

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 послыоного 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/см<sup>3</sup>) измерена средняя плотность сжатого газа  $\rho = \delta \rho_0 = 4,3 \pm 0,7$  г/см<sup>3</sup>. Здесь  $\delta = (R_0/R_{\min})^3$ , где  $R_0$  – радиус внутренней границы сферической оболочки в исходном состоянии;  $\rho_0$  – 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-

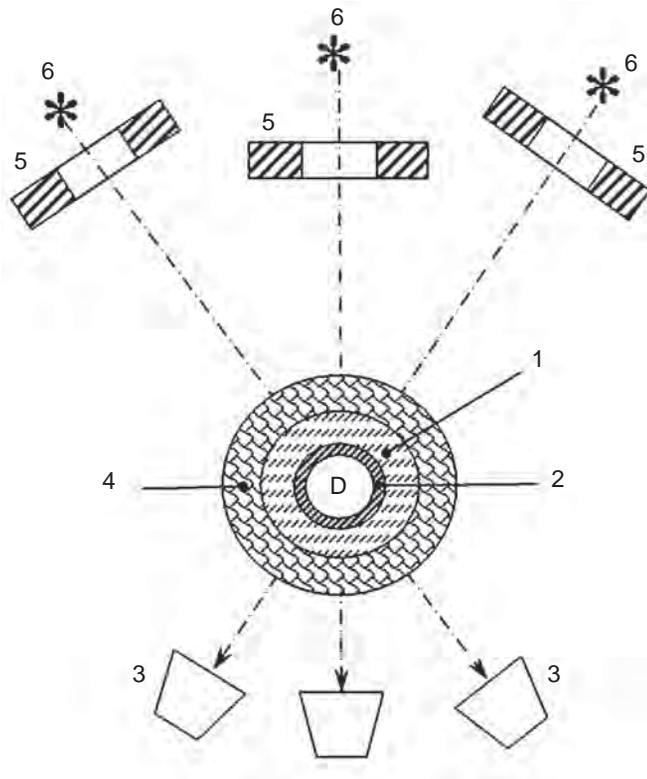
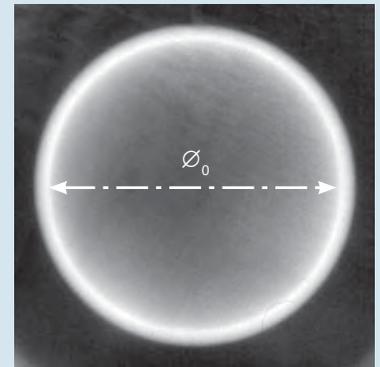
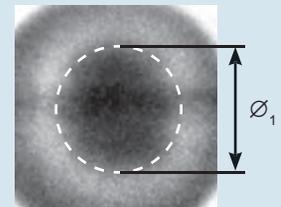


Схема эксперимента по сжимаемости дейтерия:  
1 – прокладка (полиэтилен); 2 – сферическая камера;  
3 – электронно-оптические регистраторы; 4 – заряд ВВ;  
5 – защитное устройство; 6 – источники излучения

