

А. Л. МИХАЙЛОВ

Для Института экспериментальной газодинамики и физики взрыва (ИФВ) РФЯЦ-ВНИИЭФ современный период характерен интенсивными фундаментальными и прикладными исследованиями, разработкой и внедрением новых физических установок, аппаратурных комплексов, методов и средств диагностики, без которых немислимо продвижение в физике быстротекающих процессов и физике экстремальных состояний вещества, и главное – невозможно обоснование надежности и безопасности ядерно-оружейного арсенала в условиях отсутствия полномасштабных испытаний.

Остановимся на некоторых результатах нашей деятельности в обозначенный период, которые имеют общефизическую значимость, либо нашли потребителя вне ядерно-оружейной сферы.

Уравнения состояния вещества и физика неидеальной плазмы. Это направление в последние годы для ИФВ характерно неуклонным продвижением вверх по шкале давлений, плотностей и температур в исследованиях термодинамических параметров основных компонентов термоядерной плазмы – изотопов водорода и гелия. Эти исследования во многом стимулировались потребностями Федеральной целевой программы «Ядерные энерготехнологии нового поколения».

Основной инструмент наших исследований в этот период – многокадровая импульсная радиография на основе трехлучевого рентгенографического комплекса РГК-Б, созданного силами нескольких подразделений РФЯЦ-ВНИИЭФ на базе трех синхронно работающих циклических ускорителей электронов – бетатронов БИМ 234-3000. Объекты исследований – взрывные имплозивные системы сферической и цилиндрической геометрии, содержащие в своей центральной полости исследуемый газ, временные диаграммы сжатия которого изучались с помощью РГК-Б (рис. 1). Сферические системы обеспечивают более высокие параметры квазиизэнтропического сжатия вещества, цилиндрические – позволяют применять более широкий набор методов диагностики, дополняющих рентгенографию.

Типичная постановка эксперимента и характерные рентгенограммы полостей в моменты, близкие к максимальному сжатию содержащегося в них газа, приведены на рис. 1, 2.

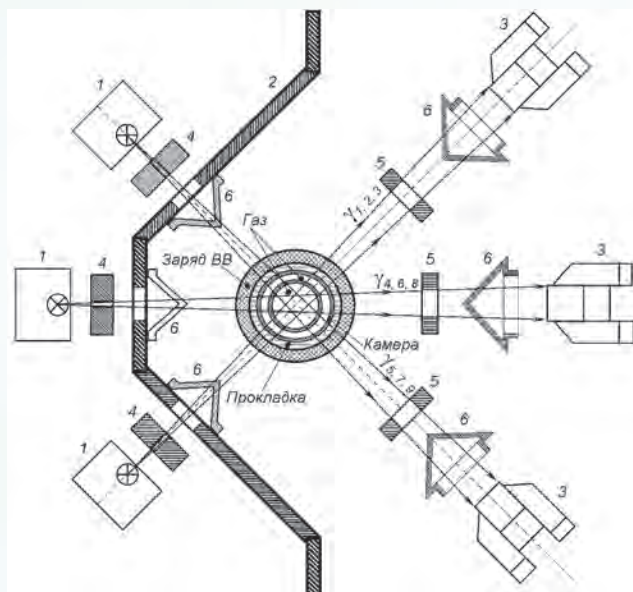


Рис. 1. Схема эксперимента на рентгенографическом комплексе РГК-Б: 1 – бетатрон БИМ 234-3000; 2 – защитное сооружение; 3 – опто-электронный регистратор; 4, 5 – коллиматор; 6 – защитный конус

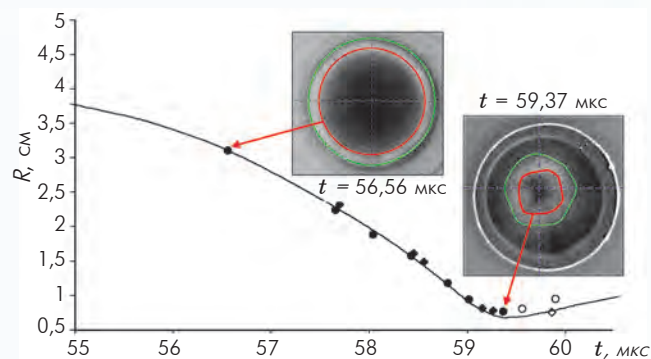


Рис. 2. Процесс квазиизэнтропического сжатия дейтерия в опытах при давлении ~ 5000 ГПа: • – опыт № 1; ♦ – опыт № 2; — – расчет

