

ИНСТИТУТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ГАЗОДИНАМИКИ И ФИЗИКИ ВЗРЫВА (ИФВ)

СУБТЕРАГЕРЦЕВАЯ СПЕКТРОМЕТРИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ КИНЕТИКИ ТЕРМОЛИЗА ЭНЕРГОЕМКИХ СОЕДИНЕНИЙ

В 2018–2019 гг. в ИФВ на рентгенографическом комплексе были проведены эксперименты, в которых сильнонеидеальная плазма дейтерия была квазиизоэнтропически сжата до плотности 12 г/см^3 при давлении 150 Мбар во взрывных устройствах сферической геометрии. В 2018 г. было получено рекордное давление в дейтерии 185 Мбар. Опыт 2019 г. проведен с целью проверки уравнения состояния дейтерия при более низком давлении. В эксперименте исследуемое устройство 1 размещается между двумя бетонными сооружениями 2, в которых находятся источники рентгеновского излучения. В левом защитном сооружении установлены два безжелезных импульсных бетатрона 3 БИМ234.3000, работающих в режиме последовательной генерации трех импульсов рентгеновского излучения с длительностью $\sim 150\text{--}180 \text{ нс}$. Работа бетатронов в таком режиме генерации позволяет просвечивать объекты с массовой толщиной $\sim 230 \text{ г/см}^2$, что эквивалентно толщине свинца $\sim 200 \text{ мм}$. Впервые в эксперименте ВНИИЭФ применялся линейный индукционный ускоритель ЛИУ-Р-Т 7, расположенный в правом сооружении 2, с энергией электронов 12 МэВ и длительностью импульса излучения $\leq 50 \text{ нс}$. Применение ЛИУ-Р-Т в оптимальном режиме позволяет просвечивать объекты с массовой толщиной до 300 г/см^2 , что эквивалентно толщине свинца $\sim 250 \text{ мм}$. Для сжатия газа использован блок

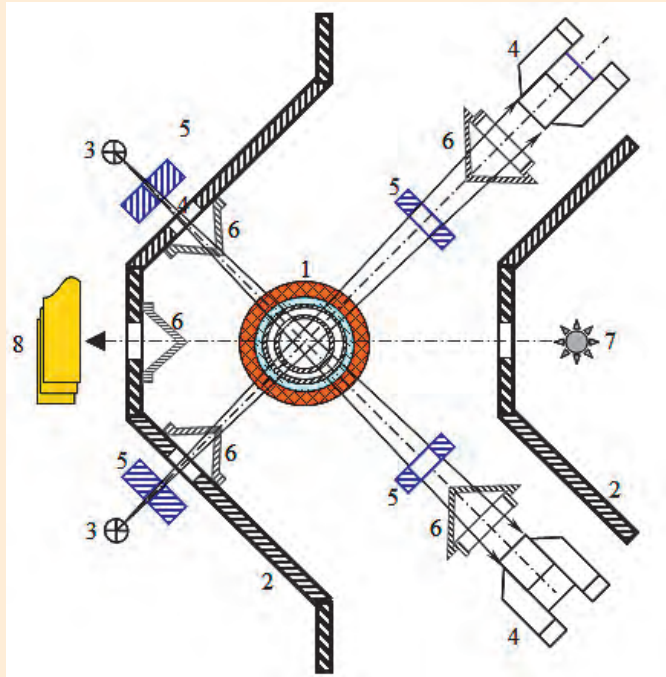
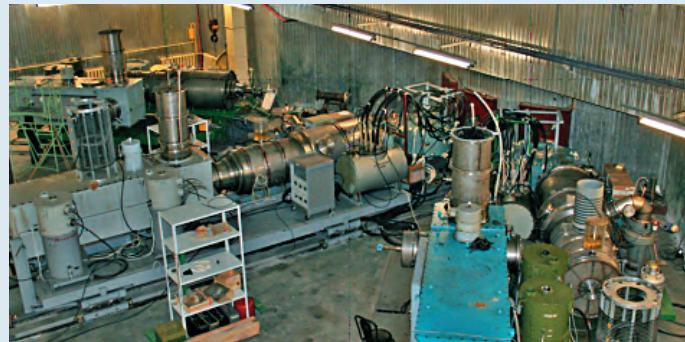


Схема эксперимента: 1 – экспериментальное устройство, 2 – защитное сооружение, 3 – источники излучения (бетатроны), 4 – детекторы, 5 – коллиматоры (свинец), 6 – конусы (алюминий), 7 – ЛИУ-Р-Т, 8 – набор фотохромных экранов



Общий вид зала с бетатронами (вверху) и ЛИУ-Р-Т (внизу)

взрывчатого вещества на основе октогена с массой 85 кг ТНТ. В эксперименте зарегистрированы семь фаз сжатия дейтериевой плазмы и последующего разлета газовой полости.