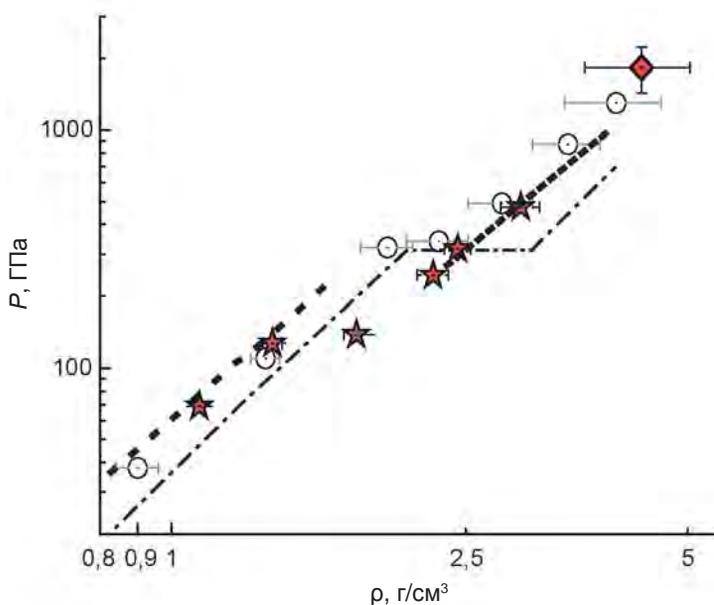


а



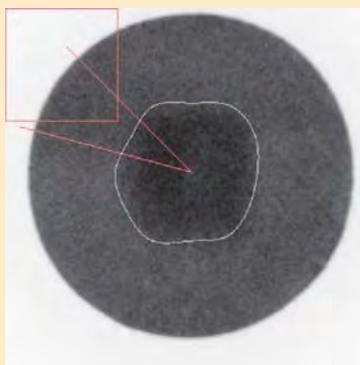
б

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)

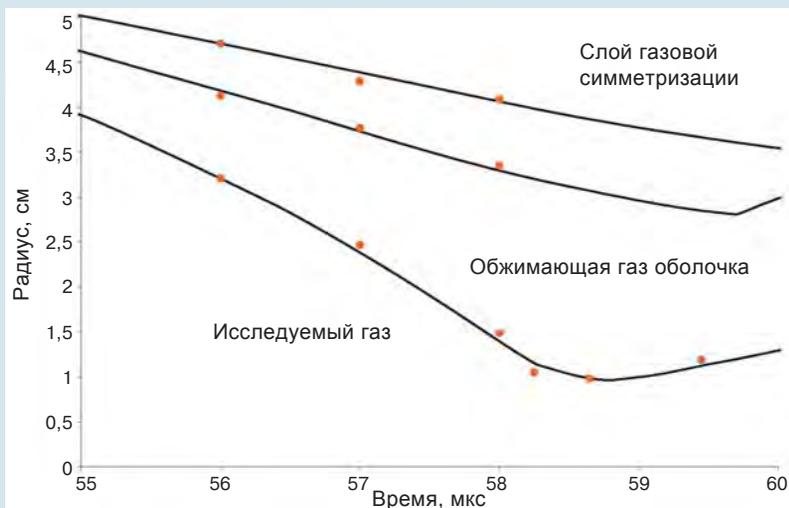


Квазиизэнтропическое сжатие газообразного дейтерия в области давлений до 1800 ГПа: ---, - · - · - расчет; ○, ★, ◆ – эксперимент

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  $\sim 5$  г/см<sup>3</sup> 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.



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

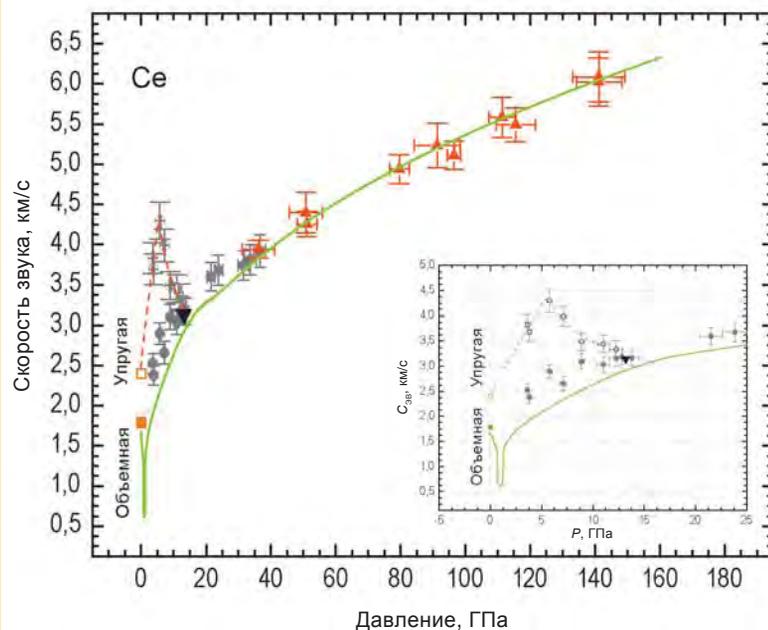


Численное моделирование результатов эксперимента:  
 — расчетные радиусы границ оболочек, обжимающих газ;  
 ● — экспериментальные средние радиусы оболочек