В этих экспериментах в 2009 г. получены данные для тестирования уравнения состояния (УРС) гелия в области давлений 150–400 ГПа, в 2010–2011 гг. – данные для УРС дейтерия и гелия при давлениях до 2000 ГПа, в 2012–2014 гг. – до 5000 ГПа (пятьдесят миллионов атмосфер). Плотность дейтерия и гелия при этом превышала в тысячу раз их плотность при нормальных условиях, доходя до плотности, типичной для металлов 4–8 г/см³!

За пять лет в этих экспериментах на установках лабораторного типа потолок достигнутых давлений поднят в 10 раз и открыты перспективы продвижения в исследованиях на макрообразцах в область давлений в 100 миллионов атмосфер.

В подобной же постановке проведены и первые исследования квазиизэнтропической сжимаемости металлов на макрообразцах при давлении > 20 миллионов атмосфер, что продвигает нас в область, доступную ранее только технологиям ядерных или гидроядерных взрывных экспериментов.

Для разработки адекватных УРС веществ необходимо учитывать их фазовые и структурные превращения в ударных волнах, проявляющиеся в немонотонностях зависимостей термодинамических параметров среды от давления.

Чувствительным инструментом изучения фазовых переходов служат измерения профилей

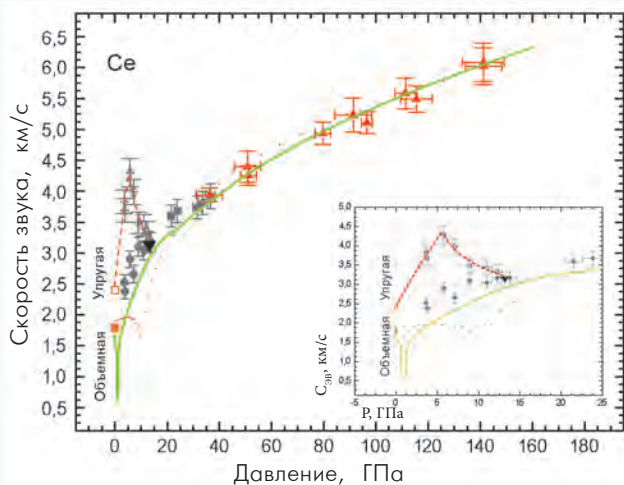


Рис. 3. Зависимость скорости звука в церии от давления ударного сжатия: — — аппроксимация; □, ●, ○, ▲ — данные ВНИИЭФ; — — расчет по УРС ВНИИЭФ; ▼, ■ — данные других авторов

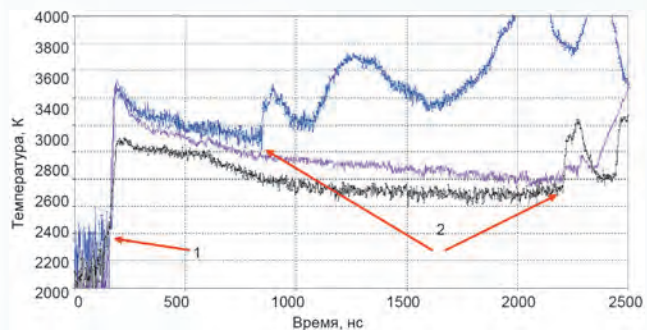


Рис. 4. Температуры продуктов детонации состава на основе ТАТБ: 1 — момент выхода детонации на контактную границу ВВ — LiF; 2 — выход ударной волны из LiF на его свободную поверхность

«давление – время», скорости звука в ударно-сжатых средах (рис. 3), а также температурные измерения светимости материалов за фронтом ударных волн методами оптической пирометрии (рис. 4). На этом направлении получен ряд фундаментальных результатов по выявлению координат полиморфных переходов, вызванных ударными волнами в металлах, обладающих сложной фазовой диаграммой.

Органические материалы со сложными молекулами имеют также немонотонности в ударных адиабатах, связываемые в данном случае с процессами деструкции молекул. Исследователями ИФВ по заказу исследовательского центра ГРАМА (Франция) проведены прямые эксперименты с сохранением и последующим анализом продуктов ударно-волнового разложения трибутилфосфата, позволившие с определенностью подтвердить эту гипотезу.