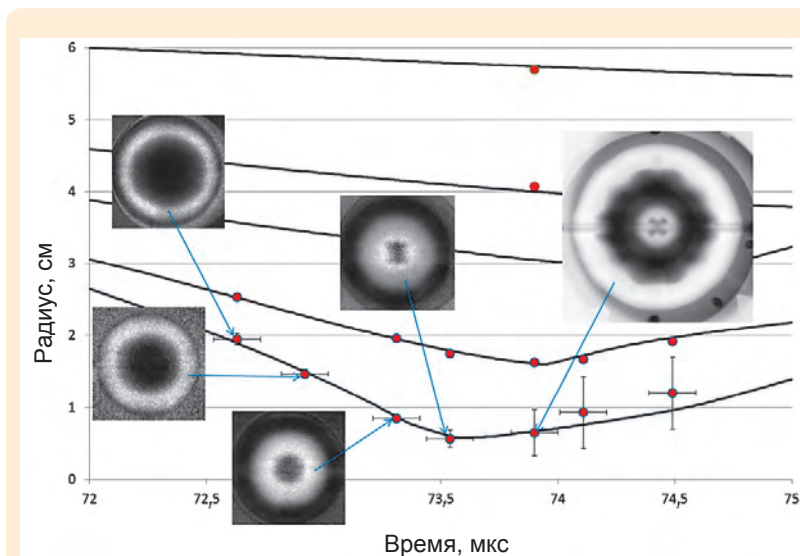
Давление в плазме определяли из газодинамического расчета с учетом реальных термодинамических и прочностных свойств всех элементов экспериментального устройства и их уравнений состояния. В расчетах использовались уравнения состояния материалов, введенные в газодинамический расчетный комплекс РФЯЦ-ВНИИЭФ.

Полученные в этих экспериментах $R(t)$ -данные, результаты газодинамического расчета с использованием уравнения состояния дейтерия Копышева – Хрусталева, а также экспериментальные рентгенограммы, показанные на рисунке, подтверждают, что расчет с использованием уравнения состояния дейтерия Копышева – Хрусталева, откалиброванный на основе модельных опытов, хорошо описывает измеренные рентгенографическим методом значения границ оболочки с дейтерием. А это говорит об удовлетворительном описании энергетики системы и динамики сжатия дейтерия.

Удовлетворительное соответствие экспериментальных и расчетных данных позволяет сделать вывод об адекватности уравнения состояния дейтерия Копышева – Хрусталева в области квазиизоэнтропического сжатия дейтерия в диапазоне сверхвысоких давлений 20–200 Мбар (2000–20000 ГПа).

НОВЫЙ ПОЛИГОН ДЛЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В 2019 г. сдан в эксплуатацию испытательный полигон для размещения экспериментального научно-исследова-



Сравнение экспериментальных и расчетных данных для опыта по сжатию дейтерия до ~150 Мбар

тельного комплекса на базе газодинамических установок ствольного типа калибром от 14,5 до 307 мм. Комплекс предназначен для создания технологии и средств аттестации динамических свойств конструкционных материалов в условиях их старения, смены поставщиков и дрейфа технологий изготовления. Комплекс позволяет проводить экспериментальные исследования:

- деформационных и прочностных свойств материалов в широком диапазоне скоростей деформирования (от 10^2 до 10^8 с⁻¹) при ударно-волновом нагружении на скоростях до 4 км/с и по методам составных стержней Гопкинсона и Тейлора;

- внутрибаллистических параметров разгона метаемых объектов различной формы и массы, в том числе с ограничением перегрузок, действующих на метаемый объект;
- процессов пробития и проникания различных объектов в преграды.

МЕТОД ИСПЫТАНИЯ КИНЕТИЧЕСКИХ БОЕПРИПАСОВ

Разработан метод испытаний кинетических боевых частей (КБЧ) ракет на бронепробитие с определением параметров запреградного осколочного поля и зажигательного действия.

