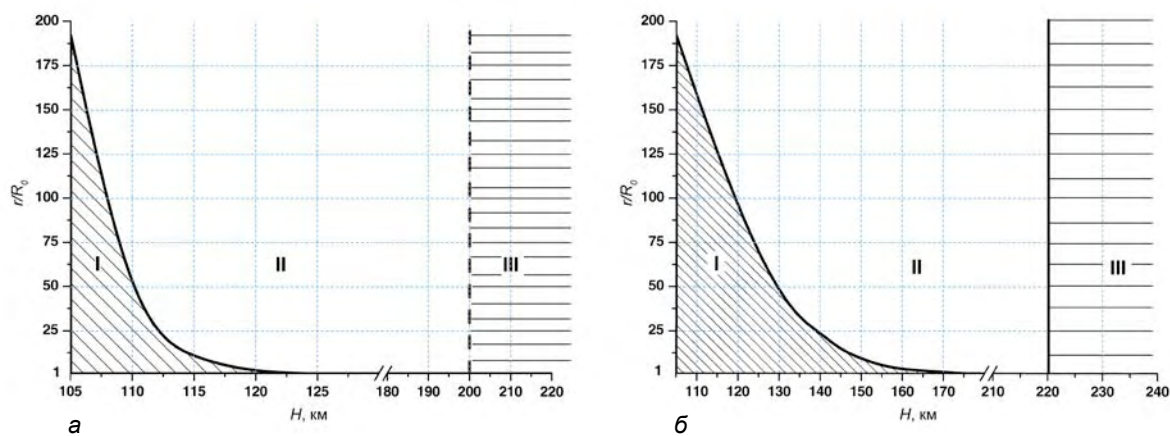


тического поля на их движение пренебрегалось. Считалось, что фотоэлектроны движутся вдоль силовых линий геомагнитного поля. В обоих случаях движение фотоэлектронов считалось бесстолкновительным. Показано, что возможность фотоэлектронам уйти из области ядерного взрыва зависит от скорости света, проводимости ионосферы,

начальной скорости фотоэлектронов, координаты точки рождения фотоэлектрона, радиуса полной ионизации воздуха выходящим рентгеновским излучением, частоты Ленгмюра в области полной ионизации $r \leq R_0$. На рисунках приведены некоторые результаты расчетов для параметров рентгеновского излучения, которые реализовались в

операции «Starfish». В области I фотоэлектроны «запираются» и покинуть ее не могут; из области III уйдут все фотоэлектроны; из области II может уйти только часть электронов. Как видно из рисунков, все фотоэлектроны могут покинуть область ядерного взрыва при взрыве на высоте $H > 200$ км (дневное время) и $H > 220$ км (ночное время).



Характерные области задачи: а — дневное время вблизи максимума цикла солнечных пятен; б — ночное время вблизи минимума цикла солнечных пятен; H — высота точки взрыва; r — координата точки рождения фотоэлектрона, R_0 — радиус полной ионизации воздуха выходящим рентгеновским излучением

ИНСТИТУТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ГАЗОДИНАМИКИ И ФИЗИКИ ВЗРЫВА (ИФВ)

Введен в эксплуатацию рентгенографический комплекс РГК-Б, состоящий из трех рентгеновских установок нового поколения БИМ234.3000 и многоканальной многокадровой электронной системы регистрации рентгеновского изображения субмикросекундного диапазона. Новый комплекс позволит регистрировать быстротекущие процессы в трех направлениях. Это даст возможность математическими методами воссоздать трехмерную картину объекта исследования в разные моменты времени. Комплекс расширит возможности исследователей и позволит им решать практически весь спектр задач, поставленных перед газодинамиками.



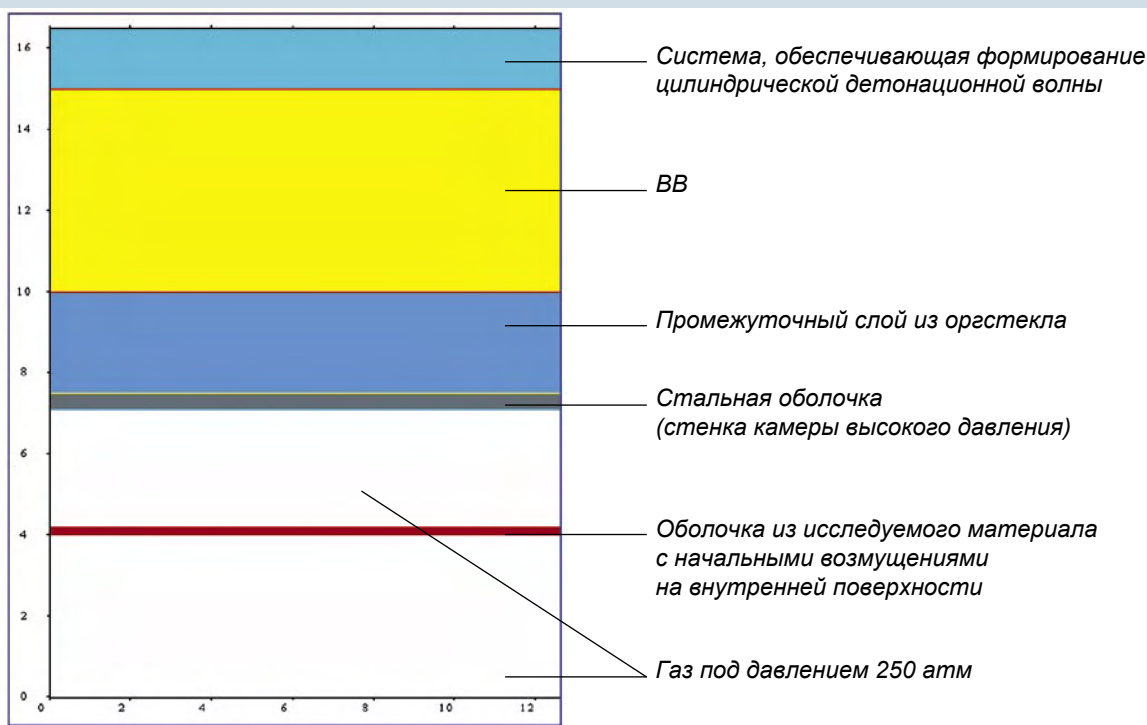
Рентгенографический комплекс РГК-Б. Центральный зал с тремя рентгеновскими установками БИМ234.3000