Динамическая прочность и реология материалов. Помимо физических (термодинамических) уравнений состояния, о которых говорилось выше, для адекватного понимания и численного моделирования нестационарных течений в реальных средах в ИФВ разрабатываются широкодиапазонные («определяющие» – constitutive) уравнения их упруговязкопластического поведения и прочности при импульсных нагрузках.

Для исследований сдвиговой прочности материалов при давлениях в сотни и миллионы атмосфер в ИФВ развит метод импульсного рентгеновского или протонного радиографирования развития во времени заданных квазигармонических возмущений на свободных границах пластин и оболочек, ускоряемых взрывом.

В исследованиях этим методом, развитым в ИФВ и принятым в последнее десятилетие «на вооружение» и на Западе, обнаружен эффект мгновенного разупрочнения ряда металлов за фронтом ударной волны и последующего их быстрого упрочнения в микросекундном интервале времени.

Объяснение этого эффекта найдено в гетерогенном характере деформирования материала на мезоуровне со скольжением в тонких локализованных полосах адиабатического сдвига шириной ~ 10 мкм (рис. 5).

В конструкциях локализованный адиабатический сдвиг может проявляться и на макроуровне. Его исследования и переход от качественных соображений к количественным данным о величине диссипируемой на сдвигах энергии позволят, по нашему мнению, создать адекватные физические модели и перейти к численному

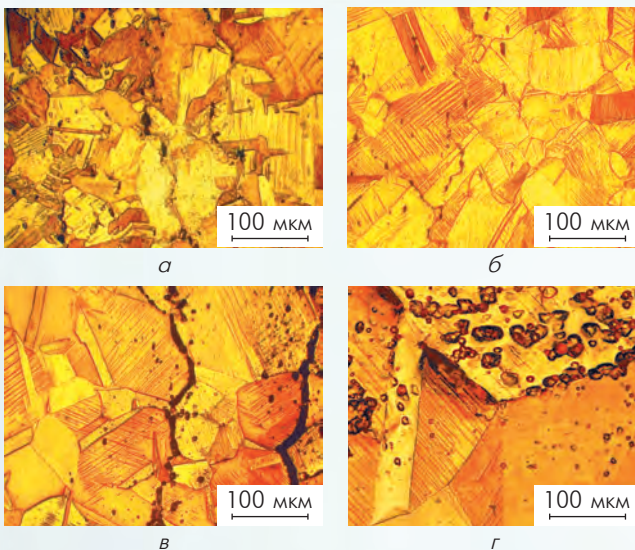


Рис. 5. Микроструктура образцов после эксперимента по определению поврежденности. Масштаб: а – 1:1; б – 1:2; в – 1:4; г – 1:8

описанию взрывостойкости систем, содержащих ВВ, при низкоскоростном ударе.

Для изучения механизмов высокоскоростного ($\sim 10^7 \text{ с}^{-1}$) деформирования и компактирования пористых, в том числе поврежденных волной разрежения, металлов на мезоуровне в ИФВ предложен и реализован еще один новый метод – металлографические исследования «захлопывания» малых ($\varnothing \sim 1 \text{ мм}$) пор и цилиндрических каналов под действием ударных волн и волн изэнтропического сжатия (рис. 6).



Рис. 6. Развитие микроструктуры локализованной деформации сдвига, полученной при разных длительностях нагружения: а – 72 мкс (начальная стадия, зерна начинают вытягиваться вдоль направления деформации); б – 140 мкс (развитая полоса сдвига)

Демонстрируемая на рис. 6, 7 гетерогенность течения поликристаллических металлов при захлопывании центрально-симметричных и осесимметричных пор, приводящая к нарушению симметрии их имплозии, наглядно, по нашему мнению, иллюстрирует одну из возможных причин ограничений в кумуляции энергии в мишенях инерциального синтеза, не учитываемую пока в расчетах. Пока не ясно, проявляется ли эта гетеро-