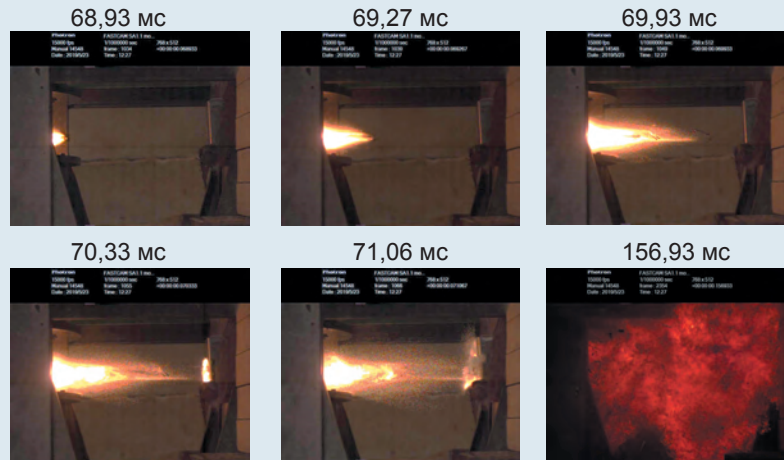
Отработана технология разгона КБЧ с относительной длиной (отношением длины КБЧ к ее диаметру) до 50 в газодинамической установке ствольного типа в подкалиберном варианте с отделяющимся и отсекаемым в ближней зоне выстрела (до 10 м от дульного среза) направляющим устройством и углом атаки КБЧ при подходе к цели не более 3°.

Отработаны новые схемы крепления КБЧ в направляю-



Экспериментальный научно-исследовательский комплекс

щем устройстве и обтюрации пороховых газов в заснарядном пространстве. Решена внутрибаллистическая задача разгона метаемого объекта в стволе установки с низкими перегрузками, ограниченными прочностными возможностями КБЧ. Разработанный метод успешно апробирован в сравнительных испытаниях макетов проектируемой в настоящее время КБЧ в инертном и оснащем различными составами реакционных материалов исполнении и с различными материалами броневой стержня.



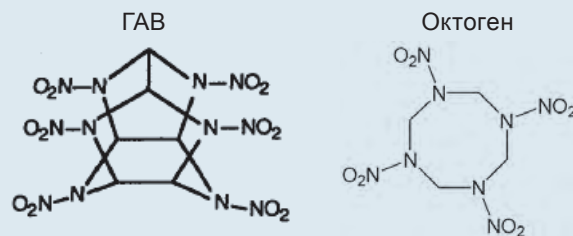
Регистрация запреградного осколочного поля и зажигательного действия

НОВОЕ ВЗРЫВЧАТОЕ ВЕЩЕСТВО ДЛЯ КУМУЛЯТИВНЫХ ЗАРЯДОВ

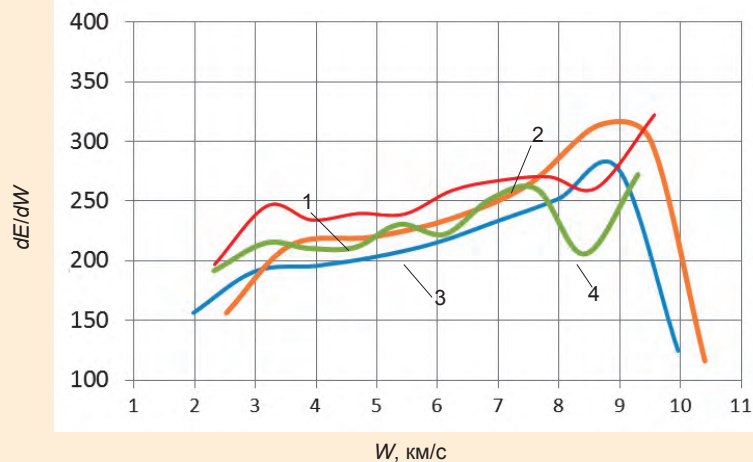
Завершен цикл исследований возможности применения нового взрывчатого состава (ВС) ГАМА повышенной мощности на основе индивидуального взрывчатого вещества (ВВ) ГАВ (CL-20) в кумулятивных зарядах. По результатам численного моделирования, выполненного в ИФВ, показана возможность повышения интегральных характеристик формируемых кумулятивных струй и проведена оптимизация конструкции штатного кумулятивного заряда применительно к новому ВВ. Были изготовлены опытные образцы кумулятивных зарядов с новым ВС, проведены экспериментальные исследования, в которых современный уровень основной характеристики кумулятивного заряда – бронепробития – около 10 калибров повышен до рекордного значения ~11,5 калибров. Сравнение проведено со штатным кумулятивным зарядом, снаряженным ВС ОМА на основе индивидуального ВВ октоген.



