

ВВ. Их дальнейшее развитие приводит к макроскопическому взрыву. Время индукции детонации определяется характерным временем второго этапа – роста ГТ до их соприкосновения. При характерных размерах гранул ВВ ~100 мкм и характерном времени индукции детонации ~1 мкс скорость роста ГТ должна быть не менее 50–100 м/с. Это на три порядка выше скорости обычного послойного горения ВВ. Определяющим механизмом переноса энергии является вихревой характер течения – турбулентность, которая возникает из-за многомерности процесса горения и роста ГТ и вследствие газодинамической сдвиговой неустойчивости на фронте горения. Благодаря большой интенсивности турбулентного перемешивания такие течения обладают повышенной способностью к передаче теплоты, ускоренному распространению химических реакций, в частности горения. Полученная путем численного моделирования

скорость роста ГТ более 100 м/с подтверждает гипотезу о турбулентном механизме переноса энергии в процессе роста ГТ при инициировании детонации. Физическая картина выглядит так: под действием ударной волны и в результате вихревого течения крупномасштабные частицы дробятся до мелких размеров и перемешиваются. Основной процесс энергопереноса в пространстве происходит турбулентно, при этом за счет развитой поверхности контакта ВВ и продуктов взрыва ВВ успевает прогреваться посредством молекулярной теплопроводности (передача энергии от продуктов взрыва) и продолжается интенсивная реакция разложения (горение с теплопроводностью с поверхности мелких частиц). Условно картину инициирования гетерогенных ВВ можно представить поэтапно:

1) Формирование ГТ – стадия от момента сжатия ВВ ударной волной до начала химической реакции в локальных очагах.

2) Рост горячего очага (ГТ) – развитие реакции разложения в окружающем ВВ.

3) Взаимодействие и быстрое слияние очагов – быстрое завершение реакции при высокой температуре и давлении в момент, когда реагирующие области начинают сливаться, что и обеспечивает быстрый переход к самоподдерживающемуся стационарному детонационному процессу (собственно взрыв).

На основе этих представлений создана модель кинетики детонации твердых ВВ – модель МК, которая введена в основные математические методики ИТМФ. Модель прошла тестирование на широком наборе экспериментов с различным инициирующим воздействием на ВВ в одномерных, двумерных и трехмерных расчетах. Получены наборы параметров модели для восьми составов на основе ТАТБ, октогена, гексогена, ТЭНа. Модель используется в производственных расчетах.

ИНСТИТУТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ГАЗОДИНАМИКИ И ФИЗИКИ ВЗРЫВА (ИФВ)

Впервые получены экспериментальные данные о сжимаемости дейтерия при давлениях до 2000 ГПа. Настоящие исследования явились логическим продолжением измерений сжимаемости водорода, выполненных во ВНИИЭФ в 1970-е годы группой С. Б. Кормера, в диапазоне давлений до 1300 ГПа. Взрывное обжатие дейтерия осуществлялось системой сферически сходящихся ударных волн, циркулирующих в объеме газа, и под действием стальной оболочки, сходящейся к центру. Теневое изображение границ оболочки, сжимающей газообразный дейтерий, получено с одновременным использованием тормозного излучения трех мощных бе-

татронов, что позволило за один эксперимент зарегистрировать девять фаз движения оболочки и проследить за динамикой процесса сжатия. При начальном давлении дейтерия $P_0 = 267$ атм и температуре $T_0 = 10,5$ °С (плотность газообразного дейтерия $\rho_0 = 0,04$ г/см³) измерена средняя плотность сжатого газа $\rho = \bar{\delta} \rho_0 = 4,3 \pm 0,7$ г/см³. Здесь $\bar{\delta} = (R_0/R_{\min})^3$, где R_0 – радиус внутренней границы сферической оболочки в исходном состоянии; ρ_0 – начальная плотность газа, R_{\min} – радиус полости в момент «остановки» оболочки. Давление в дейтериевой плазме определяется из газодинамических расчетов с учетом реальных термодинамических и прочностных

свойств элементов экспериментального устройства.

Для исследования возможности получения экспериментальных данных о квазиизэнтропической сжимаемости изотопов водорода и гелия при давлениях до 3000 ГПа проведены эксперименты с использованием специально разработанных сферических двухкаскадных взрывных устройств с газовой симметризацией. Основной трудностью в проведении подобных экспериментов является обеспечение симметрии сжатия полости с газом. Отклонения от сферической симметрии приводят к росту погрешности определения средних плотностей сжатых газов. Анализ результатов экспе-

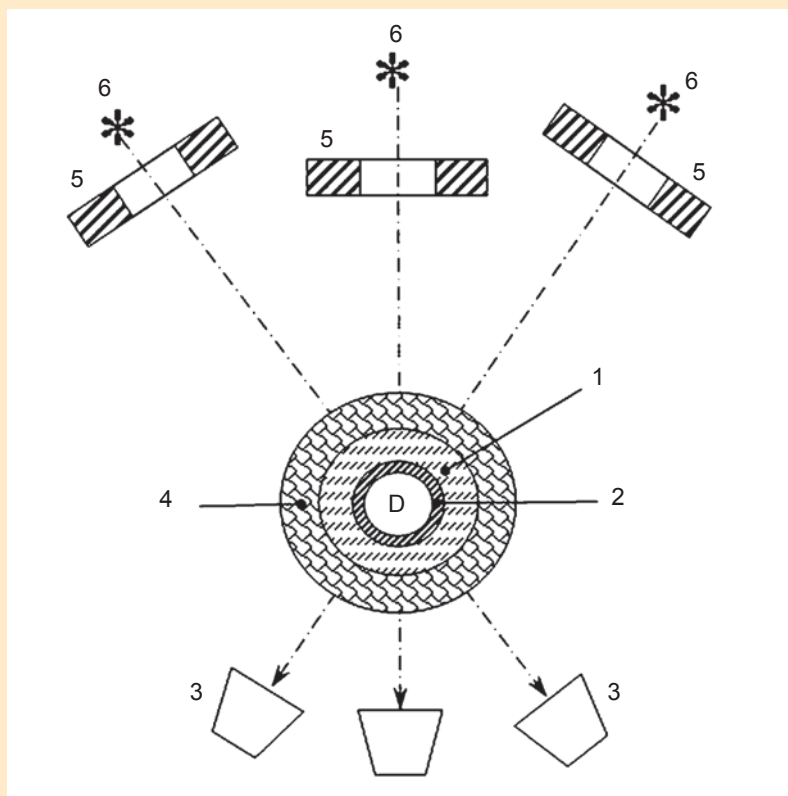
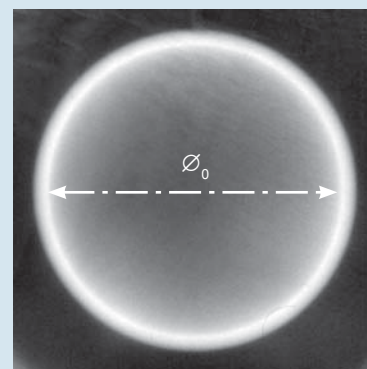
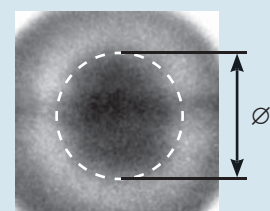