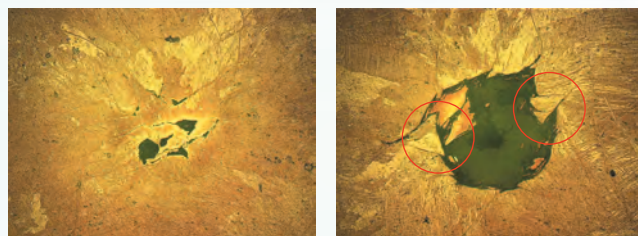


Рис. 7. Микроструктура урана в зоне скомпактированных каналов

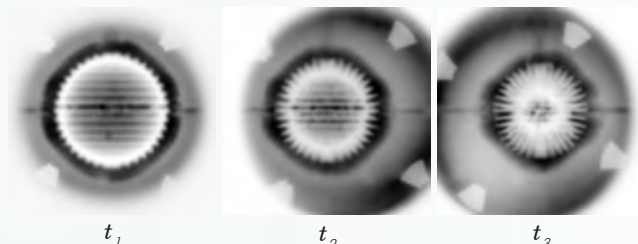


Рис. 8. Экспериментальные снимки на разные моменты времени ($t_1 < t_2 < t_3$)

генность течения при гораздо более высоких, чем исследованные нами, скоростях деформирования, характерных для мишеней ИТС? С этой точки зрения было бы интересно изучить также характер захлопывания пор в аморфных средах.

Метод возмущений, область применения которого в плоской геометрии взрывных систем ограничена давлениями $< 1 \text{ Мбар}$, реализован в последние годы и в сферической геометрии. Это позволило продвинуться выше по шкале давлений в области $\geq 5 \text{ Мбар}$ при разработке и верификации моделей сдвиговой прочности металлов, что принципиально важно для ряда задач (рис. 8).

Гидродинамические неустойчивости. Метод возмущений, о котором говорилось выше, стал в последние годы неотъемлемым инструментом тестирования моделей динамических физико-механических свойств материалов с прочностью в области импульсных давлений в сотни тысяч и миллионы атмосфер. Гидродинамические неустойчивости, с другой стороны, – одна из основных причин ограничений в кумуляции энергии в мишенях инерциального термоядерного синтеза. Поэтому гидродинамические неустойчивости и последующее турбулентное перемешивание разнородных материалов являются предметом системных лабораторных исследований, представляющим самостоятельный научный интерес как с точки зрения понимания природы турбулентности, так и как инструмент тестирования физических и численных моделей работы систем инерциального синтеза (рис. 9–12).

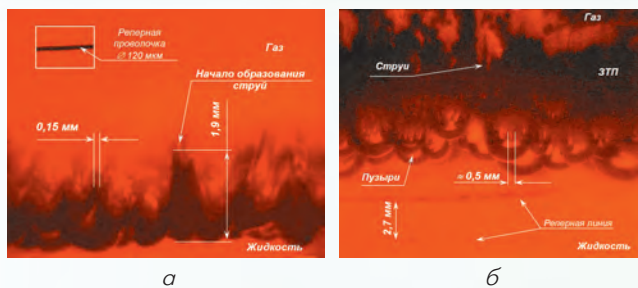


Рис. 9. Микроструктура зоны турбулентного перемешивания на границе газ–жидкость: а – переход процесса развития возмущений в турбулентную стадию; б – развитая зона турбулентного перемешивания (ЗТП)

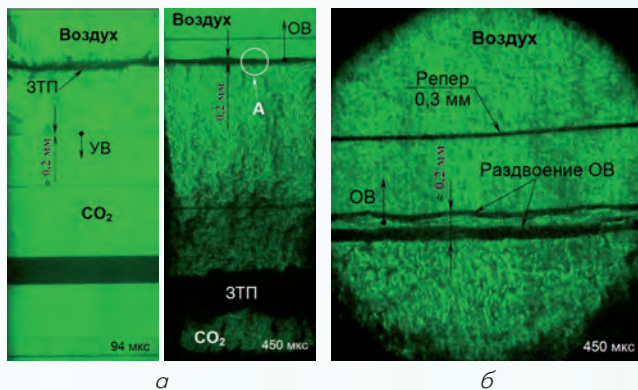


Рис. 10. Структура фронта ударной волны: УВ – падающая ударная волна; ЗТП – зона турбулентного перемешивания; ОВ – отраженная ударная волна, прошедшая через зону перемешивания; а – макрорегистрация; б – микрорегистрация в области А