Методом возмущений проведено исследование прочности природного урана в диапазоне давлений до 6 Мбар. В опытах регистрировался рост возмущений на поверхности сжимаемой цилиндрической оболочки с помощью импульсной рентгенографии. Уровень давления, при котором получены данные о сдвиговой прочности урана, на сегодняшний день является «мировым рекордом». После детонации ВВ происходит

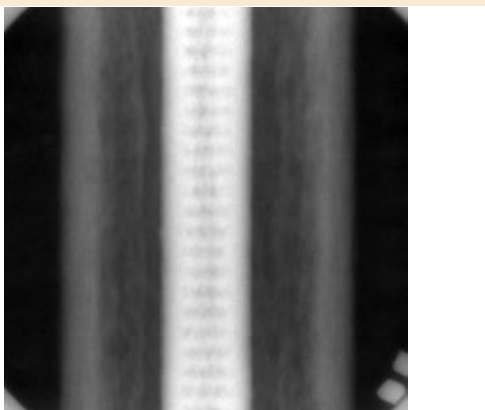
осесимметричное схождение оболочек. В сжимающемся газе растет давление, что с некоторого момента приводит к торможению и последующему разлету оболочек. После начала торможения происходит рост амплитуды возмущений на внутренней поверхности оболочки из исследуемого вещества. Интенсивность этого роста определяется в том числе и прочностью материала в данных условиях. В эксперименте

фиксируется положение границ оболочек и амплитуда возмущений в различные моменты времени. Полученные данные используются для верификации моделей прочности и определения сдвигового напряжения.

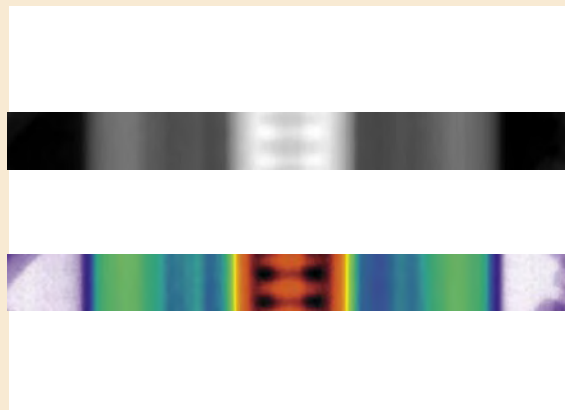
Анализ эксперимента показал, что максимальное сдвиговое напряжение при давлении 6 Мбар достигает ≈ 300 кбар, что в 600 раз выше, чем при нормальных условиях.



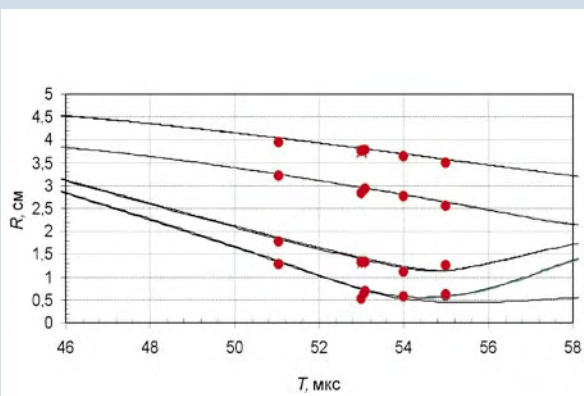
Принципиальная схема экспериментального устройства для исследования прочности



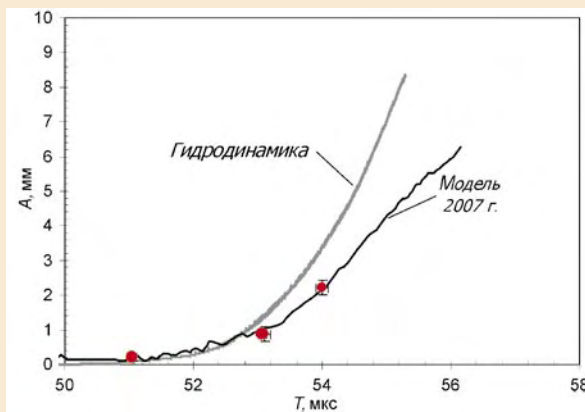
Типичный рентгено снимок оболочек экспериментального устройства с развившимися возмущениями большой амплитуды



Результат математической обработки участка рентгено снимка для трассировки границ и определения амплитуды возмущений в опыте



Движение границ оболочек экспериментального устройства (линии — расчет, точки — эксперимент)



Рост амплитуды возмущений на внутренней границе оболочки исследуемого вещества. Гидродинамика — расчет без учета прочности материала оболочки; модель 2007 г. — расчет с использованием современной модели поведения вещества

Внедрена методика исследования взрывных процессов с помощью радиоинтерферометра миллиметрового диапазона. Методика позволяет проводить непрерывную регистрацию динамики ударных и детонационных волн в ВВ. С помощью

данной методики проведены исследования зависимости глубины возбуждения стационарной детонации от давления инициирования в составах на основе октогена и ТАТБ. На X-t-диаграмме отчетливо виден излом, соответствующий

моменту возбуждения стационарной детонации в образце. В эксперименте с составом на основе ТАТБ глубина возбуждения детонации составила 5,54 мм при давлении инициирования 14 ГПа, а скорость детонации — 7490 м/с.