Схема эксперимента по сжимаемости дейтерия:
1 – прокладка (полиэтилен); 2 – сферическая камера;
3 – электронно-оптические регистраторы; 4 – заряд ВВ;
5 – защитное устройство; 6 – источники излучения

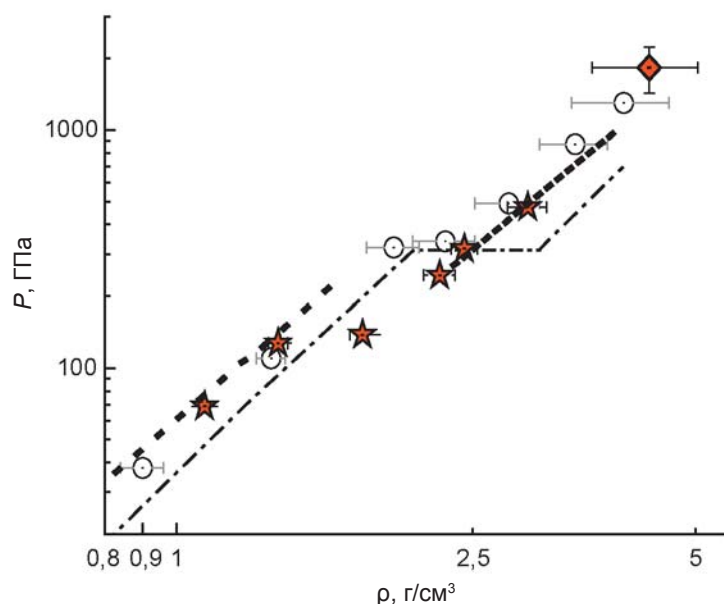


а



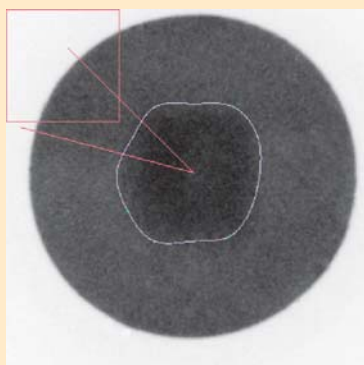
б

Рентгеновское изображение сферической оболочки с газообразным дейтерием:
а – в исходном состоянии (\varnothing_0 – масштаб 1:2);
б – в момент максимального сжатия (\varnothing_1 – масштаб 1:1)

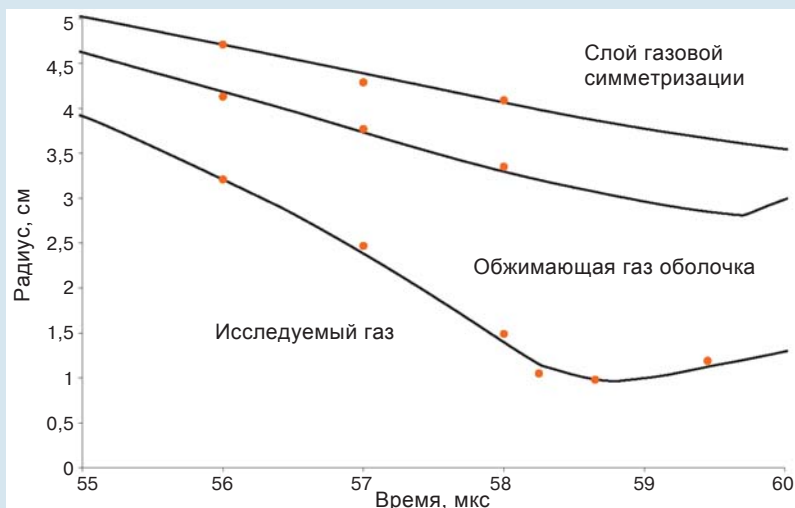


Квазиизэнтропическое сжатие газообразного дейтерия в области давлений до 1800 ГПа: — — —, — — — — расчет; ○, ★, ◆ — эксперимент

риментов показал, что экспериментальные данные удовлетворительно описываются численным расчетом при использовании существующих уравнений состояния (УРС) дейтерия. Эксперименты подтвердили возможность получения надежной информации о сжимаемости дейтерия и гелия до плотностей $\sim 5 \text{ г/см}^3$ и давлений 2000–3000 ГПа. Использование газовой симметризации в разработанных экспериментальных блоках позволило обеспечить приемлемый уровень симметрии сжатого газа. Результаты проведенных и планируемых экспериментов будут использоваться для проверки УРС изотопов водорода и гелия, а также для тестирования двумерных и трехмерных методик численных расчетов различных взрывных устройств, в том числе в целях осуществления инерциального термоядерного синтеза.