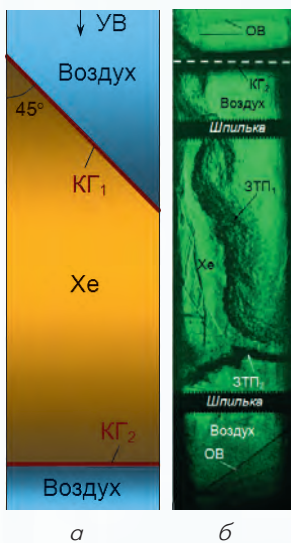


Рис. 11. Развитие турбулентного перемешивания в газовой слоежке воздух – ксенон – воздух: а – геометрия эксперимента; б – видеокادر течения; УВ – направление ударной волны; ЗТП₁ – зона турбулентного перемешивания на КГ₁; ЗТП₂ – зона турбулентного перемешивания на КГ₂; ОВ – отраженные волны

Для исследований микроструктуры зоны турбулентного перемешивания модельных сред (оптически прозрачные газы и жидкости) разработана методика

высокоскоростной лазерно-оптической фоторегистрации на микроуровне с фотографическим и временным разрешением в $\{ \sim 5 \mu\text{m} \}$ и $\sim 5 \text{нс}$ соответственно.

В этих исследованиях зарегистрирован эффект расслоения ударной волны, проходящей через бикомпонентную зону турбулентного перемешивания.

В турбулилизацию течения под действием гравитационных неустойчивостей на определенной стадии их развития, а также при ускорении границ раздела под углом к ее нормали свой вклад вносит сдвиговая неустойчивость (Кельвина–Гельмгольца), возникающая при разрыве тангенциальных скоростей течения двух сред.

Частный случай проявления гидродинамических неустойчивостей, представляющих практический интерес, – перемешивание границы раздела продуктов взрыва химического ВВ (или любого другого вещества) с воздухом с их последующим догоранием – играет существенную роль в величине тротилового эквивалента взрывов зарядов ВВ с отрицательным кислородным балансом.

В системах термоядерного синтеза отрицательную роль играет также специфический вид неустойчивости свободной границы твердых тел (материал корпуса мишени с термоядерным горючим) при выходе на нее изнутри материала ударной волны – так называемое ударно-волновое пыление, – выброс потока частиц, опережающих свободную границу. Эти частицы, внедряясь в термоядерное горючее, снижают его температуру и степень сжатия, тем самым препятствуя зажиганию и снижая скорость реакций синтеза.

Причин ударно-волнового пыления много: – шероховатость свободной поверхности, приводящая к микрокумуляции материала из впадин и к сколам с вершин и гребней; – поры и инородные включения в материале, приводящие при их прохождении ударной волной к микроискажениям ее фронта и, как следствие, к тем же последствиям – микрокумуляции;

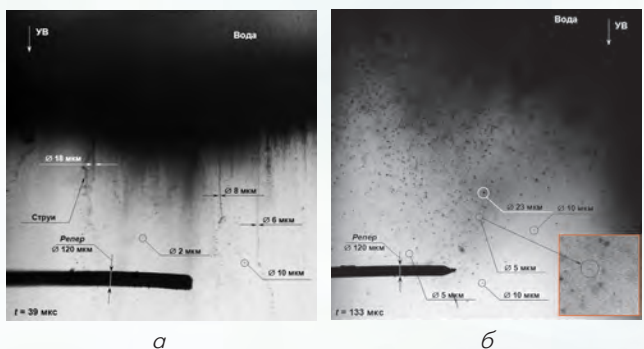


Рис. 12. Видеокадры процесса диспергирования жидкости: а – выбрасываются тонкие струи; б – струи распадаются на капли

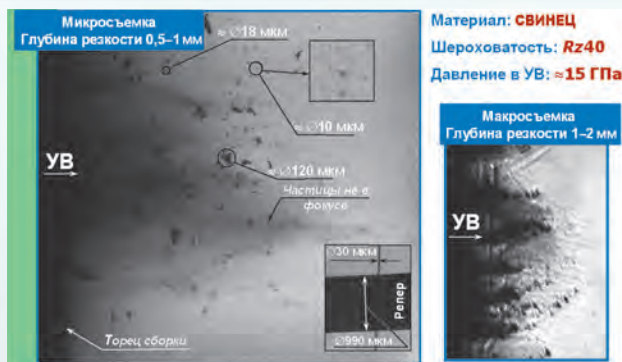
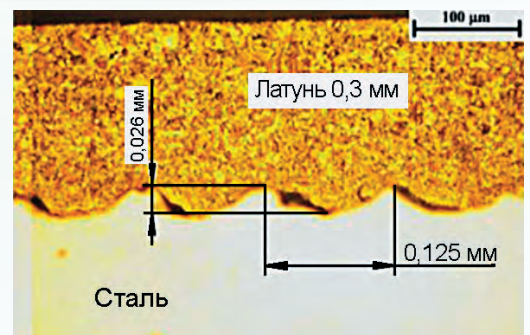


