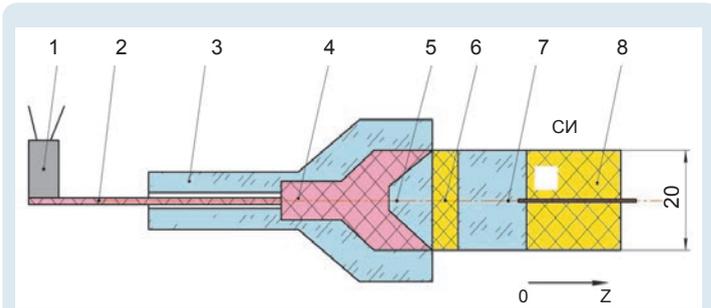


а



б

Зависимости скорости стальной пластины от перемещения (а) и скорости медной трубки от приращения ее внешнего радиуса (б): — — ВВ на основе ГАВ, —•— ВВ на основе октогена



Экспериментальная сборка для исследования ударно-волнового возбуждения детонации:

1 – электродетонатор, 2–5 – генератор ударной волны, 6 – инициатор, 7 – преграда из оргстекла, 8 – исследуемый заряд ВВ

Рентгенографирование динамики перехода ударной волны (УВ) в детонационную (ДВ) осуществлялось с помощью СИ от ускорителя ВЭПП-3 (ИЯФ СО РАН) полосой с высотой 0,1 мм вдоль оси сборки с временем экспозиции ~1 нс. Как видно, применение СИ позволило в одном эксперименте получить информацию о скорости инициирующей УВ и возбужденной ДВ, определить место перехода к детонации, а также получить информацию об УВ, распространяющейся в обратном направлении, что было невозможно при привлечении других методов.

Полученная информация полезна для развития расчетных моделей возбуждения детонации.

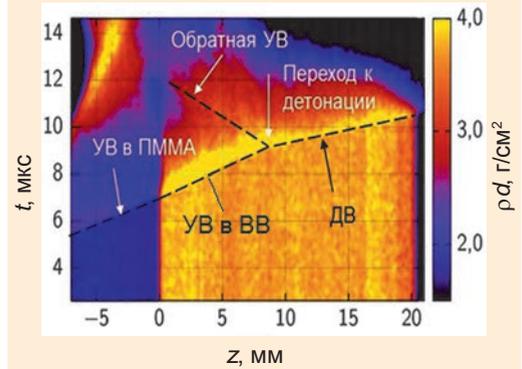
НОВЫЙ СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ, СОДЕРЖАЩИХ НАНОДИСПЕРСНЫЙ АЛЮМИНИЙ

Разработан новый способ получения высокоэнергетических композитов, содержащих нанодисперсный алюминий.

Ультразвуковая обработка суспензии нанодисперсного алюминия в растворе, содержащем взрывчатое вещество, позволяет при определенных условиях получать композит,

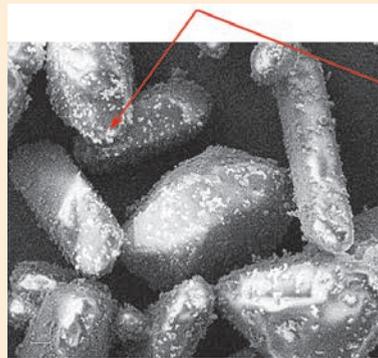
в котором частицы алюминия непосредственно включены в структуру высокоэнергетического материала. Такой характер распределения металлического компонента подтвержден разработанным методом контроля наличия частиц алюминия внутри кристаллов ВВ.

Полученные композиты могут представлять интерес для применения в ситуациях, когда требуется максимально быстрая кинетика взаимодействия металлического горючего с высокоэнергетическим компонентом. В частности, показана перспективность их применения в средствах лазерного инициирования.