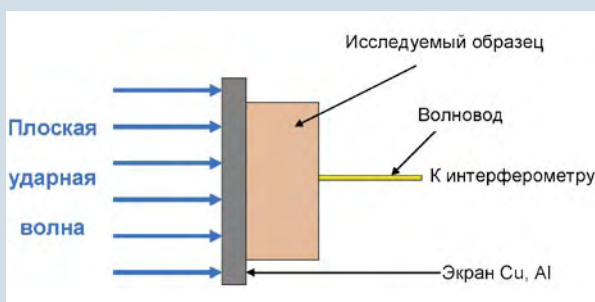
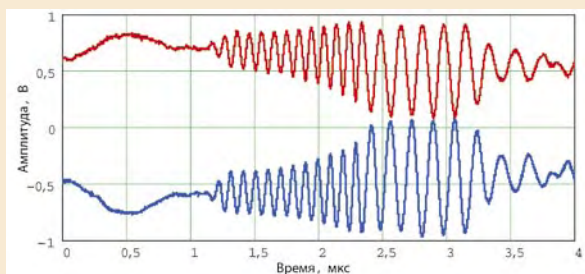
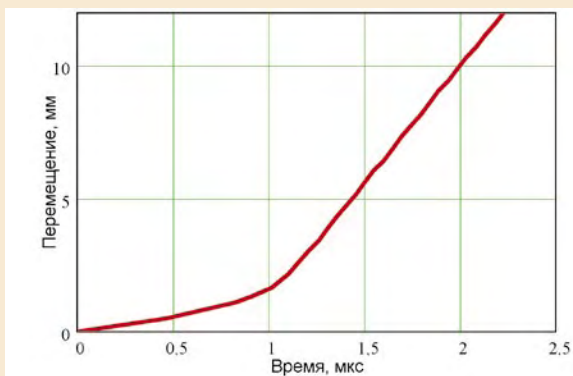


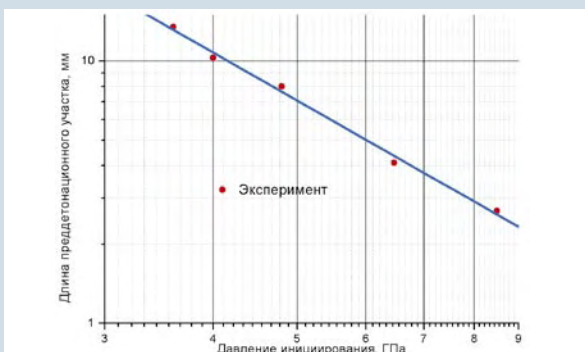
Схема проведения экспериментов



Типичные интерферограммы процесса распространения детонации



Типичная X-t-диаграмма процесса распространения нормальной детонации



Зависимость глубины возбуждения детонации от давления инициирования для состава на основе октогена (скорость детонации 8830 м/с)

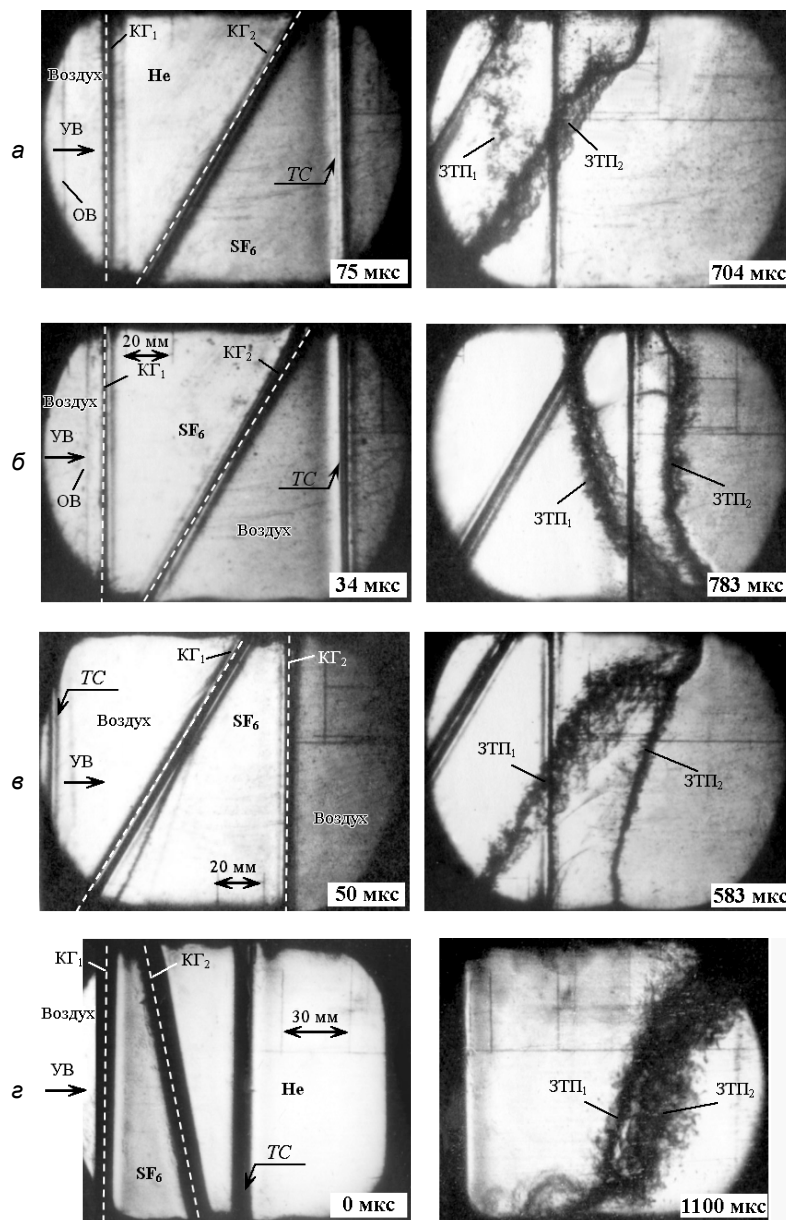
Исследовано развитие турбулентного перемешивания в трехслойных газовых системах с наклонной контактной границей. Регистрировалось развитие перемешивания на контактных границах газовых слоев воздух- He-SF_6 , воздух- SF_6 -воздух, воздух- SF_6 - He . Число Маха падающей ударной волны составляло 1,3. Газы изначально разделялись тонкой (1 мкм) полимерной