Рис. 13. Развитие неустойчивости Рихтмайера – Мешкова на свободной поверхности металла (поздняя стадия, ударно-волновое пыление)

- гетерогенность структуры твердых тел;
- гетерогенность течения материала на сдвиговых локализованных деформациях;
- искажения формы и разнодинамичность фронта ударной волны, приходящей извне на мишень;
- гидродинамические неустойчивости и струйные течения из-за кавитационных процессов в расплавленном материале мишени;
- пространственно-временная гетерогенность (асинхронность) кинетики плавления металла за фронтом ударной волны или в последующей волне разрежения;
- откольные процессы как в твердых, так и жидких материалах и т. п.

Множество механизмов, приводящих к пылению, делают задачу адекватного численного описания процесса нетривиальной, а важность проблемы требует ее детального экспериментального изучения с привлечением набора методик, основанных на разных физических принципах (рис. 13). В ряде случаев преобладающей может быть одна из причин пыления, и тогда задача упрощается.

Взрывчатые вещества. Основной инструмент для создания экстремальных состояний вещества в ИФВ – взрывчатые вещества. Они же являются одновременно и предметом исследований и разработок. В данной публикации мы остановимся на новых возможностях в управлении детонационными характеристиками взрывчатых веществ. Прежде всего – это достигнутое нашими специалистами значительное уменьшение (в 5–10 раз) критического сечения детонирующего слоя (диаметра) – вплоть до 20–30 микрон таких широко известных мощных бризантных ВВ, как ТЭН, гексоген, октоген, бензотрифуроксан и т. п. Основа этого достижения – наноструктурирование, обеспечиваемое технологией



сталь + латунь 0,3 мм

Рис. 14. Макроструктура соединений сварки взрывом

термовакuumного осаждения ВВ, во многом аналогичной технологии изготовления печатных плат электронной техники. Это качество открывает новые перспективы в прецизионировании и повышении эксплуатационной безопасности элементов и приборов взрывной автоматики.

На основе тех же, широко применяемых бризантных взрывчатых веществ, но субмикронной («нано»-) структуры, нашими специалистами разработаны и запатентованы смесевые составы, способные устойчиво детонировать в слоях миллиметровой толщины (~ 2 мм) с малой скоростью детонации (2–3) км/с, что принципиально важно для прецизионного изготовления биметаллических, триметаллических (и т. п.) металлокомпозитов методом сварки взрывом (рис. 14).

Применение взрывных технологий. Методы сварки взрывом по заказам Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ, г. Дубна) и ОАО «НИКИЭТ» (Москва) разработаны технологии и изготовлены опытные образцы узлов криогенного модуля для проекта международного линейного коллайдера и заготовок биметаллических адаптеров-токосъемников для проекта международного реактора ИТЕР (рис. 15).

Неядерные вооружения. Разработана и внедрена в практику не имеющая аналогов в Рос-



Рис. 15. Узел криомодуля коллайдера ILC

сии методика определения характеристик осколочного поля боеприпасов (распределения поражающих элементов по размерам, пространственным координатам и скоростям) по его рентгеновскому аксонометрическому изображению, заменяющая на стадии разработки боеприпаса практически все имеющиеся методики (рис. 16).

Разработан и успешно испытан вариант снарядоформирующего заряда (СФЗ) с поражающим элементом (ядром) из тантала с повышенной в ~1,8 раза основной характеристикой по сравнению с прототипом.