Рентгеновский снимок газовой полости на момент времени, близкий к максимальному сжатию газа. Выделенный контур поверхности полости получен методом функциональной трассировки с помощью численной обработки оцифрованного изображения

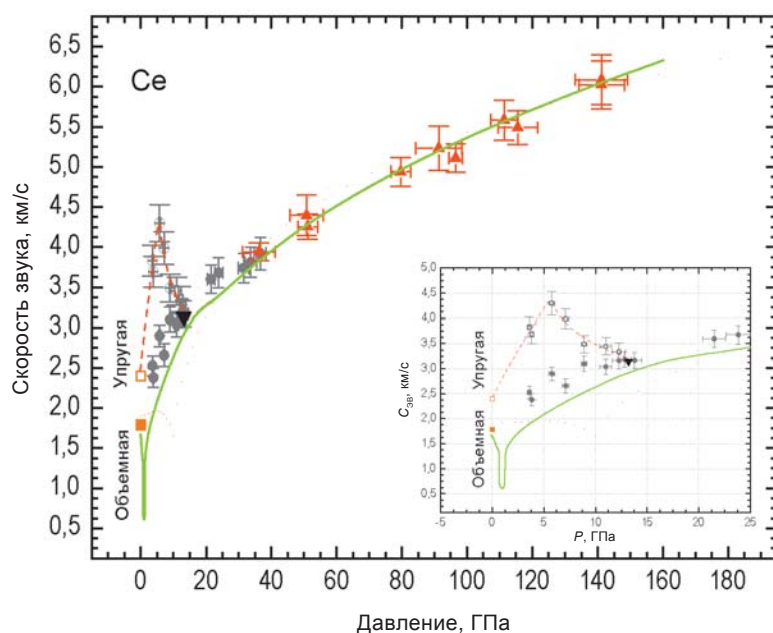


Численное моделирование результатов эксперимента:
— расчетные радиусы границ оболочек, обжимающих газ;
● — экспериментальные средние радиусы оболочек

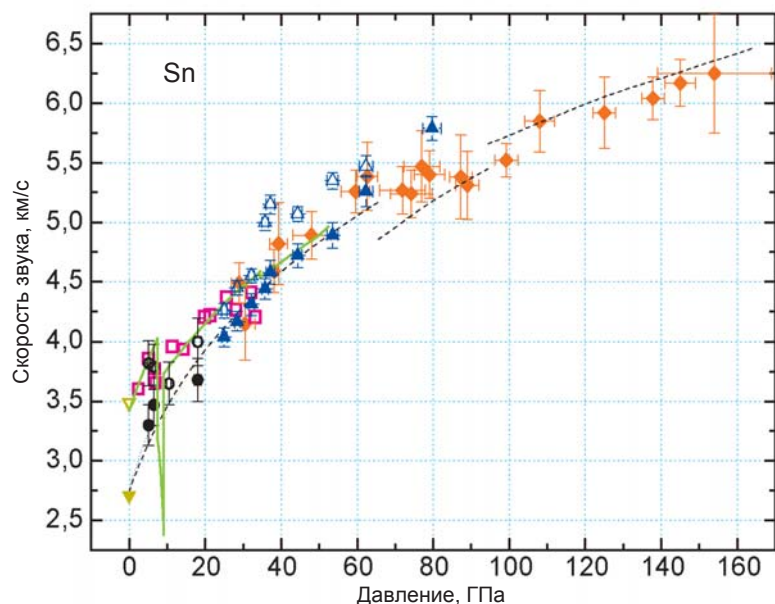
Завершен этап исследований фазовых превращений в церии, олове и природном уране по измерению в них скоростей звука за фронтом ударных волн. Церий обладает необычными по сравнению со многими металлами свойствами. К их числу относятся существование критической точки в твердом состоянии на линии изоморфного (γ - α) превращения, аномальное поведение сжимаемости, теплового расширения, теплоемкости и др. Специфичность характеристик церия связана с особенностями изменения при сжатии структуры его электронной оболочки, обусловленными переходом 4f-электронов на уровень 5d. Сложная фазовая диаграмма церия, реализующаяся в области относительно невысоких давлений ($P \leq 25$ ГПа), является причиной формирования многоволновой структуры как при его ударном сжатии, так и последующей разгрузке. Сложную фазовую диаграмму имеет также олово. Поэтому церий и олово являются удобными материалами для ударно-волновых исследований, направленных на получение многофазных УРС и прочностных характеристик.

Измерения скорости звука выполнены с помощью методик индикаторных жидкостей и мanganового датчика давления. По полученным зависимостям скорости звука от давления выявлены границы областей плавления для исследуемых металлов на ударной адиабате. Уста-

новлено, что церий находится в расплавленном состоянии при давлениях более 13 ГПа. Область плавления γ -Sn на ударной адиабате соответствует диапазону давлений 60–90 ГПа. Для природного урана диапазон давлений плавления составляет ~130–160 ГПа.



Зависимость скорости звука в церии от давления ударного сжатия:
— аппроксимация; □, ●, ○, ▲ — данные ВНИИЭФ;
— расчет по УРС ВНИИЭФ; ▼, ■ — данные других авторов



Зависимость скорости звука в олове от давления ударного сжатия:
 ∇ , \circ , \bullet , \blacklozenge – данные ВНИИЭФ; ∇ , \square , \triangle , \triangleleft – данные зарубежных авторов;
 —, — — — — расчетные кривые других авторов