пленкой, которая под действием ударной волны разрушалась.

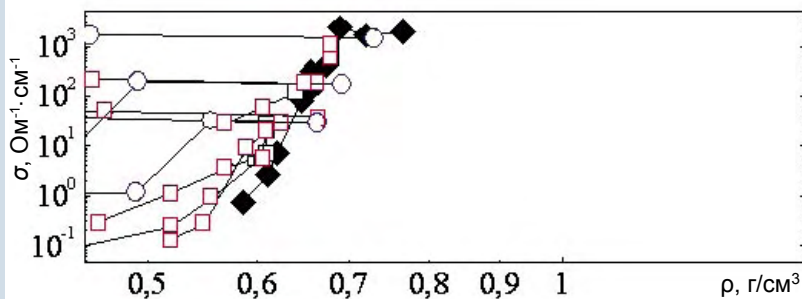
В каждой серии опытов одна из контактных границ газов располагалась параллельно фронту падающей ударной волны, другая — под определенным углом, что приводило к возникновению двумерного течения со сложным характером перемешивания газов на этих границах.

Полученные данные будут использованы для тестирования численных методов расчета неустойчивых гидродинамических течений.

Завершено исследование квазиизэнтропической сжимаемости газообразного дейтерия в двух каскадных цилиндрических устройствах. Исследуемая в опытах область состояний дейтерия лежит в интервале давлений от ~ 70 до ~ 500 ГПа и температур от ~ 3000 до ~ 5000 К. Эксперименты с устройствами цилиндрической геометрии выполнены на экспериментальном полигоне с помощью двух независимо работающих бетатронов, оси которых расположены под углом 135° друг к другу. В серии последовательных экспериментов определяли $R(t)$ -диаграмму движения оболочки и радиус в момент максимального сжатия газа (момент «остановки»). Плотность дейтерия между экспериментальными точками при давлениях 127 и 140 ГПа возрастает на $\sim 25\%$. Не исключено, что выявленный скачок плотности является экспериментальным доказательством фазового перехода нового типа в сильно неидеальной плазме дейтерия с сильным кулоновским взаимодействием частиц, а не обычным переходом «газ-жидкость» или плавлением молекулярного кристалла. Обнаруженный переход подтверждает резкий рост электропроводности водорода (на пять порядков) в области плотностей $0,6 - 0,7$ г/см³ в экспериментах, в которых водород сжимался серией последовательных ударных волн. Анализ данных показывает, что рост проводимости неидеальной плазмы водорода связан с ионизацией давлением. При переходе к дейтерию зафиксированный рост электропроводности соответствует плотностям $1,2 - 1,4$ г/см³, что согласуется со скачком плотности квазиизэнтропически сжатого дейтерия.



Развитие перемешивания в слоеке воздух- He-SF_6 (а); воздух- SF_6 -воздух (б); воздух- SF_6 -воздух (в); воздух- SF_6 - He (г). ОВ — отраженная волна; КГ_1 , КГ_2 — контактные границы газов; ЗТП₁, ЗТП₂ — зоны турбулентного перемешивания на КГ_1 и КГ_2 ; ТС — технологический стык



Зависимость электрической проводимости от плотности:
 ◆ — данные ИПХФ для жидкого водорода;
 ○, □ — данные LLNL для газообразного дейтерия