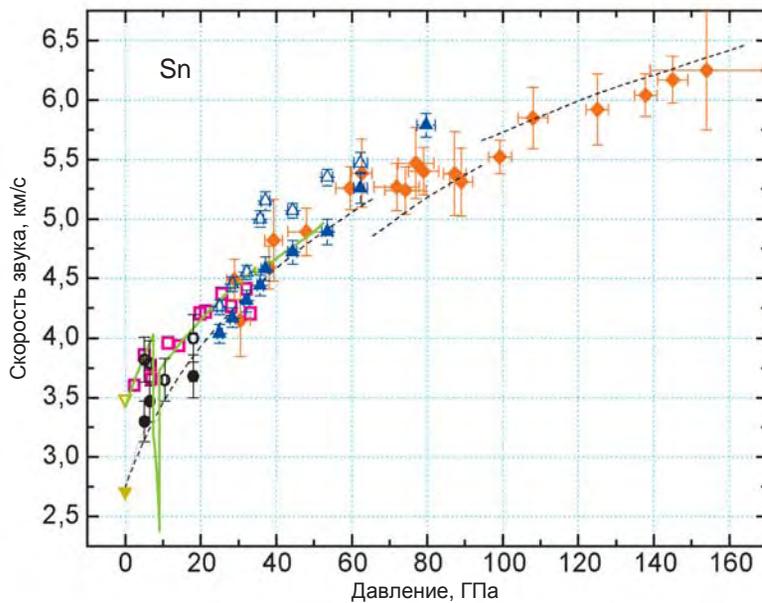
Завершен этап исследований фазовых превращений в церии, олове и природном уране по измерению в них скоростей звука за фронтом ударных волн. Церий обладает необычными по сравнению со многими металлами свойствами. К их числу относятся существование критической точки в твердом состоянии на линии изоморфного ( $\gamma$ - $\alpha$ ) 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 манганинового 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  $\gamma$ -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:  
 $\nabla$ ,  $\circ$ ,  $\bullet$ ,  $\blacklozenge$  – данные ВНИИЭФ;  $\nabla$ ,  $\square$ ,  $\blacktriangle$  – данные зарубежных авторов;  
 —, — — — — расчетные кривые других авторов

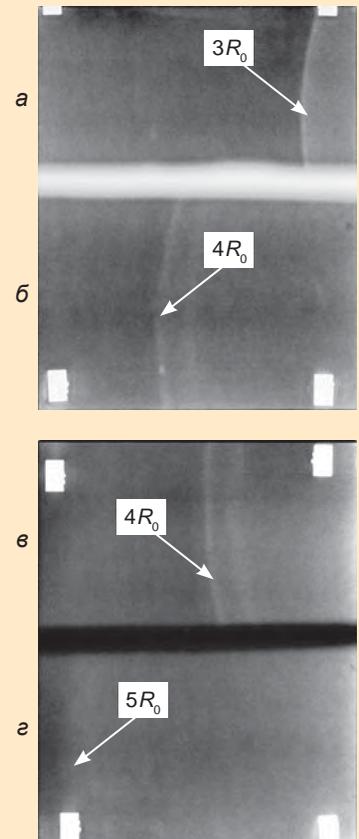
Определены параметры ударной волны – интенсивность и время действия, – при которых металлы (медь и тантал) испытывают разупрочнение. Известно, что с увеличением давления и деформации металлов в ударных волнах происходит изменение их микроструктуры – появляется большое количество микродвойников, плотность дислокаций достигает максимальных значений и в результате происходит упрочнение металлов. Однако на механические свойства и микроструктуру кроме амплитуды ударной волны ( $\sigma_x$ ) 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  $\tau$  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.