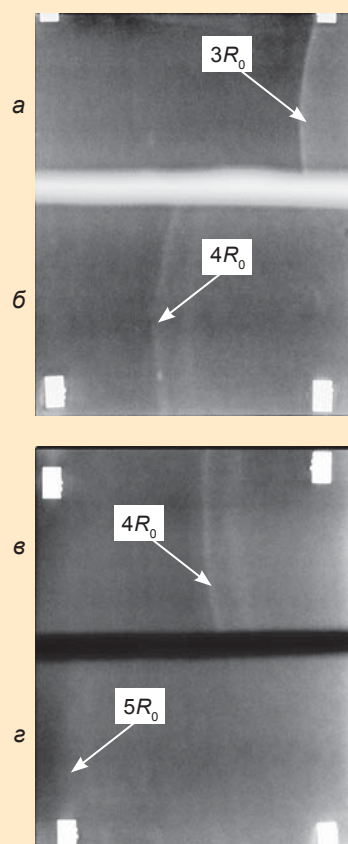
Определены параметры ударной волны – интенсивность и время действия, – при которых металлы (медь и тантал) испытывают разупрочнение. Известно, что с увеличением давления и деформации металлов в ударных волнах происходит изменение их микроструктуры – появляется большое количество микродвойников, плотность дислокаций достигает максимальных значений и в результате происходит упрочнение металлов. Однако на механические свойства и микроструктуру кроме амплитуды ударной волны (σ_x) влияет и время ее действия (t_{yb}). В сильных ударных волнах ($\sigma_x > 70$ ГПа) реализуется температура, значительно превышающая температуру отжига. Чем выше температура, тем меньше необходимо времени для отжига и рекристаллизации металлов. Так, при воздействии на тантал ударной волны интенсивностью $\sigma_x \approx 100$ ГПа и временем действия $t_{yb} \approx 0,25$ мкс в микроструктуре наблюдаются полосы локализованного сдвига двойниковой природы. Толщина двойников 0,3–0,8 мкм, а их объем-

ная доля составляет ~15 %. При увеличении времени действия ударной волны до $t_{yb} = 0,75$ мкс объемная доля микродвойников уменьшается до ~6 %. С увеличением времени действия ударной волны происходит снижение механических свойств меди и тантала. Проведенные исследования позволяют оценить время разупрочнения τ исследуемых металлов в сильных ударных волнах. В меди $\tau \geq 2$ мкс при $\sigma_x = 70$ ГПа, в тантале $\tau \geq 0,7$ мкс при $\sigma_x = 100$ ГПа.

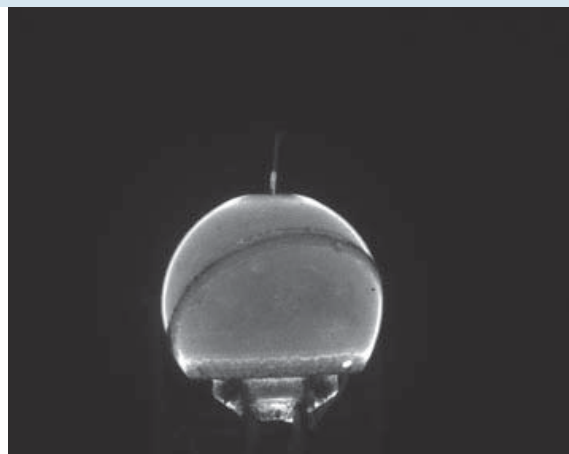
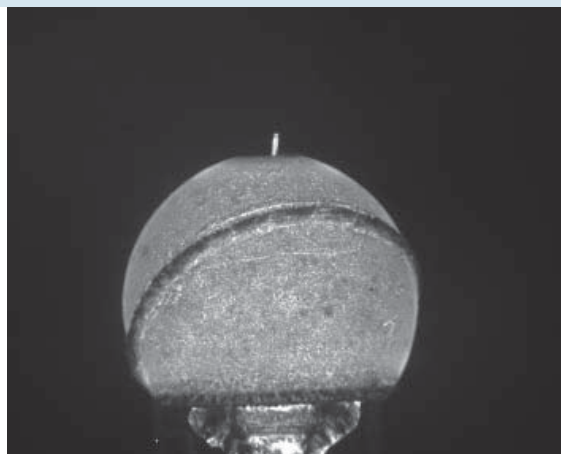
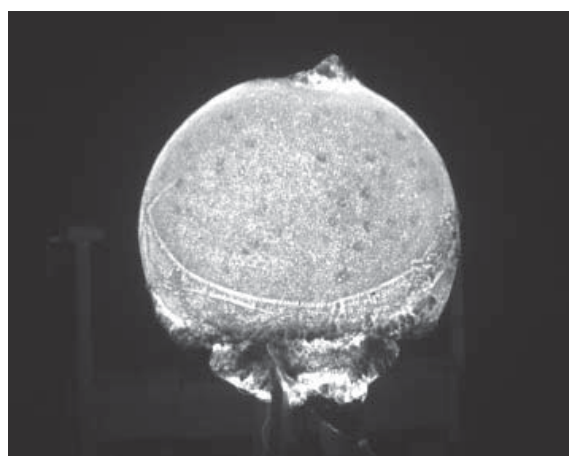
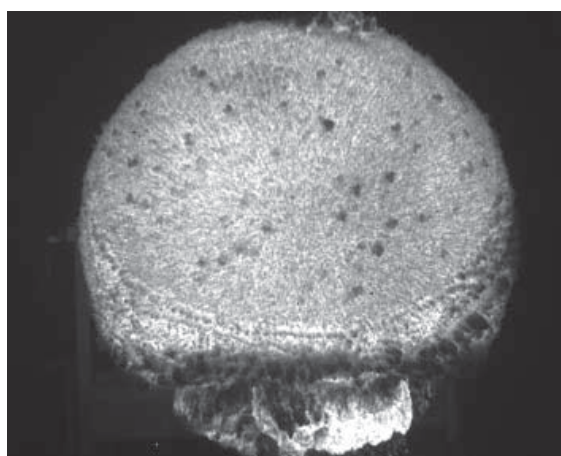
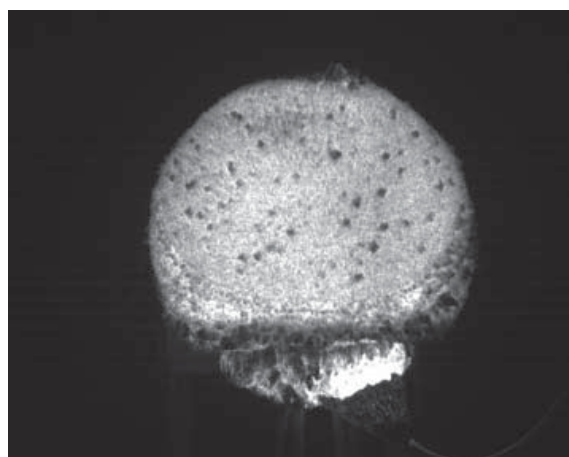
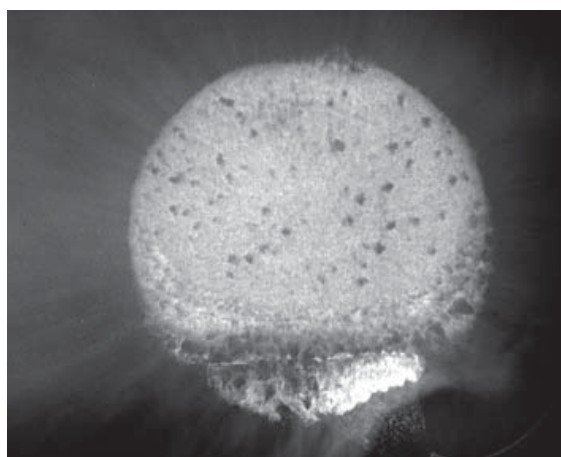
Проведены взрывные эксперименты по исследованию турбулизации границы раздела разлетающихся продуктов взрыва и воздуха на сферических зарядах, содержащих жидкую взрывчатую смесь тетранитрометана и нитробензола. Для регистрации зоны формирования воздушной ударной волны применялись:

- двухкадровая импульсная рентгеновская установка с граничной энергией гамма-квантов 1,0 МэВ и системы регистрации на основе фотохромных экранов;
- оптическая регистрация на основе матричных кремние-

вых сенсоров и системы оптического переноса с переменным фокусным расстоянием (обеспечивает фотосъемку полноформатного кадра с малой экспозицией (100–500 нс) с разрешением 1280×1024 пикселя). Выявленная на относительном радиусе $4R_0$ двойная структура профиля плотности подтверждает возникновение и развитие зоны турбулентного перемешивания продуктов детонации и сжатого воздуха. С увеличением относительного радиуса регистрации на поверхности ударной волны появляются темные пятна (участки с пониженной температурой), их количество и размеры увеличиваются. Структура светящейся поверхности отражает процесс перемешивания «холодных» продуктов детонации и «горячего» сжатого в ударной волне воздуха.



Рентгенограммы зоны взаимодействия продуктов детонации и воздушной ударной волны на разные моменты времени:
 а – $t = 44$ мкс; б – $t = 64$ мкс;
 в – $t = 64$ мкс; г – $t = 94$ мкс

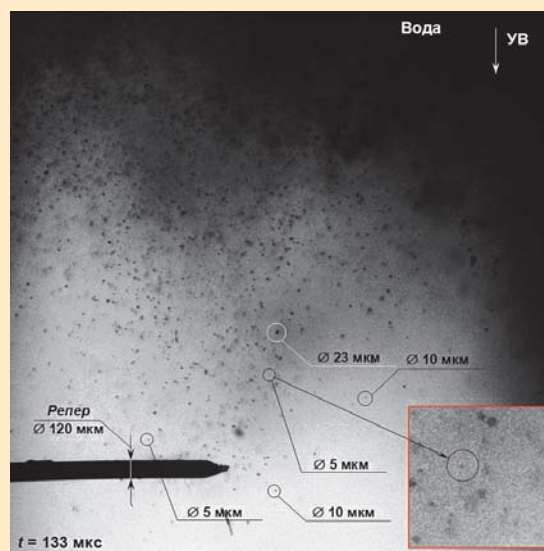
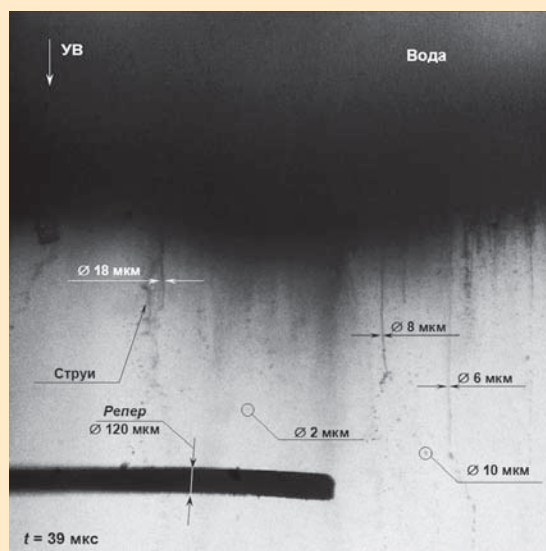
 $3R_0$ ($t = 44$ мкс) $4R_0$ ($t = 64$ мкс) $\sim 4R_0$ ($t = 65$ мкс) $5R_0$ ($t = 94$ мкс) $6R_0$ ($t = 111$ мкс) $7R_0$ ($t = 128$ мкс)

Последовательные оптические изображения разлетающейся сферы продуктов детонации и светящейся воздушной ударной волны с возмущениями

Начальная стадия процесса диспергирования жидкости под действием ударной волны является достаточно сложным и малоизученным процессом. При помощи

микроскопического электронно-оптического метода обнаружено, что из свободной поверхности ударно-нагруженной воды изначально выбрасываются тонкие (от единиц микрон) струи, которые

со временем распадаются на капли. Образование таких струй можно связать с наличием пузырьков газа в жидкости, которые определенным образом приводят к эффектам микрокумуляции.