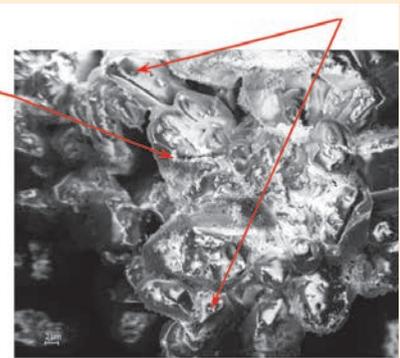


Динамика рентгеновской плотности вдоль оси заряда

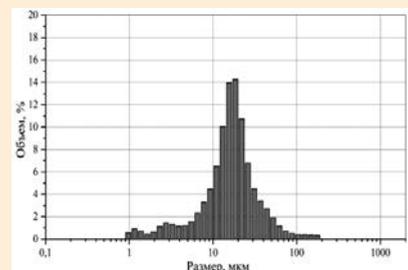
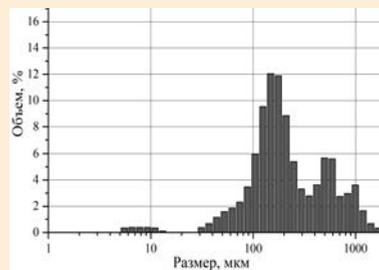
Частицы алюминия на поверхности кристаллов гексогена



Частицы алюминия, включенные в структуру кристалла гексогена



а



б

Электронные изображения алюминизированных композитов ВВ на основе гексогена (а) и гистограммы объемного распределения частиц по размерам в алюминизированном композите ВВ, соответствующие электронным изображениям (б)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ И УДАРНО-ВОЛНОВОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПЛАСТИФИЦИРОВАННОГО ОКТОГЕНА ОТ ДИСПЕРСНОСТИ НАПОЛНИТЕЛЯ

Выявлена аналогия в зависимостях энергии сигналов акустической эмиссии (АЭ) и параметров, характеризующих ударно-волновую чувствительность (УВЧ) октогена, от дисперсности наполнителя.

Наибольшие глубину возбуждения, время задержки детонации и, соответственно, наиболее низкую УВЧ имеют детали на основе октогена с соотношением крупной и мелкой фракций 50/50. Они же имеют максимальную суммарную энергию импульсов АЭ.

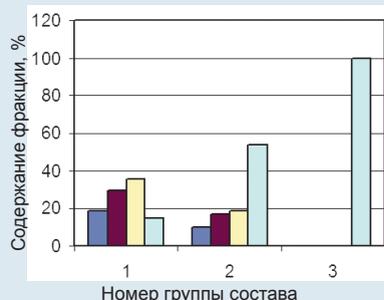
Полученные зависимости свидетельствуют об идентичности механизмов развития процесса деформирования ВВ при данных видах воздействия и могут стать основой развития нового направления в использовании метода АЭ для изучения механизмов деформирования ВВ в ударной волне, предшествующих началу взрывчатого превращения.

О ВОЗМОЖНОМ ВЛИЯНИИ ПОР И ДРУГИХ СТРУКТУРНЫХ ДЕФЕКТОВ НА ТЕМПЕРАТУРУ ПОЛИМОРФНОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ ОКТОГЕНА

Экспериментальные исследования полиморфного превращения октогена $\beta \rightarrow \delta$ в зависимости от размера кристаллов проведены методами дифференциально-термического анализа и пикнометрическим методом измерения плотности кристаллов. Показано, что в условиях экспериментов воздействием ряда факторов (давления, изменения плотности материала, обусловленного присутстви-

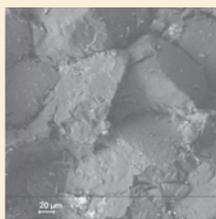
Параметры акустической эмиссии и Ударно-волновой чувствительности

Соотношение фракций октогена крупная/мелкая, %	Суммарная энергия импульсов АЭ, усл. ед.	Глубина возбуждения детонации, мм	Время задержки детонации, мкс
50/50	1205520	$8 \pm 0,1$	$1,35 \pm 0,02$
100/0	299348	$7,6 \pm 1,2$	$1,23 \pm 0,05$
0/100	2378	$6,5 \pm 0,3$	$1,11 \pm 0,03$

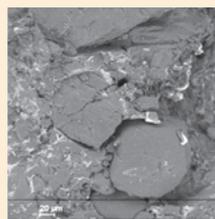


Содержание различных фракций октогена в составе групп:

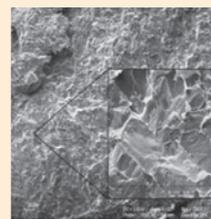
■ – более 350 мкм; ■ – 25–350 мкм; ■ – 10–25 мкм; □ – менее 10 мкм