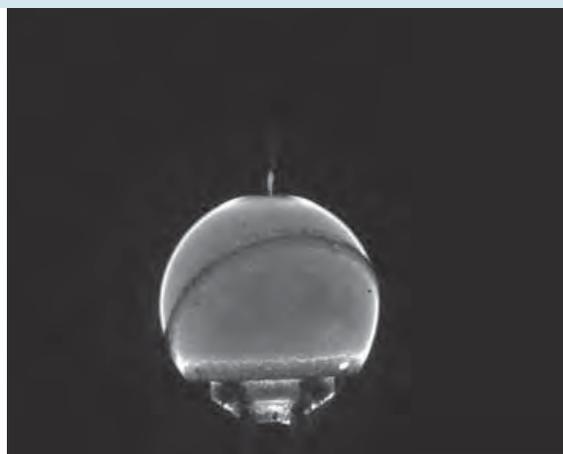
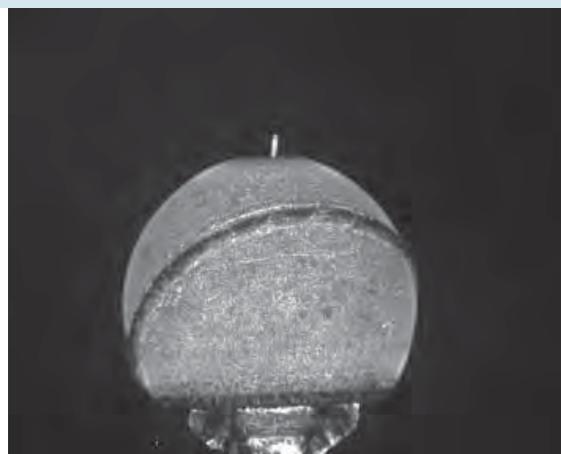
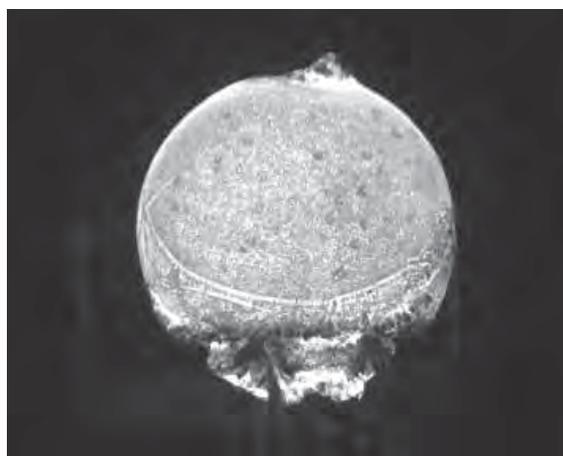
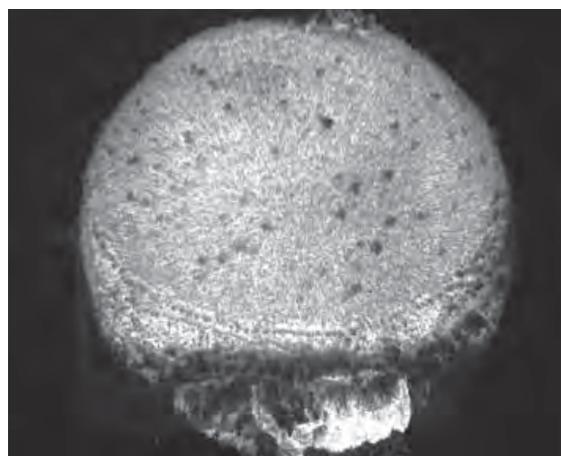
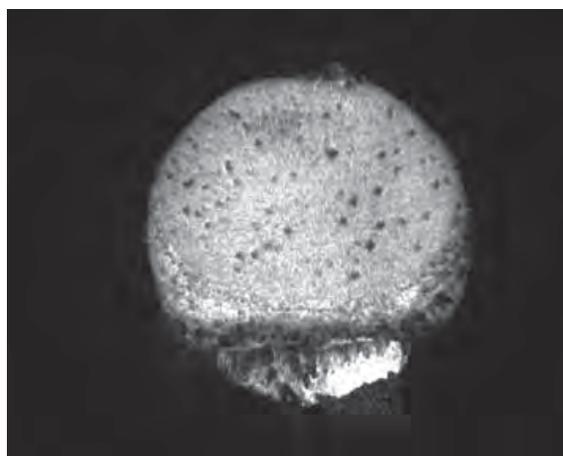
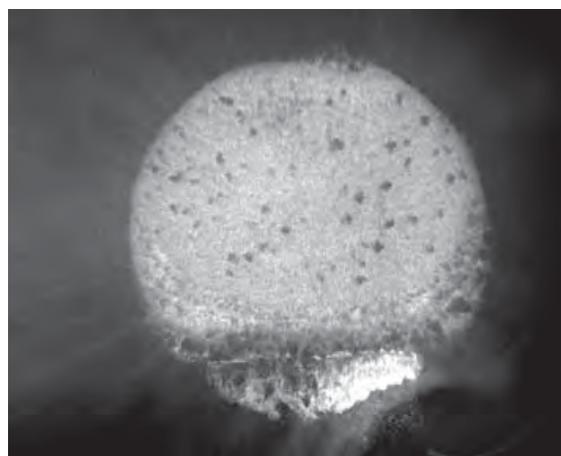
Проведены взрывные эксперименты по исследованию турбулизации границы раздела разлетающихся продуктов взрыва и воздуха на сферических зарядах, содержащих жидкую взрывчатую смесь тетранитрометана и нитробензола. Для регистрации зоны формирования воздушной ударной волны применялись:

- 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 x 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

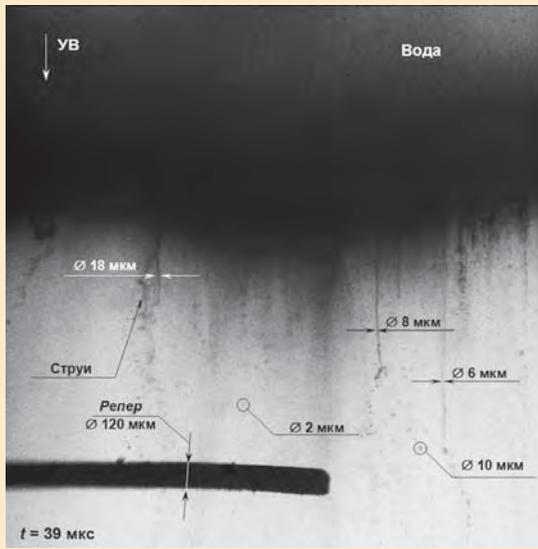
 $3R_0$  ( $t = 44$  мкс) $4R_0$  ( $t = 64$  мкс) $\sim 4R_0$  ( $t = 65$  мкс) $5R_0$  ( $t = 94$  мкс) $6R_0$  ( $t = 111$  мкс) $7R_0$  ( $t = 128$  мкс)

*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.

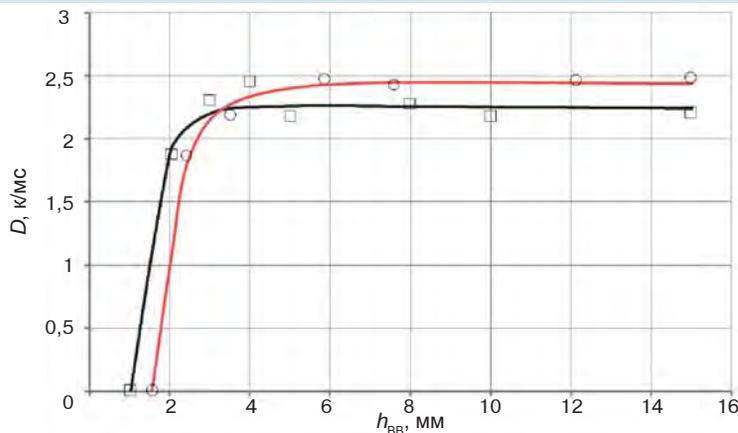


Видеокадры процесса диспергирования жидкости: а – выбрасываются тонкие струи; б – струи распадаются на капли

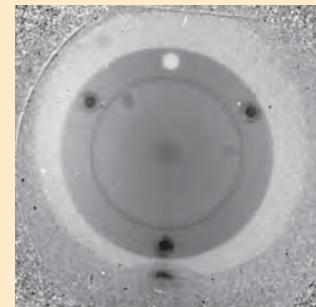
Проведены экспериментальные исследования по созданию новых смесевых ВВ на основе мощного вторичного ВВ (гексоген, ТЭН) и инертного «разбавителя» – бикарбоната натрия, имеющего большую газовую фазу при термическом разложении. Экспериментально подобраны соотношения компонентов смесевых ВВ, чтобы энергетические 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  $h \ll 8 \text{ мм}$

и низкой скоростью детонации исследовалась возможность снижения  $h$  смесей ТЭН/ $\text{NaHCO}_3$  и гексоген/ $\text{NaHCO}_3$ , 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.