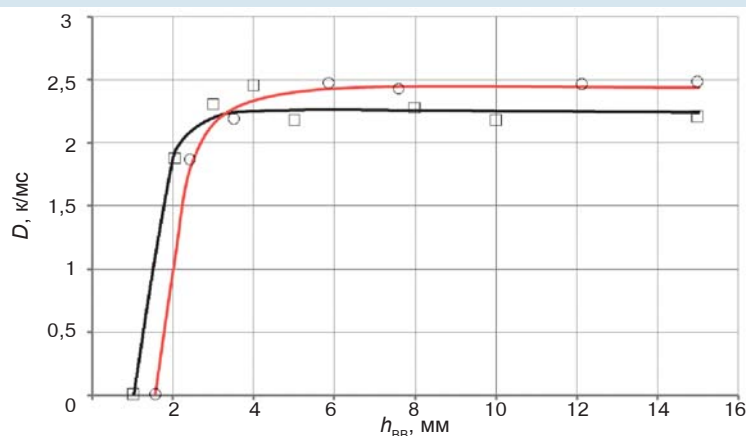


Видеокадры процесса диспергирования жидкости: а – выбрасываются тонкие струи; б – струи распадаются на капли

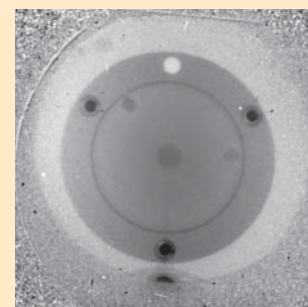
Проведены экспериментальные исследования по созданию новых смесевых ВВ на основе мощного вторичного ВВ (гексоген, ТЭН) и инертного «разбавителя» – бикарбоната натрия, имеющего большую газовую фазу при термическом разложении. Экспериментально подобраны соотношения компонентов смесевых ВВ, чтобы энергетические свойства недостающего количества высокобризантного ВВ компенсировались газовыделяющей функцией соды, выступающей в роли дополнительного компрессионного агента. Для решения задачи сварки взрывом предельно тонким зарядом ВВ с $h \ll 8$ мм

и низкой скоростью детонации исследовалась возможность снижения h смесей ТЭН/ NaHCO_3 и гексоген/ NaHCO_3 , в которых размеры кристаллов ТЭНа и гексогена составляют единицы микрометра. Эксперименты с такими ВВ по определению скорости детонации показали, что ВВ толщиной 2 мм детонирует устойчиво и только для слоя ВВ толщиной 1 мм было зарегистрировано затухание детонации.

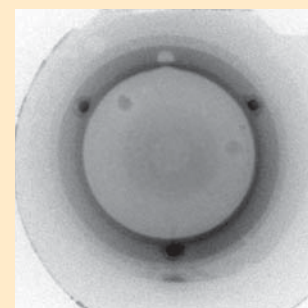
Ведутся исследования газодинамических процессов методом протонной многокадровой радиографии. Экспериментальные результаты используются для тестирования расчетных моделей.



Зависимость скорости детонации от толщины слоя ВВ для ТС-микро (□) и ГС-микро (○)



$t = 0$ мкс

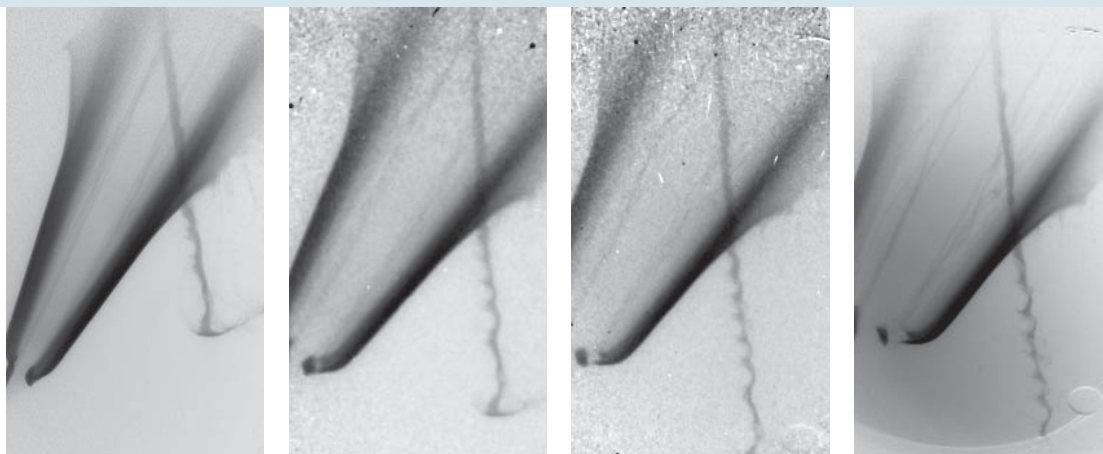


$t = 14,315$ мкс



$t = 15,635$ мкс

Процесс дробления полусферической оболочки из стали с внутренним диаметром 16,3 мм, толщиной стенки 0,4 мм



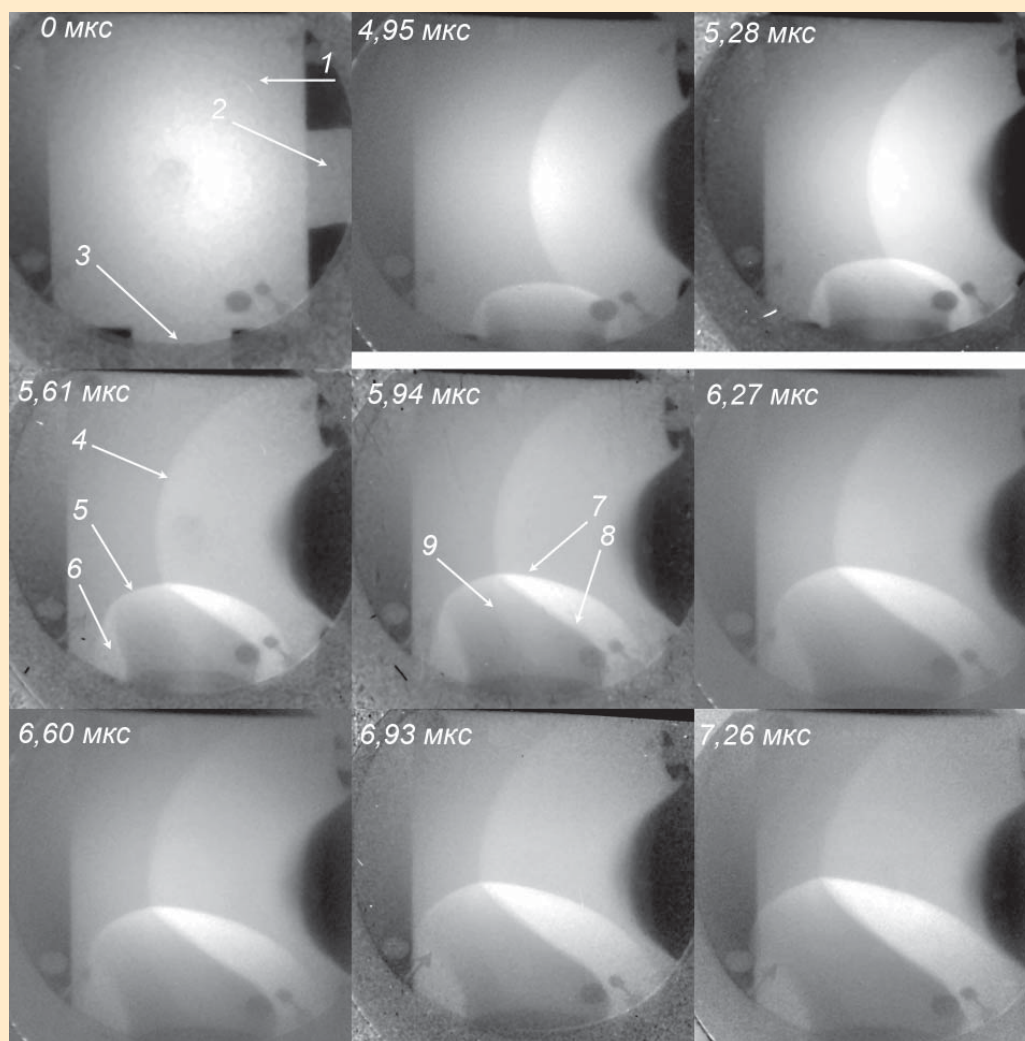
Кадр 1 (29,505 мкс)