а

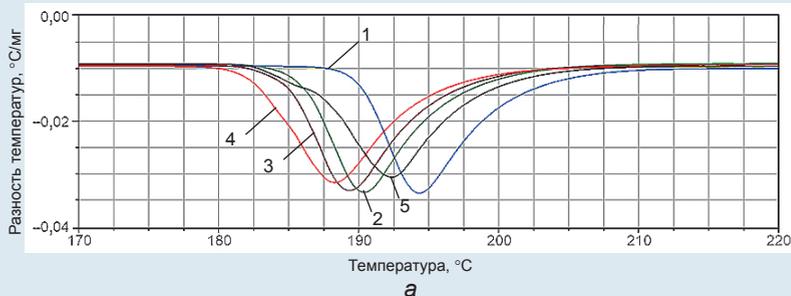


б

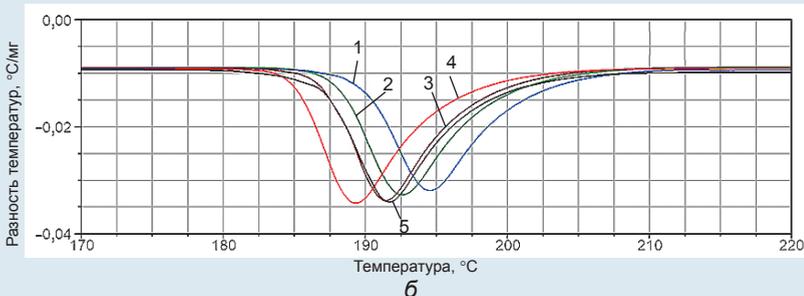


в

Электронные изображения поверхности деталей из ВВ на основе октогена в зоне их разрушения. Группы деталей: а – 1; б – 2; в – 3

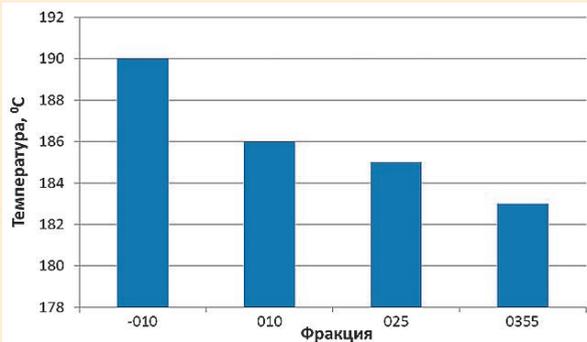


а

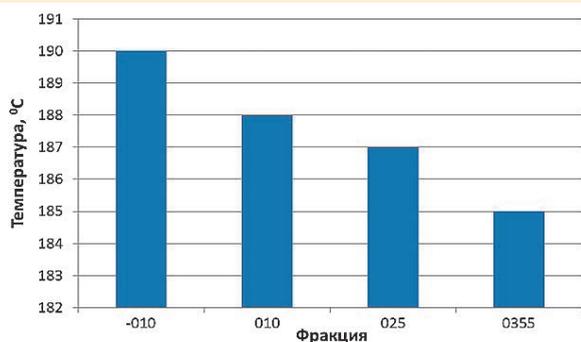


б

Кривые полиморфного превращения образцов ВВ № 1 (а) и № 2 (б) (октоген) для различных фракций: 1 – 010, 2 – 0190, 3 – 025, 4 – 0355, 5 – исходная



а



б

Температура начала полиморфного превращения различных фракций образцов № 1 (а) и № 2 (б) октогена

ем дефектов, поверхностной энергии) нельзя объяснить наблюдаемый размерный эффект.

Сделан вывод о том, что снижение температуры начала полиморфного превращения $\beta \rightarrow \delta$ октогена на 5–7 °C при увеличении размеров кристаллов от 100 до 500 мкм может быть связано с зависимостью скачка энтальпии на фазовом переходе от структурных дефектов.

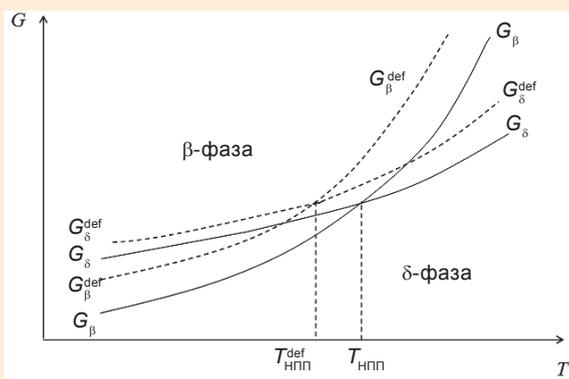
ВЗРЫВОЗАЩИТНАЯ КАМЕРА ДЛЯ ДВУХРАКУРСНОЙ РЕНТГЕНОГРАФИИ С НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТЬЮ ДО 1 КГ ТЭ

Экспериментальную отработку прошла двухконтурная взрывозащитная камера (ВЗК) с несущей способностью 1 кг ТЭ. Конструкция ВЗК состоит из двух независимых контуров: внутренней камеры, воспринимающей импульсное (взрывное) воздействие, и внешней камеры, обеспечивающей герметичное удержание продуктов взрыва в случае аварийной разгерметизации внутреннего контура. Новые технические решения, заложенные в конструкции, защищены патентом РФ.