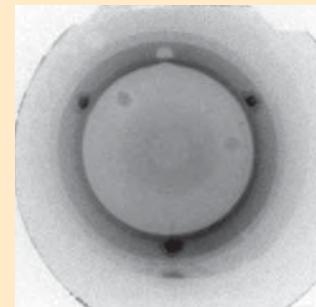
Ведутся исследования газодинамических процессов методом протонной многокадровой радиографии. Экспериментальные результаты используются для тестирования расчетных моделей.



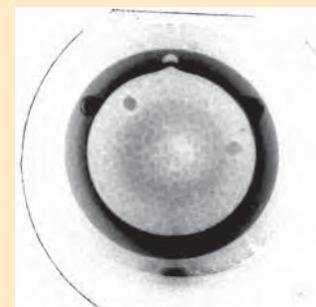
Зависимость скорости детонации от толщины слоя ВВ для ТС-микро (□) и GS-микро (O)



$t = 0 \text{ мкс}$

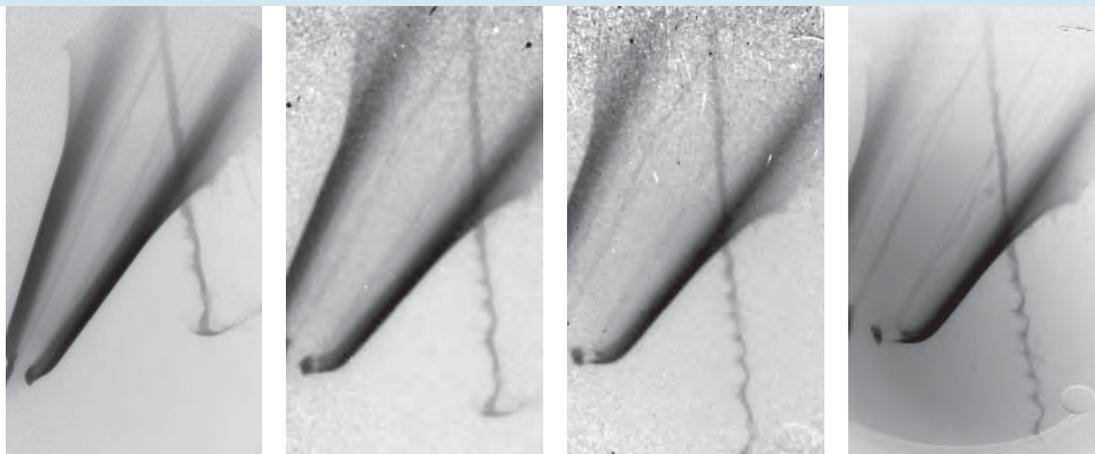


$t = 14,315 \text{ мкс}$



$t = 15,635 \text{ мкс}$