Газодинамическая установка ствольного типа



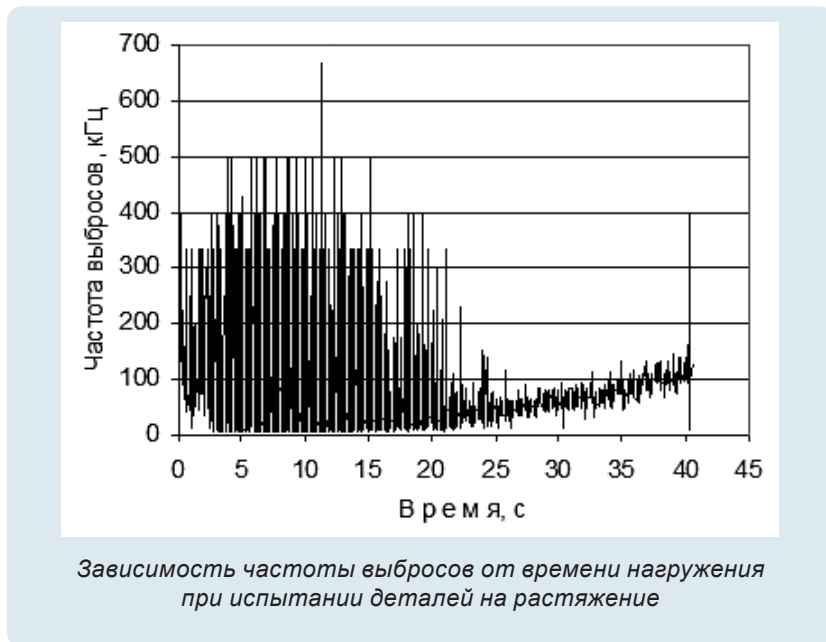
Структурные формулы индивидуальных ВВ



Расчетные зависимости распределения кинетической энергии по длине кумулятивной струи для выбора оптимального варианта конструкции: 1 – ВС 99080 ГАМА, 2 – ВС 99009 ГАМА, 3 – ВС 90001 ОМА, 4 – ВС 99081 ОМА

ВНЕДРЕНИЕ НЕРАЗРУШАЮЩИХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ СВОЙСТВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В ЛАБОРАТОРНУЮ ПРАКТИКУ

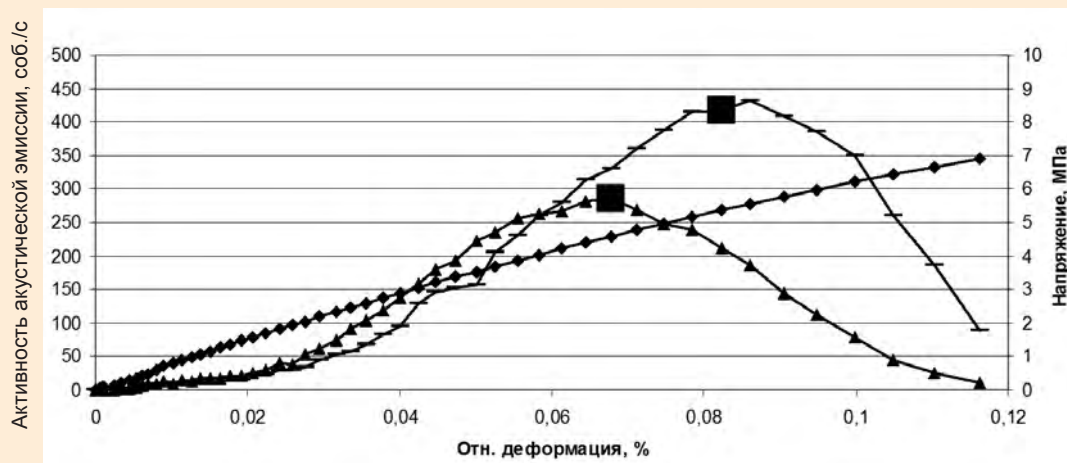
На основании результатов экспериментальных работ в условиях сжатия и растяжения по исследованию процесса разрушения и механических свойств деталей из пластифицированного октогена определена возможность прогнозирования прочностных характеристик деталей по параметрам акустической эмиссии при предварительном испытании их нагрузками, не превышающими предельного значения. Выявлено, что наиболее информативными параметрами для прогнозирования предельных значений механических характеристик деталей являются сумма импульсов и активность акустической эмиссии, значимые изменения которых наблюдаются в упругой области деформирования детали. На диаграмме активности акустической эмиссии выделена особая точка-максимум, которая позволяет визуально контролировать момент дости-



жения критической нагрузки в ходе эксперимента. Исследована возможность снижения нагрузки предварительного нагружения. Примером может служить диаграмма частоты выбросов, полученная в результате постобработки параметров акустической эмиссии, записанных в процессе нагружения деталей в условиях растяжения.