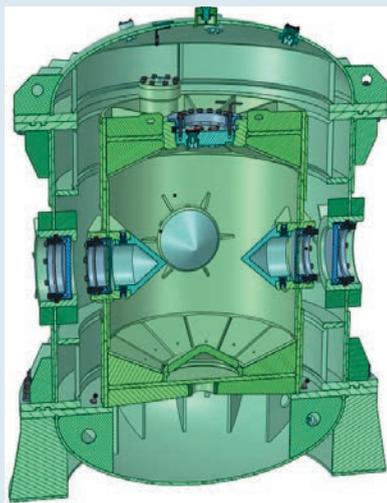
Экспериментальные исследования ВЗК при нагрузках, в 2 раза превышающих номинальные, подтвердили взрывостойкость внутренней камеры



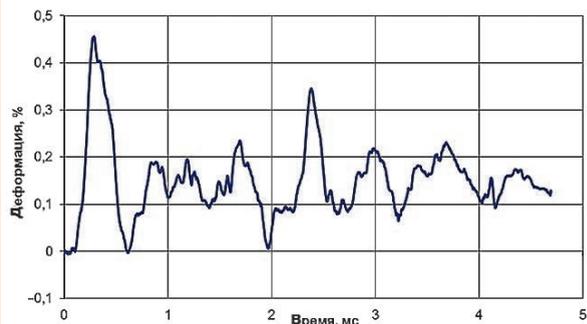
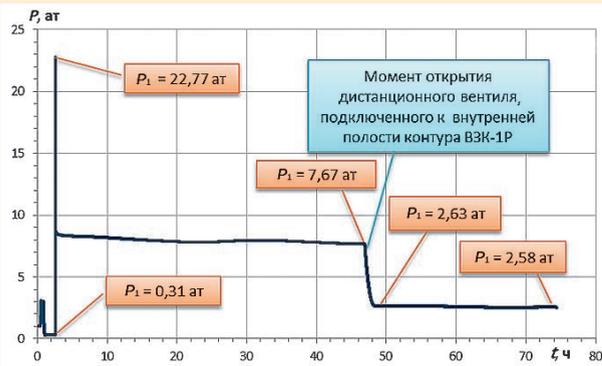
Электронно-микроскопическая фотография микропор и трещин, обнаруженных в кристаллах октогена ($\times 11000$)



Влияние структурных дефектов на вид функции свободной энергии Гиббса (G) и температуру $T_{\text{HПП}}$ полиморфного перехода $\beta \rightarrow \delta$ в октогене



ВЗК-1Р (масса 3,6 т, $\text{Ø}1,6 \times 1,9$ м)



Характерные графики давления и деформации, полученные в опыте с ВЗК-1Р на двухкратную нагрузку

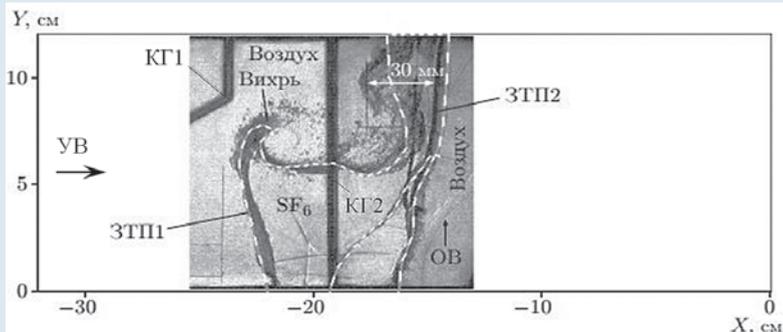
и показали, что конструкция сохраняет свою прочность и герметичность, элементы ее силового корпуса работают в области упругих и незначительных пластических деформаций.