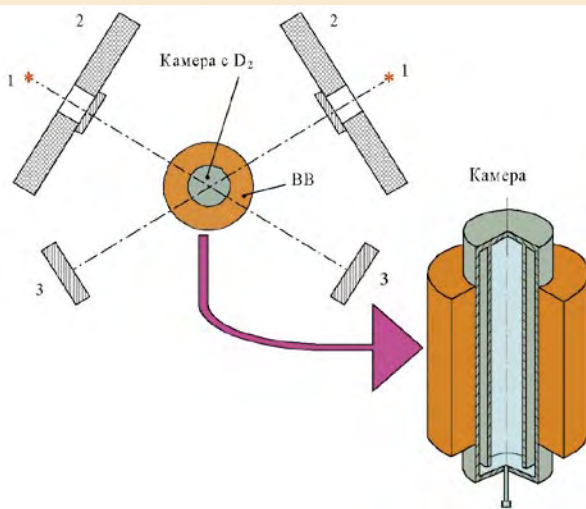
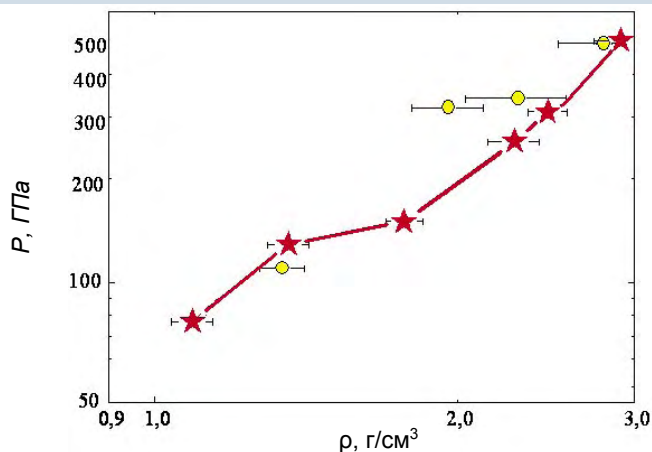
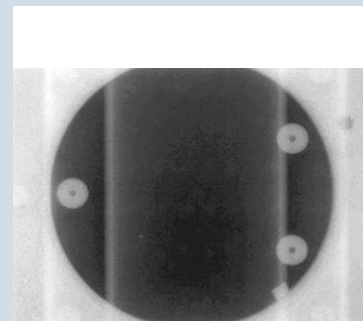


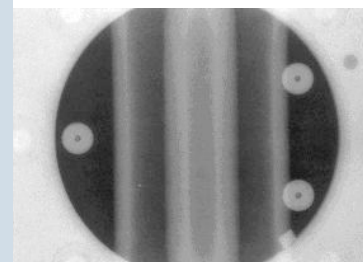
Схема эксперимента по измерению сжимаемости газообразного дейтерия в цилиндрической камере: 1 — источники γ -излучения; 2 — казематы; 3 — регистратор



Квазиизэнтропическое сжатие газообразного дейтерия:
 ● — данные С. Б. Корнера и др.; ★ — новые данные



а



б

Рентгенограммы оболочек в экспериментальном устройстве с массой ВВ 16 кг в исходном состоянии (а) и в момент максимального сжатия дейтерия (б)

Разработан новый метод исследования деформирования, компактирования и гетерогенного течения металлов на микро- и мезомасштабных уровнях при скорости деформации $10^5 - 10^7 \text{ с}^{-1}$, основная идея которого состоит в том, что в исследуемом образце заранее создаются цилиндрические отверстия (поры) размером $d < 1 \text{ мм}$. Достигаемые в эксперименте параметры деформации $\epsilon_i \sim 30 - 150 \%$; скорости деформации $\dot{\epsilon}_i \sim 10^5 - 10^7 \text{ с}^{-1}$. При таких параметрах в меди происходит переход к гетерогенному характеру течения на двух масштабных уровнях (100 и 10 мкм).

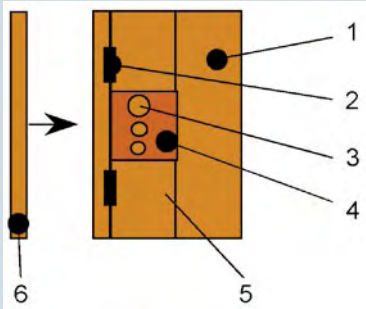
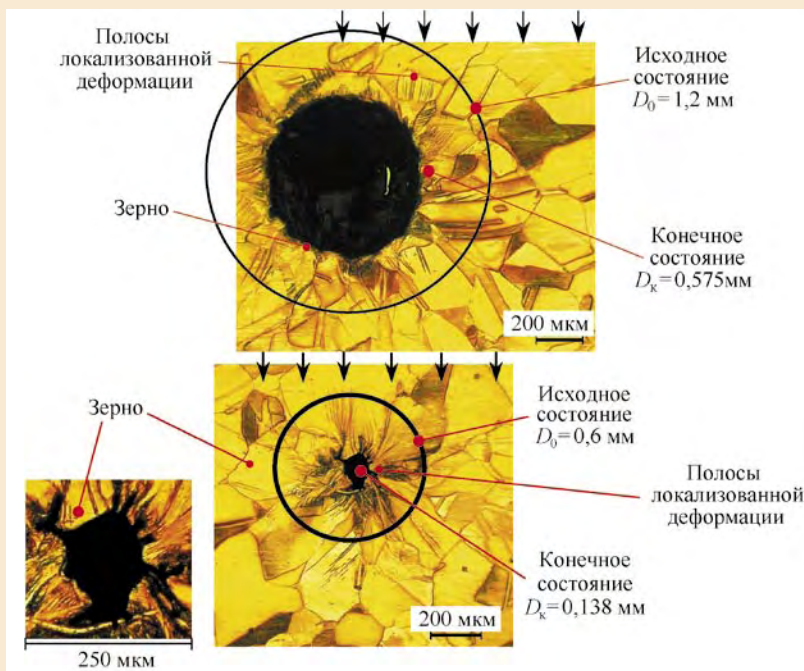


Схема нагружения: $\sigma_x = 1,6$ ГПа; $t = 1$ мкс: 1 — подложка; 2 — датчики; 3 — пора; 4 — сохраняемый образец; 5 — обойма; 6 — ударник

Обнаружена зонная структура распределения поврежденности в образце меди после прохождения по нему интенсивных волн сжатия и разрежения. Распределение поврежденности имеет характер скопления пор с характерным размером 0,5 – 1 мм. На диаграмме показано распределение поврежденности в образце в зависимости от размера зазора ($\Delta_3 \sim 320 - 140$ мкм). Такой характер распределения не имеет в настоящее время теоретического объяснения.