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



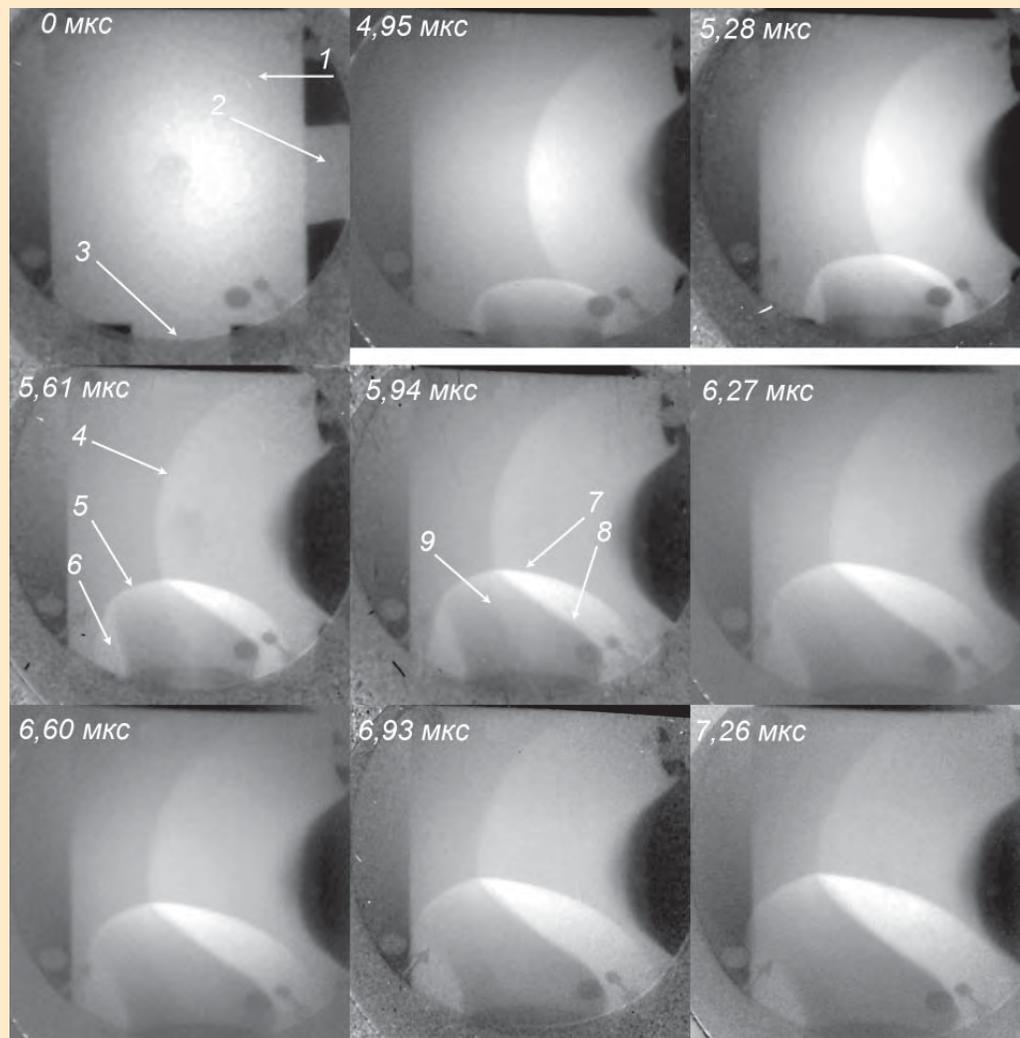
Кадр 1 (29,505 мкс)

Кадр 4 (30,825 мкс)

Кадр 7 (32,145 мкс)

Кадр 10 (33,63 мкс)

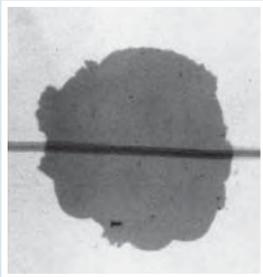
*Взаимодействие кумулятивной струи с макетом «реактивной» преграды*



*Процесс иницирования 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 снарядоформирующего 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