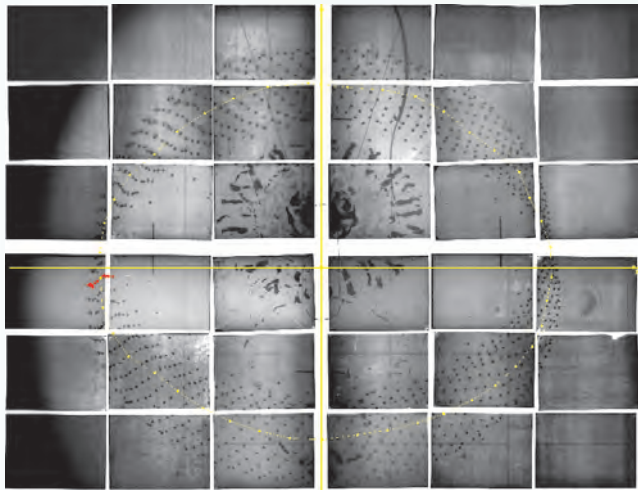


Рис. 16. Характерное рентгеновское изображение осколочного поля

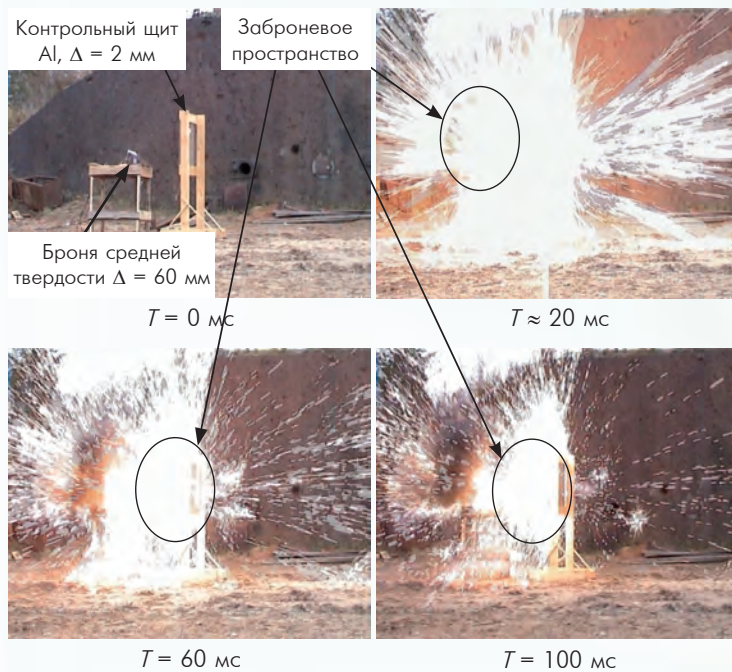


Рис. 17. Видеосъемка поражения брони и образования спектра осколков в заброне пространстве

На основе циркониевой облицовки создан прототип СФЗ с повышенным запреградным зажигательным действием (рис. 17).

Разработан и испытан вариант кумулятивно-го заряда с новой геометрией облицовки «тюльпан», обладающий повышенным бронепробитием по сравнению с прототипом с традиционной конической облицовкой.

Разработан и испытан модернизированный вариант кумулятивной боевой части комплекса «Хризантема», имеющий большее бронепробитие по сравнению с серийным прототипом.

Физические установки и аппаратные комплексы газодинамических исследований. Самой крупной научно-методической работой последних лет, выполненной коллективом нескольких институтов РФЯЦ-ВНИИЭФ (ИФВ, ИТМФ, ИЯРФ, НТЦФ) совместно с коллективом ГНЦ Институт физики высоких энергий (ИФВЭ, г. Протвино), существенно расширившей возможности исследований взрывных быстропротекающих процессов, стало создание и сдача в опытную эксплуатацию уникального комплекса протонной радиографии ПРГК-100 на базе протонного ускорителя У-70 ИФВЭ.

Для проведения в условиях протонографического комплекса взрывных экспериментов с энерговыделением до нескольких десятков килограммов в тротиловом эквиваленте разработаны и сданы в эксплуатацию несколько типов много-разовых взрыволокализирующих камер.

Создан и введен в эксплуатацию многоканальный (>100 каналов) лазерный аппаратный комплекс доплеровской диагностики ЛОГИН по схеме гетеродин-интерферометра.

Возможности этого комплекса существенно, на порядки, превосходят возможности существовавших до него комплексов по числу каналов и светочувствительности и обладают новым качеством – диагностикой движения пылевых образований, струй и множественных отколов, движущихся перед свободной поверхностью (рис. 18).