При испытании нарастающим внутренним давлением газа внешняя камера сохранила герметичность при давлении ~ 20 атм, что превышает ожидаемое расчетное значение давления в ее полости при мгновенном выходе горячих продуктов взрыва из внутренней камеры в случае разгерметизации.

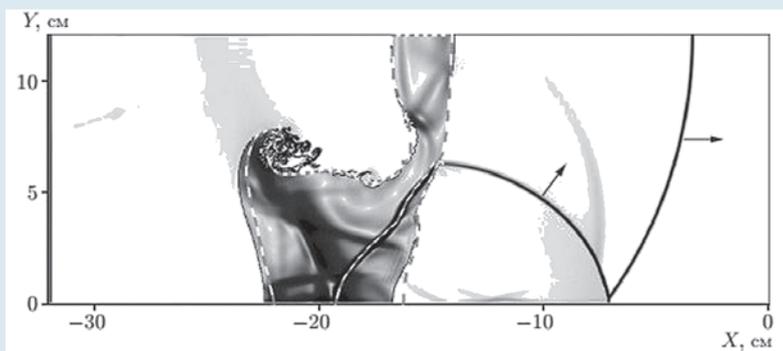
Конструкция ВЗК с повышенными требованиями к прочностной надежности будет применяться в качестве защитного контура в экспериментах по исследованию динамических свойств конструкционных материалов с использованием двухкратурной рентгенографии.

РАЗВИТИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ В ДВУМЕРНЫХ ТЕЧЕНИЯХ

В мишенях инерциально-термоядерного синтеза при имплозии развиваются гидродинамические неустойчивости Рихтмайера – Мешкова, Кельвина – Гельмгольца, Рэлея – Тейлора. Эти неустойчивости со временем приводят к турбулентному перемешиванию



а



б

Экспериментальная (а) и расчетная (б) формы центрального слоя при регулярном взаимодействии ударной волны с контактными границами (КГ): штриховые линии – границы центрального слоя; стрелки – направление течения; ЗТП1, ЗТП2 – зоны турбулентного перемешивания на КГ1 и КГ2 соответственно; УВ – направление ударной волны; ОБ – отраженная волна

термоядерного горючего и оболочки мишени, что может препятствовать зажиганию горючего. Для расчета развития этих неустойчивостей применяются численные методы, которые должны быть протестированы

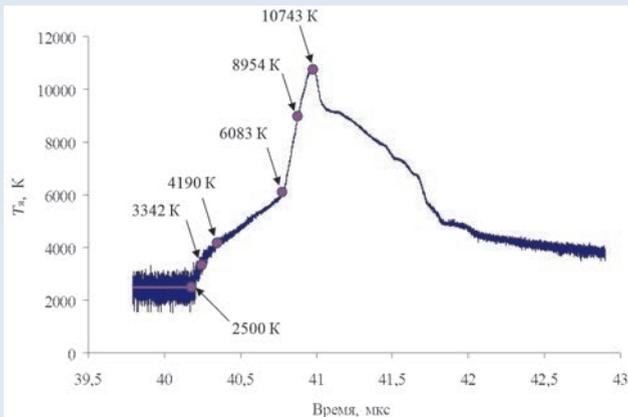
на экспериментальных данных. В ИФВ проведена серия экспериментов по исследованию развития неустойчивостей и турбулентности в слоистых газовых системах при двумерном течении, в котором одно-

временно действуют неустойчивости Рихтмайера – Мешкова и Кельвина – Гельмгольца. Установлено, что в таких течениях динамика неустойчивостей достаточно сложная. Отработка технологии счета позволила протестировать методики ИТМФ и получить удовлетворительное согласие эксперимента и расчета.

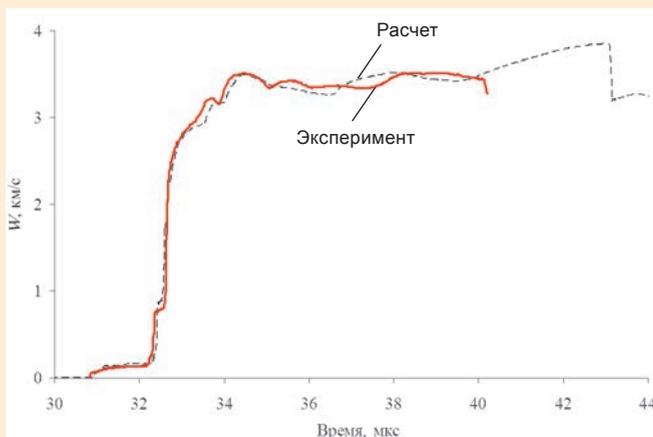
КВАЗИИЗОЭНТРОПИЧЕСКОЕ СЖАТИЕ НЕИДЕАЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ ГЕЛИЯ ПРИ ПОСТОЯННОЙ КОНЕЧНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ ~ 21000 К В ОБЛАСТИ ДАВЛЕНИЙ ДО 600 ГПа