Кадр 4 (30,825 мкс)

Кадр 7 (32,145 мкс)

Кадр 10 (33,63 мкс)

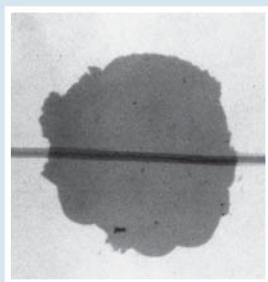
Взаимодействие кумулятивной струи с макетом «реактивной» преграды



Процесс инициирования и развития детонации: 1 – образец; 2 – инициатор ударной волны; 3 – инициатор детонационной волны; 4 – фронт ударной волны; 5 – фронт детонационной волны; 6 – «темная» зона; 7 – фронт ударной волны в сжатой области; 8 – контактная граница; 9 – фронт ударной волны в продуктах взрыва



Проведено испытание снарядодформирующего заряда с компактным поражающим элементом (ПЭ) из тантала, предназначенного для ракетной системы залпового огня «Ураган». По сравнению со штатной конструкцией, использующей ПЭ из меди, бронепробитие увеличено в 1,85 раза. Отклонение ПЭ от точки прицеливания не превысило 25 см. Это результат мирового уровня и рекордный для России.



Рентгенограмма поражающего элемента

В настоящее время единственным прямым способом изучения поведения структуры вещества на микроскопическом уровне непосредственно за ударным фронтом является импульсная рентгенодифракционная методика. Для изучения структуры кристаллов при ударном нагружении создан лабораторный комплекс. В качестве генератора импульсных давлений до 70 ГПа в лабораторных условиях создана электропушка ЭП-4, позволяющая разгонять тонкие диэлектрические ударники энергией взрыва фольги до скоростей в несколько километров в секунду. Емкость батареи электропушки в режиме разряда 25,5 мкФ, напряжение разряда 60 кВ, запасенная электрическая энергия $E = 46$ кДж. Площадь ударника 32×80 мм. Использование ударников различной толщины позволяет изменять ско-

рость полета ударника от 0,5 до 8 км/с: при толщине ударника 2 мм скорость полета ударника равна 2,7 км/с, а при толщине ударника 50 мкм – 8 км/с. Источником импульсов рентгеновского излучения служит созданная сотрудниками ИЯРФ газоразрядная камера с плазменным фокусом. Длительность импульса рентгеновской эмиссии камеры 5–7 нс. Автоматизированная система регистрации рентгенодифракционных картин ударно сжатых кристаллов построена на базе электронно-оптического преобразователя и цифровой ПЗС-камеры. На динамических снимках зарегистрированы отражения от равновесных и неравновесных состояний, которые указывают на незавершенность процесса релаксации структуры от одноосно-сжатого состояния к изотропно-сжатому состоянию за время пребывания вещества на ударном фронте.