Состояние пор до и после нагружения

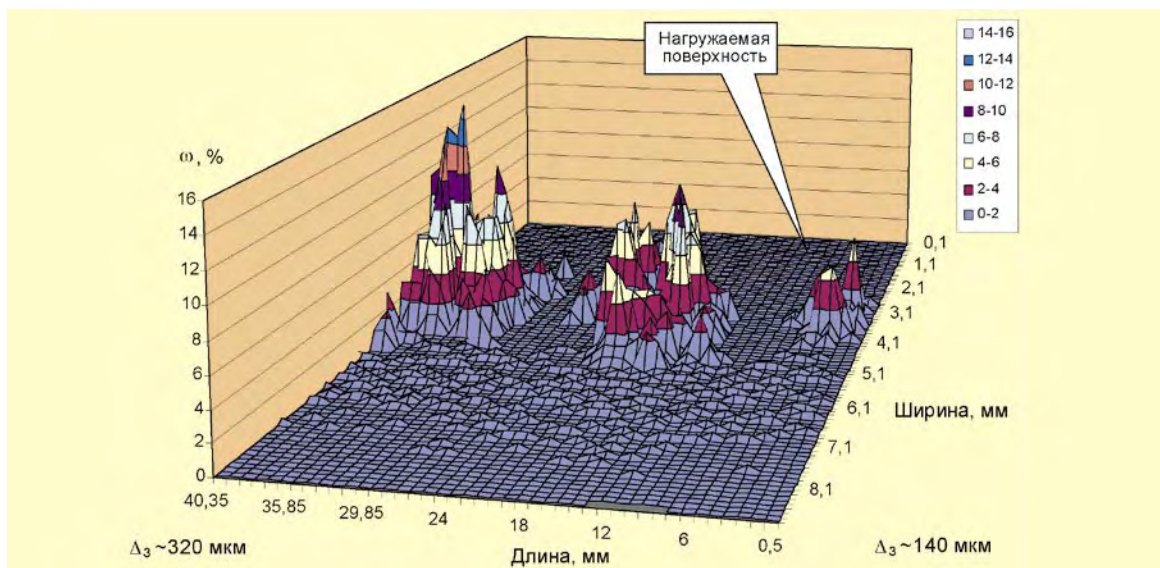
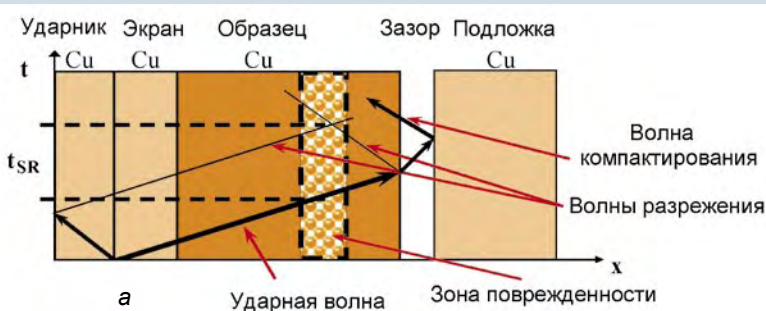


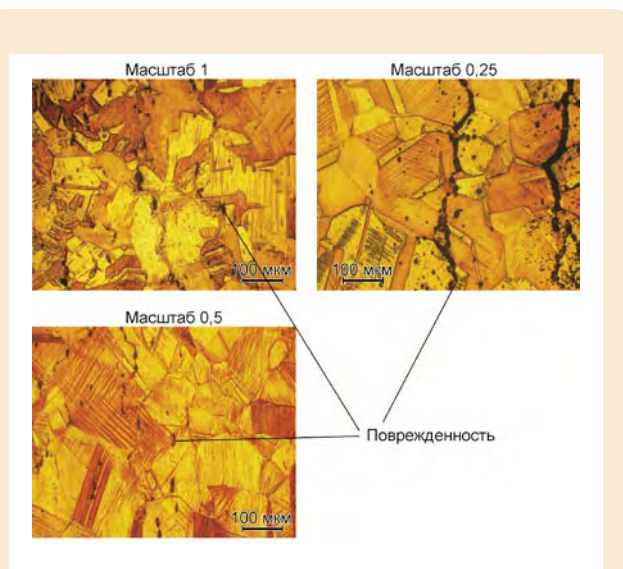
Схема эксперимента (а) и диаграмма распределения поврежденности по образцу (б)

Обнаружено нарушение масштабного эффекта при откольном разрушении. В исследуемых образцах уменьшался интервал времени между моментом прохождения ударной волны и началом разрушения t_{SR} за счет изменения масштаба эксперимента в два и четыре раза. Интенсивность нагружения во всех экспериментах сохранялась на уровне ~ 35 ГПа. Сохраненные после опытов образцы разрезались и измерялась поврежденность. Зарегистрировано увеличение поврежденности при уменьшении масштаба, хотя существующие в настоящее время модели разрушения предсказывают обратный

эффект. Возможной причиной этого эффекта является образование перегретых полос локализованной деформации после воздействия ударных волн.