Представлены данные по квазиизоэнтропической сжимаемости сильно-неидеальной плазмы гелия в области давлений 250–600 ГПа в устройствах цилиндрической геометрии. Впервые в практике подобных исследований измерены температура на фронте цилиндрической ударной волны в гелии $T \sim 10000$ К и скорость полета внутреннего каскада $W \sim 3,5$ км/с, в полости которого и достигается максимальная плотность сжатой плазмы. Тщательная проработка конструкций экспериментальных устройств позволила получить данные о сжатии неидеальной плазмы гелия до плотности $\rho \approx 3$ г/см³ при приблизительно постоянной конечной температуре $T \sim 21000$ К.

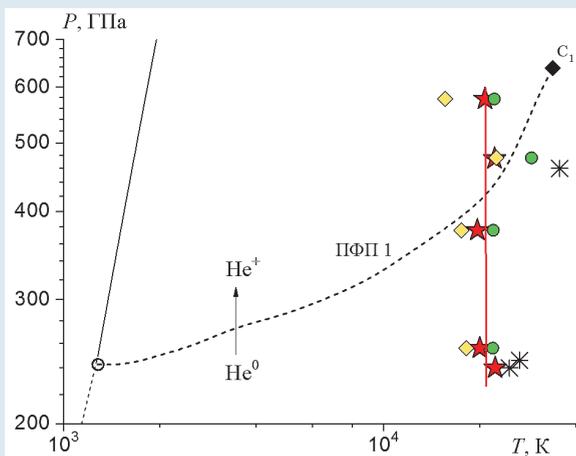
Траектории движения металлических оболочек, сжимающих плазму, регистрировались с помощью мощных импульсных источников рентгеновского излучения с граничной энергией электронов до 60 МэВ. Плотность плазмы гелия определялась по измеренному радиусу оболочек в момент их «остановки». Давление сжатой плазмы получено на основе газодинамических расчетов, учитывающих



Экспериментальная яркостная температура на фронте ударной волны в плазме гелия в зависимости от времени



Скорость движения внутренней границы оболочки экспериментального устройства



Термодинамические параметры неидеальной плазмы гелия. Эксперимент: * – [1], ★ – данные ИФВ 2022 г., — — средняя изотерма $T_{cp} = 21045$ К.

Расчет: ---- граница плазменного фазового перехода из атомарного состояния гелия в состояние однократно ионизованной плазмы [2], ◆ – критическая точка плазменного фазового перехода [2], ○ – гипотетическая тройная точка [2], ◇ – расчет температуры в химической модели, ● – то же с использованием УРС квантовой молекулярной динамики [3]

реальные характеристики экспериментальных устройств.

Проведены сравнительные расчеты параметров квазиизоэнтропического сжатия по двум теоретическим моделям: традиционной химической модели плазмы и в рамках «первопринципного» подхода – квантовой молекулярной динамики.

В ходе исследования аномалия экспериментальных данных в области давлений теоретически предполагаемого плазменного фазового перехода в гелии не зарегистрирована.

Список литературы

1. Жерноклетов М. В., Грязнов В. К., Аринин В. А. и др. Квазиизоэнтропическое сжатие плотного газообразного гелия в области давлений до 500 ГПа // Письма в ЖЭТФ. 2012. Т. 96. С. 479–483.

2. Эбелинг В., Фёрстер А., Фортов В. Е. и др. Теплофизические свойства горячей плотной плазмы. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2007.

3. Мочалов М. А., Ильяев Р. И., Фортов В. Е. и др. Квазиизоэнтропическое сжатие неидеальной плазмы дейтерия и его смеси с гелием в области давлений до 250 ГПа // ЖЭТФ. 2021. Т. 159. С. 1118.