а



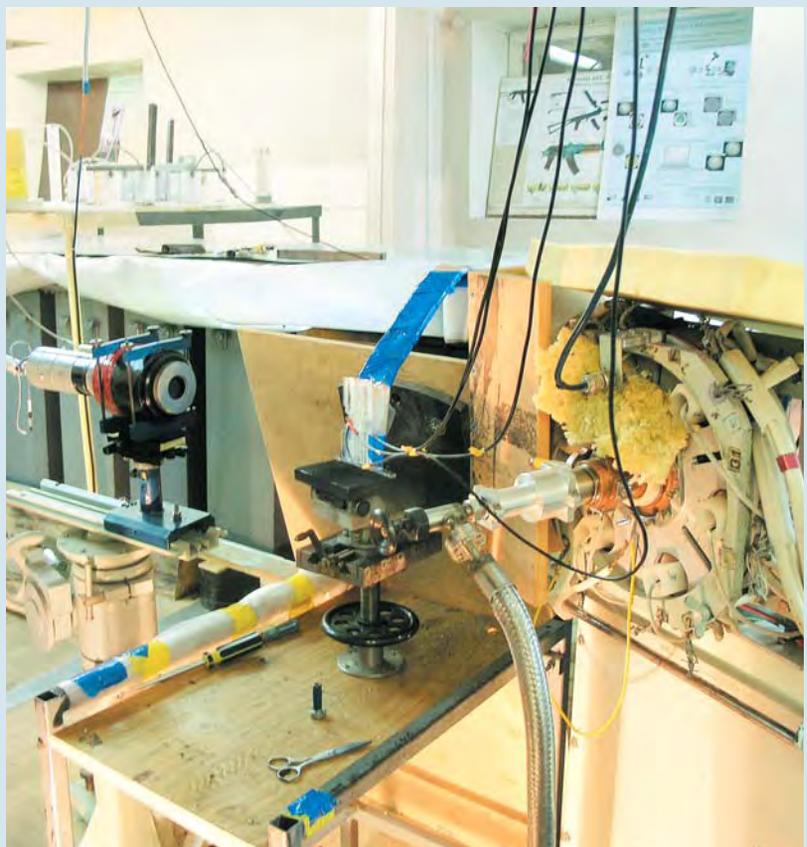
б

Фотографии пробитой бронепреграды:

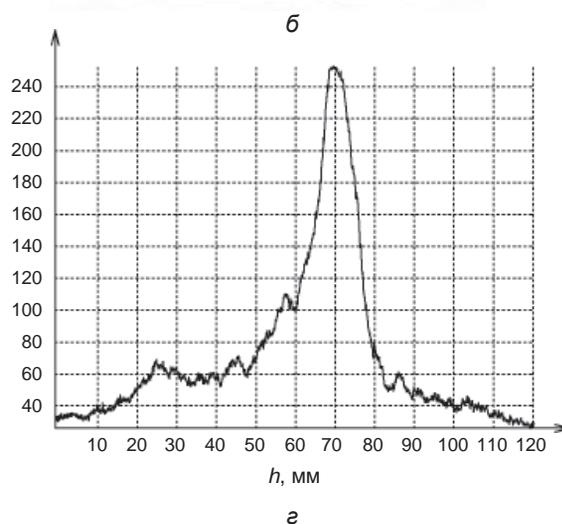
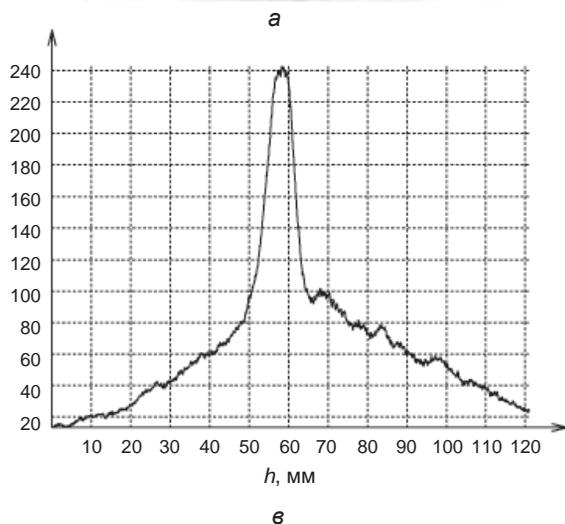
а – лицевая поверхность;  
б – тыльная поверхность

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 x 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.

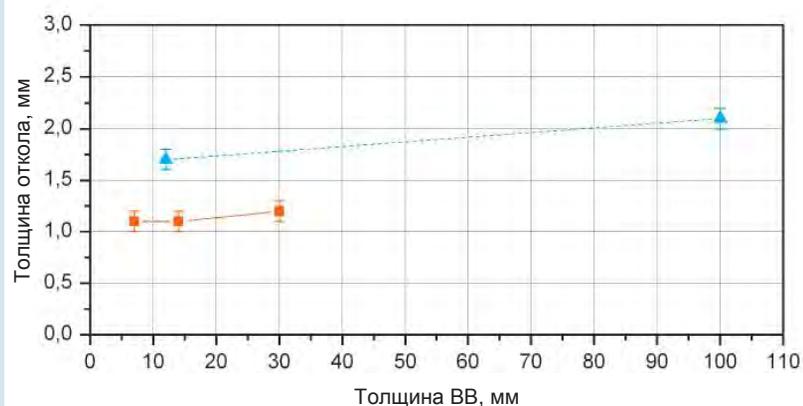


Лабораторный комплекс



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 (▲)