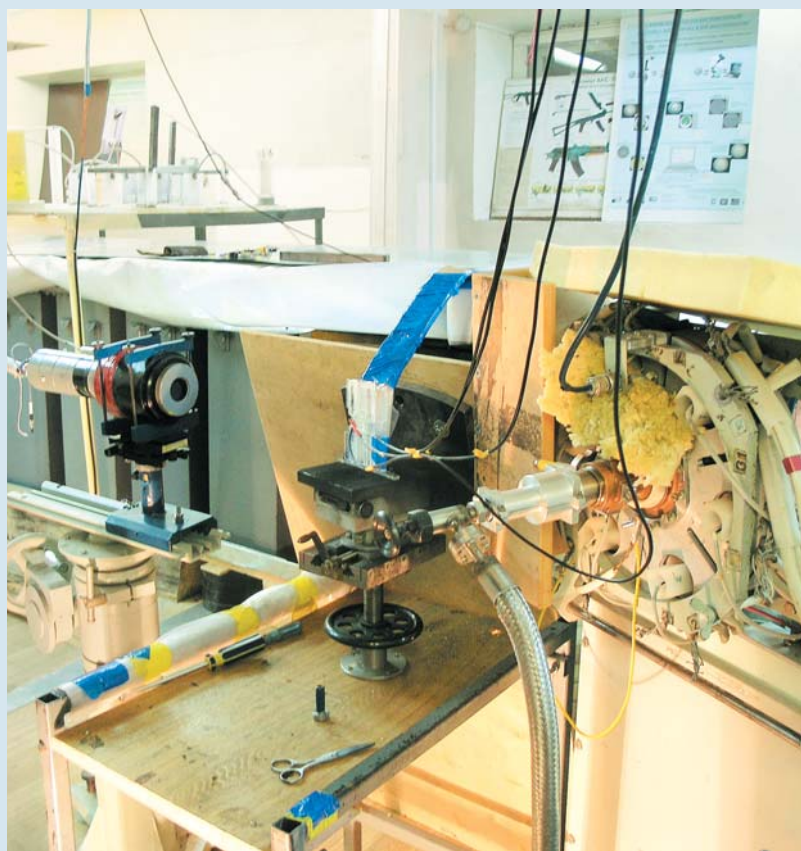
а



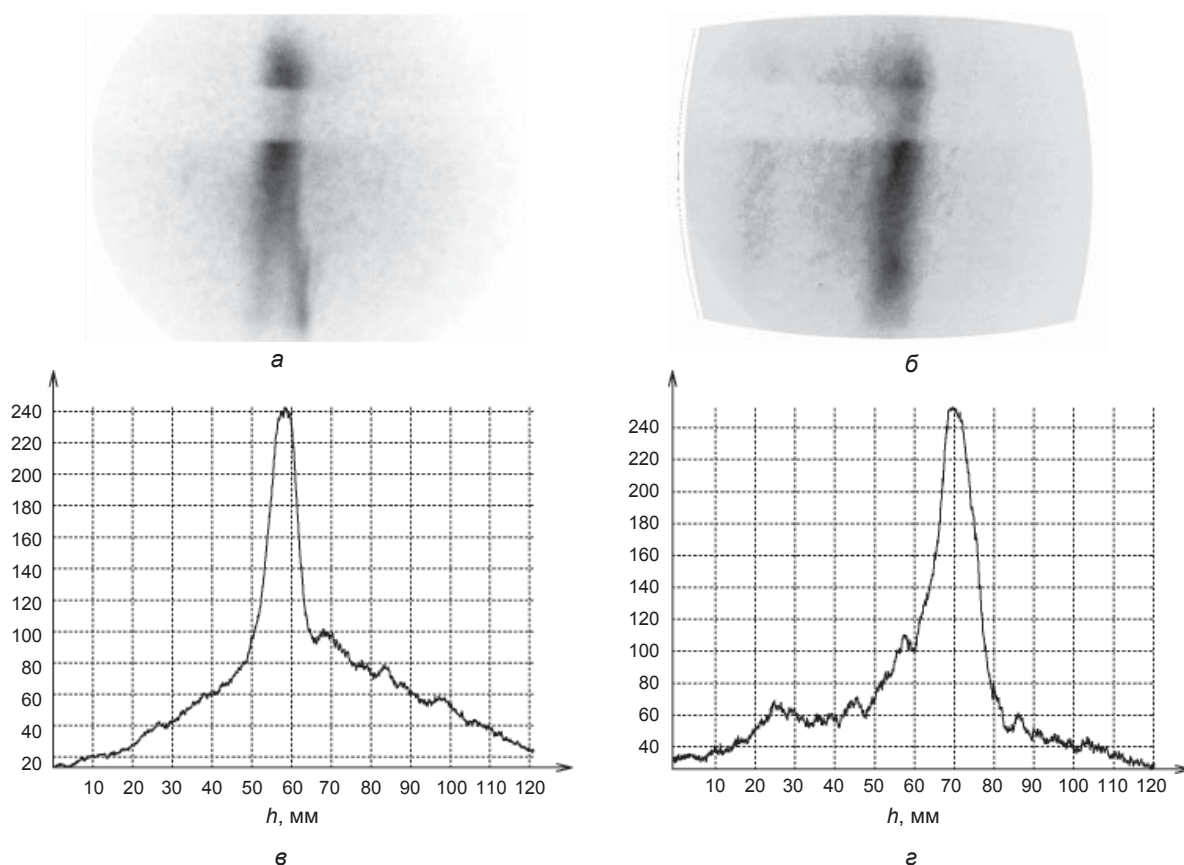
б

Фотографии пробитой бронепреграды:

а – лицевая поверхность;
б – тыльная поверхность

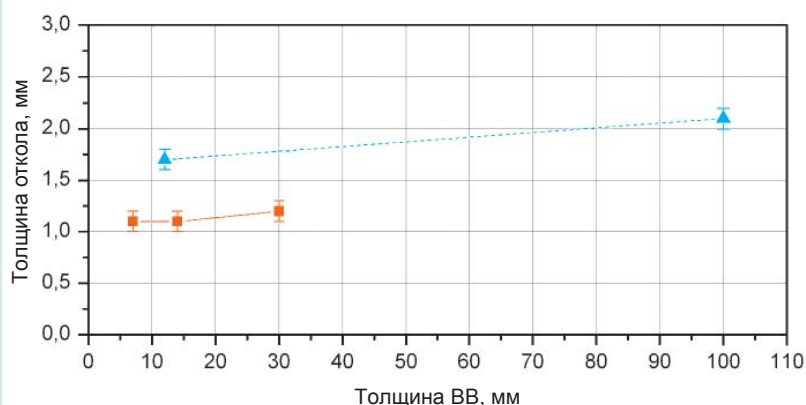


Лабораторный комплекс



Рентгенодифракционные картины и профили оптической плотности поперечных сечений предварительного (а, в) и динамического (б, г) снимков монокристалла LiF (скорость полета ударника из оргстекла 1,7 км/с, давление в образце 6,6 ГПа, относительное сжатие 1,09)

Проведены исследования откольного разрушения образцов бериллия при нагружении нестационарной ударной волной интенсивностью ~ 30 ГПа. Одновременно применялись несколько методик регистрации: двухкадровая импульсная рентгенография, лазерные интерферометры Майкельсона (ЛИМ, VISAR) и манганиновые датчики. Нагружение образцов осуществлялось детонационной волной заряда ВВ ТГ 5/5. При ударно-волновом нагружении бериллия зарегистрирована слабая зависимость толщины откола от толщины нагружающего заряда ВВ, тогда как для подавляющего числа металлов наблюдается монотонное увеличение толщины откола с увеличением толщины ВВ.



Зависимость толщины откола от толщины заряда ВВ для образцов бериллия 7 мм (■) и 20 мм (▲)