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ДВОЙНИКИ НАГРУЖАЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ КВАЗИИЗОЭНТРОПИЧЕСКОГО СЖАТИЯ НЕИДЕАЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ

Предложена упрощенная расчетная схема нагружающего устройства [1] для исследования квазиизоэнтропического сжатия неидеальной плазмы (гидродинамический двойник). Она позволяет моделировать движение оболочек первого и второго каскадов с помощью задания на внешней границе камеры высокого давления граничного условия второго рода.

Преимуществом такого подхода является большая прозрачность и удобство представления манеры счета посредством замены подбираемых входных параметров, характеризующих нагружающее устройство, диаграммой скорости наружной границы оболочки первого каскада, проверяемой экспериментально в газодинамических опытах с полусферическими макетами нагружающих устройств и в опытах с цилиндрическими устройствами с измерительным приемником на оси.

С использованием УРС САНА для He, D₂ и полученных входных данных о гидродинамическом двойнике проведе-

на серия расчетов по двум независимым расчетным кодам разработки ИПХФ РАН: 1D-PIС [2] – код, основанный на методе конечно-размерных частиц в ячейке на неподвижных прямоугольных регулярных сетках, и код BIG2 [3], в основе которого лежит метод Годунова для четырехугольных криволинейных подвижных адаптивных сеток.

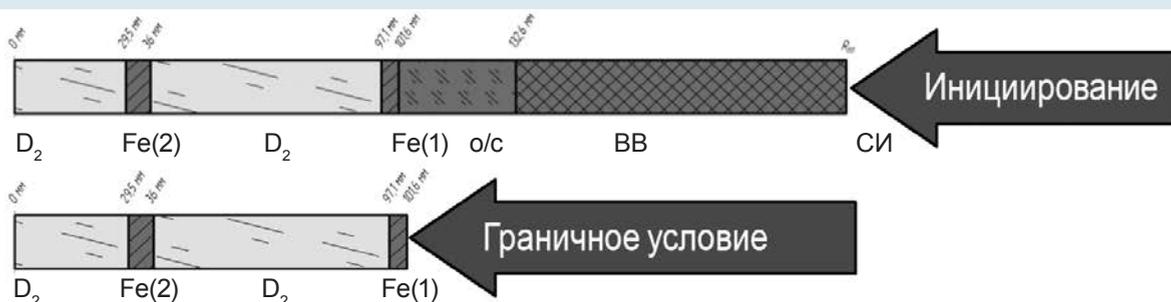
Показана возможность использования гидродинамических двойников нагружающих устройств для перекрестных расчетов с целью верификации уравнений состояния.

Список литературы

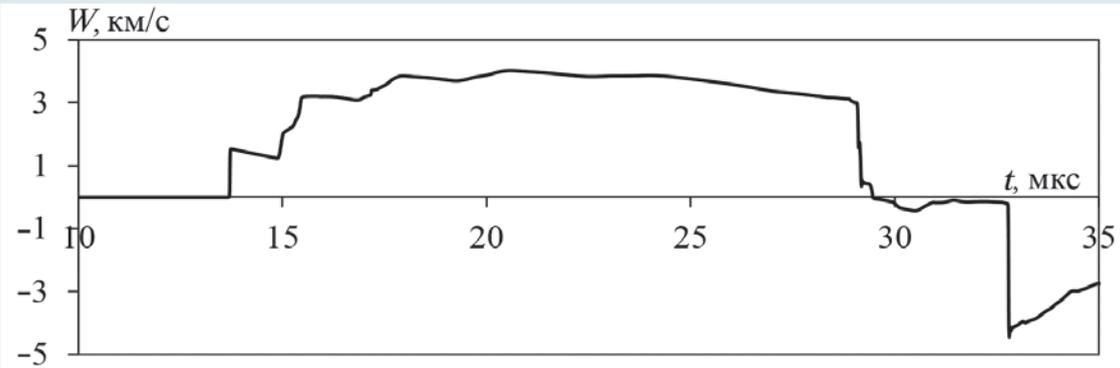
1. Мочалов М. А., Ильяев Р. И., Фортов В. Е. и др. // ЖЭТФ. 2021. Т. 160. С. 735.

2. Fortov V. E., Kim V. V., Lomonosov I. V. et al. Numerical modeling of hypervelocity impacts // Int. J. Impact Eng. 2006. Vol. 33, Issues 1–12. P. 244–253.