Другая, не менее интенсивно развивающаяся в ИФВ, невозмущающая непрерывная доплеровская диагностика движения газодинамических разрывов – микроволновая радиоинтерферометрия миллиметрового диапазона длин волн зондирующего электромагнитного излучения (рис. 19).

Ее принципиальное отличие от лазерной диагностики микронного и суб-

микронного диапазона – возможность «видеть» процессы внутри радиопрозрачных сред, к которым относятся практически все диэлектрики, включая ВВ. Спектр приложений доплеровской радиоинтерферометрии чрезвычайно широк – от исследований структурных превращений в веществах за фронтами ударных волн и процессов возбуждения и развития детонации до диагностики динамики крупногабаритных конструкций и радиометрии.

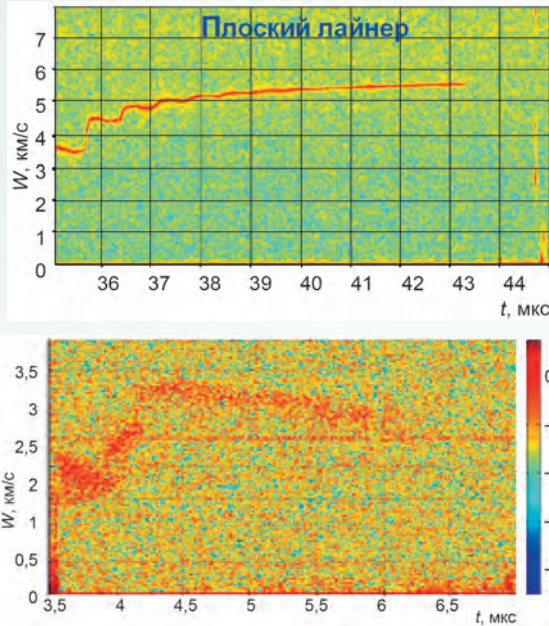


Рис. 18. Доплеровская регистрация $w(t)$ полета лайнера и спектрограмма распределения потока микрочастиц перед свободной поверхностью

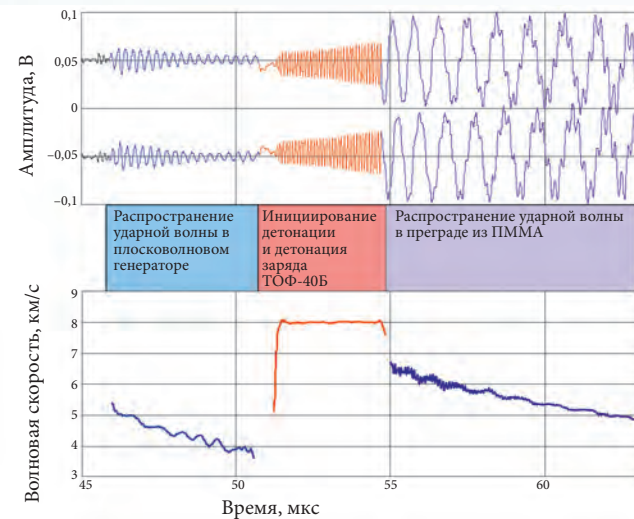


Рис. 19. Определение адиабаты расширения продуктов взрыва ВВ (экспериментальная интерферограмма)



Рис. 20. Хронограмма разновременности срабатывания каналов во взрывном опыте

К традиционным для ИФВ в диагностике быстрой протекающих процессов относятся многоканальные (число каналов – сотни) измерения логических и аналоговых сигналов, формируемых различными датчиковыми системами – электроконтактными, пьезоэлектрическими, контактно-оптическими, электрорезистивными, а также импульсных потоков (n, γ)-излучений (рис. 20).

К серьезным достижениям последнего десятилетия можно отнести несколько аппаратных комплексов, созданных на современной элементной базе с применением компьютерных технологий.

За истекшее пятилетие исследовательская и испытательная базы ИФВ дополнились лабораторным комплексом подводных исследований (ЛНИК) в составе крупнейшего в Европе бассейна, а также камерой высокого давления, позволяющей моделировать взрывные процессы при давлении внешней среды, имитирующей погружение до 4 м.



Комплекс для подводных взрывных исследований

Исследования и разработки продолжают.

МИХАЙЛОВ Анатолий Леонидович – директор ИФВ РЯЦ-ВНИИЭФ, доктор технических наук, лауреат Государственной премии и премии Правительства РФ