Проведены исследования влияния скорости соударения на эффективность множественного удара. Установлено, что более глубокое проникание в твердые мишени группы ударников по сравнению с одиночным ударником происходит при

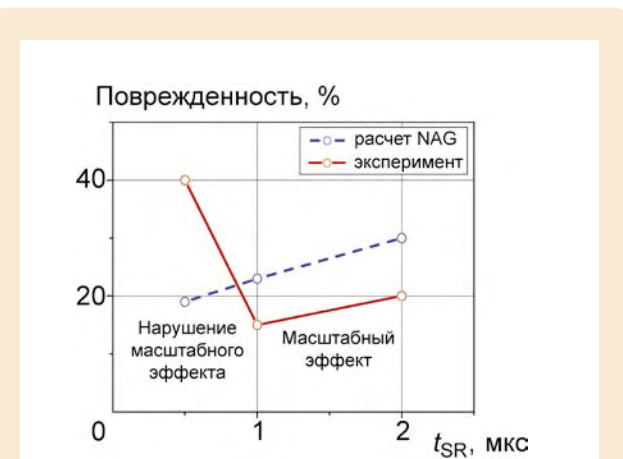
скоростях U , приблизительно равных или больших пороговой скорости U_n . Глубины проникания при одиночном ($z_{од}$) и множественном ($z_{мн}$) ударах возрастают приблизительно по степенному закону $z \propto U^{1/3}$, причем в диапазоне скорости соударений 840–2100 м/с имеет место систематическое превышение глубин проникания при множественном ударе: $(z_{мн}/z_{од})_{exp} = 1,2 - 1,6$.



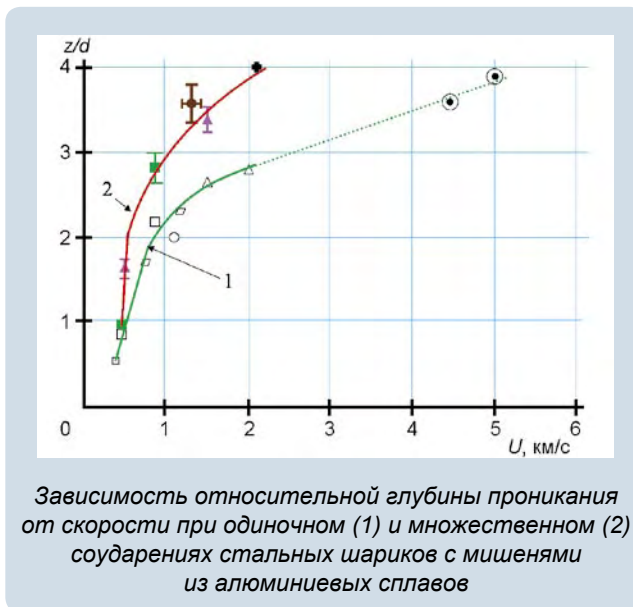
Микроструктура образцов после эксперимента



Мишени после опыта: а — титан ВТ-20, сферические ударники $\varnothing 5$ мм; б — алюминий Д16, цилиндрические ударники $\varnothing 5 \times 5$ мм. Ударники из стали ШХ15, скорость соударения $U = 900$ м/с



Зависимость поврежденности от времени прихода откольного импульса



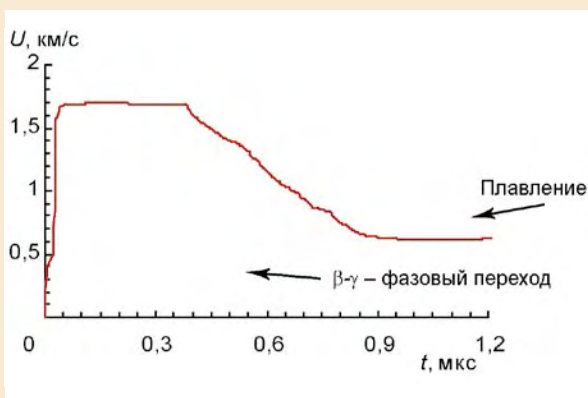
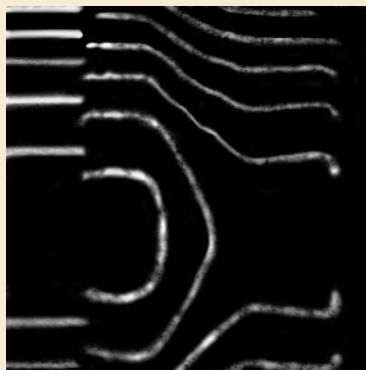
Зависимость относительной глубины проникания от скорости при одиночном (1) и множественном (2) соударениях стальных шариков с мишенями из алюминиевых сплавов

С помощью лазерного интерферометра в олове зарегистрированы β - γ -фазовый переход при $P = 8,8$ ГПа и переход в жидкое состояние (плавление) на волне разгрузки при $P = 9,75$ ГПа. Данный метод может быть использован для регистрации фазовых переходов, в том числе