Известно, что каждая составляющая частотного спектра выбросов сигналов акустической эмиссии соответству-

ет возникновению дефектов определенного уровня. В данном случае достаточно резкий переход от высокочастотной составляющей сигнала к низкочастотной может свидетельствовать о сокращении времени межстадийного перехода и высокой скорости локализации дефектов, что и позволяет снизить нагрузку предварительного нагружения за счет выделения высокочастотной составляющей выбросов сигнала акустической эмиссии.



Диаграммы деформирования и активности акустической эмиссии для низкочастотного (— от 0–125 кГц) и высокочастотного (▲, от 125–1000 кГц) диапазонов, полученные при испытании деталей размером 10×15×150 мм в условиях растяжения: ■ — точки перегиба, ◆ — σ - ε

Диаграммы активности акустической эмиссии, полученные при испытании деталей на растяжение, построены для двух частотных диапазонов: низкочастотного (до 125 кГц) и высокочастотного (выше 125 кГц). Диапазон частот подбирался опытным путем. Видно, что с повышением частот выбросов акустической эмиссии точка экстремума активности смещается в сторону снижения нагрузки и деформации.

С учетом вышеизложенного были проведены опыты по определению прочности деталей из пластифицированного октогена по результатам предварительного нагружения с погрешностью, сопоставимой с погрешностью определения прочности при механических испытаниях. Способ прогнозирования заключался в следующем: деталь нагружали до момента, когда активность акустической эмиссии достигала максимума, после чего нагружение останавливали и определяли значения ε_p , соответствующие активности акустической эмиссии максимуму активности.

Используя значения P_i и ε_i , соответствующие активности акустической эмиссии, по приведенным ниже соотношениям определяли предельные характеристики детали из ВВ:

при сжатии детали

$$\varepsilon_p = \frac{100\%}{51\%} \varepsilon_i, \%,$$

$$P_p = \frac{100\%}{57\%} P_i, \text{ кН},$$

$$\sigma_p = \frac{100\%}{57\%} \sigma_i, \text{ МПа},$$

при растяжении детали

$$\varepsilon_p = \frac{100\%}{55\%} \varepsilon_i, \%,$$

$$P_p = \frac{100\%}{62\%} P_i, \text{ кН},$$

$$\sigma_p = \frac{100\%}{62\%} \sigma_i, \text{ МПа}.$$

Исследование возможности снижения нагрузки предварительного нагружения путем выделения высокочастотных составляющих спектра выбросов акустической эмиссии при прогнозировании прочностных характеристик деталей позволяет использовать испытанные детали в других видах исследований.

СУБТЕРАГЕРЦЕВАЯ СПЕКТРОМЕТРИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ КИНЕТИКИ ТЕРМОЛИЗА ЭНЕРГОЕМКИХ СОЕДИНЕНИЙ

Завершен очередной этап разработки метода нестационарной субтерагерцевой спектроскопии и его приборного оснащения для изучения кинетики термолитического разложения газообразных продуктов их разложения.

Получен патент на изобретение «Способ спектроскопического анализа газообразных продуктов разложения взрывчатых веществ» (№ 2695954, приоритет от 04.07.2018). Способ заключается в проведении спектрального анализа продуктов разложения взрывчатых веществ (ВВ) в режиме реального времени методом

субтерагерцевой спектроскопии. Разложение навески ВВ осуществляется в кварцевом сосуде, соединенном с вакуумируемой кюветой, через которую проходит фазоманипулированное излучение субтерагерцевого диапазона. По регистрируемым вращательным спектрам делается вывод о составе газовой фазы продуктов разложения в тот или иной момент времени. Данный способ позволяет проводить анализ одновременно с высокой чувствительностью и селективностью, что недоступно при использовании современных приборов аналогичного назначения, представленных на рынке.

С участием Института физики микроструктур РАН (г. Н. Новгород) создан спектрометр субтерагерцевого диапазона, работающий в режиме быстрого свипирования по частоте и обеспечивающий сканирование широких спектральных диапазонов за времена порядка секунд. Выполнен ряд методических работ с образцами индивидуальных ВВ, по результатам которых сформирован технический облик перспективного универсального программно-аппаратного газоаналитического комплекса на базе субтерагерцевого спектрометра.