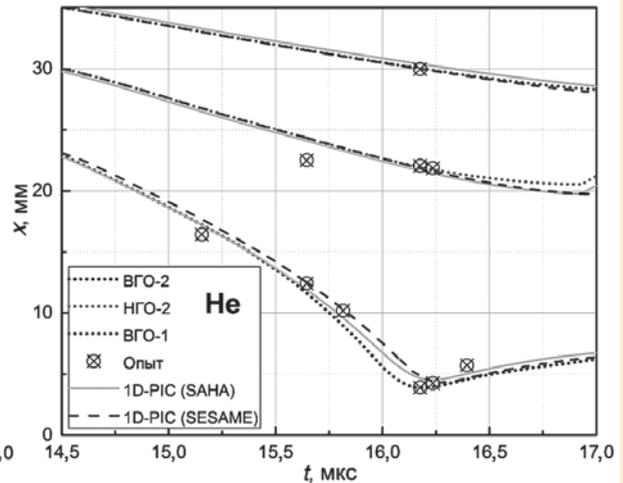
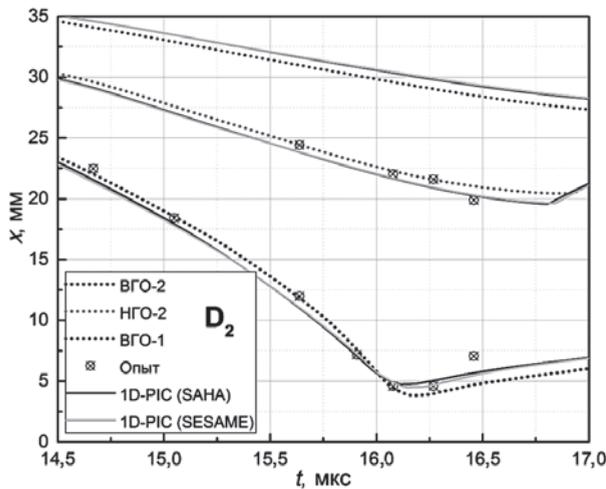
3. Fortov V. E., Goel B., Munz C. D. et. al. Numerical simulations of nonstationary fronts and Interfaces by the Godunov method in moving grids // Nucl. Sci. Eng. 1996. Vol. 123, Issue 2. P. 169.



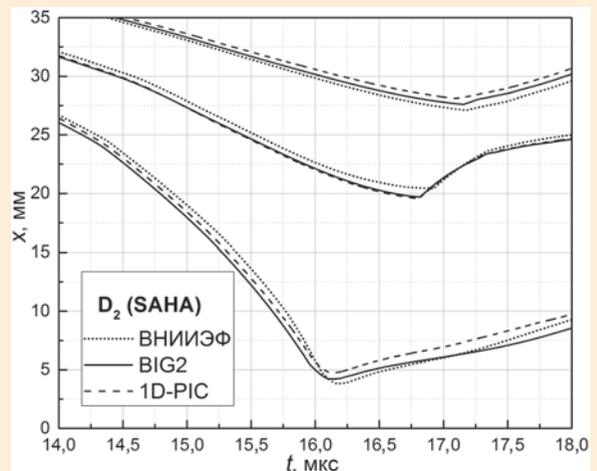
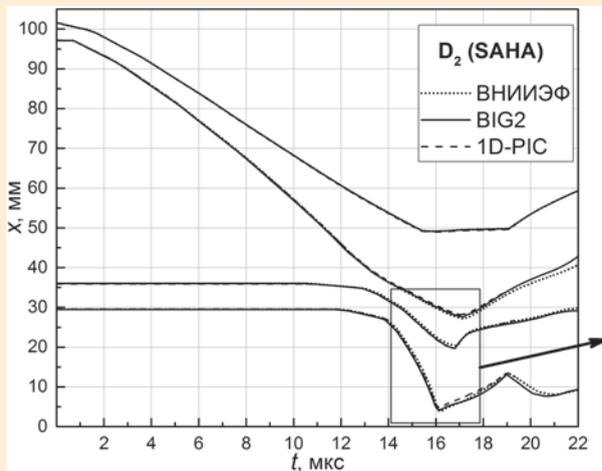
Одномерные срезы сквозного расчета и гидродинамического двойника



Зависимость скорости от времени, задаваемая как правое граничное условие



Результаты численного моделирования 1D-PIC обжатия D_2 и He с использованием УРС SAHA и SESAME



Результаты численного моделирования 1D-PIC и BIG2 обжатия D_2 с использованием УРС SAHA. Справа – более подробно в окрестности точки останова