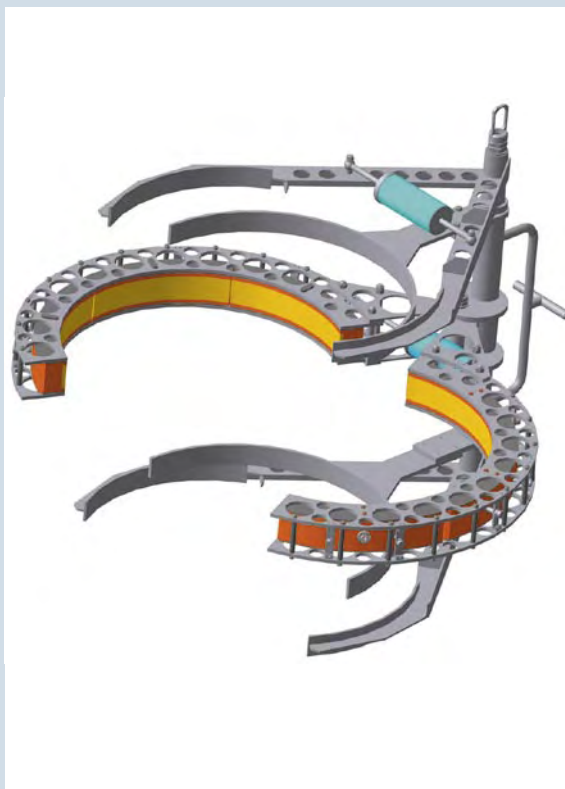
плавления в других металлах.

Разработан и испытан взрывной резак для наружной резки опор морской платформы с наружным диаметром трубы 762 мм и толщиной стенки до 51 мм. Взрывной резак должен надежно функционировать в водной среде на глубине погружения до 300 м.

В конструкции резака применен метод ударных волн разрежения. Резак состоит из шести фрагментов с ВВ, которые коаксиально с помощью пневматического привода охватывают трубу. При подрыве ВВ массой не более 6 кг происходит разделение трубы в месте реза.



Интерферограмма опыта и профиль массовой скорости олова



Макет взрывного резака в исходном состоянии

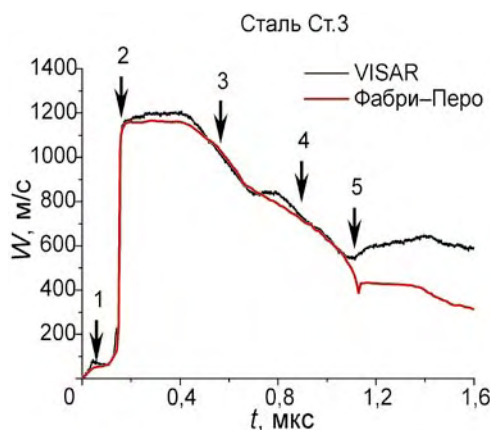
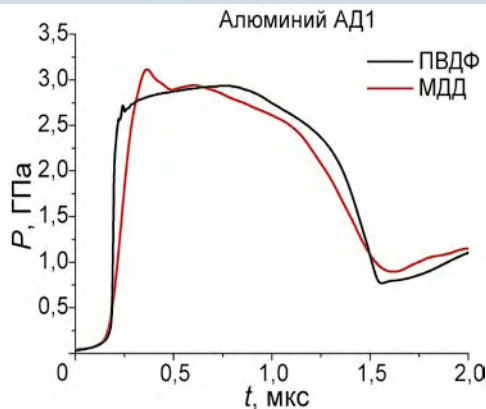
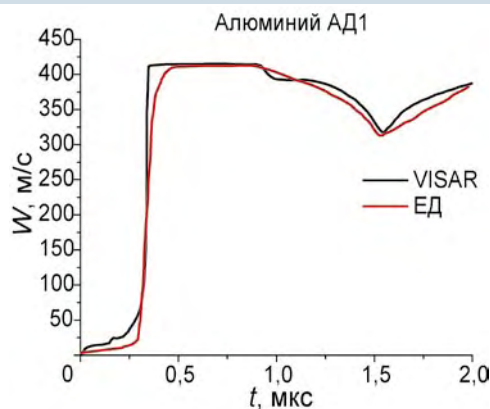


Фрагменты трубы до опыта и после реза

Проведены сравнительные исследования разрешающей способности и точности регистрации профилей ударных волн и волн разрежения в средах, испытывающих упругопластические и фазовые переходы, с помощью манганино-

вого (МДД), емкостного (ЕД), поливинилиденфторидного (ПВДФ) датчиков и лазерных интерферометров, работающих по схеме VISAR (Velocity Interferometer System for Any Reflector) и Фабри—Перо. Показано, что с помощью арсенала

методик ИФВ можно регистрировать с наносекундным разрешением параметры упругих волн разрежения, позволяющих определять динамическую прочность конструкционных материалов в диапазоне давлений 0,5–50 ГПа.



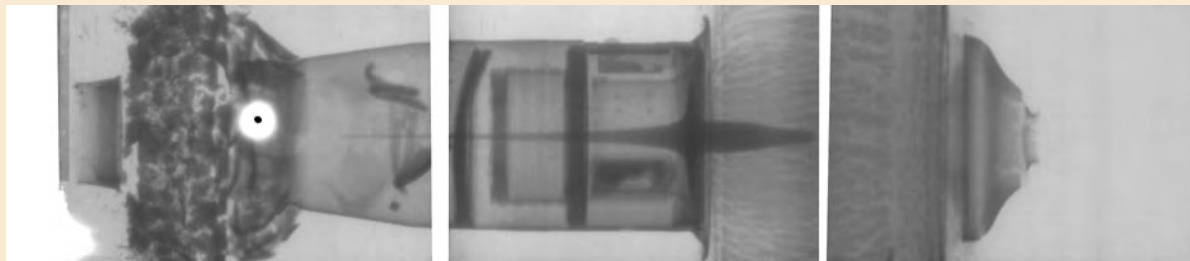
Зависимость скорости границы от времени:

- 1 — упругий предвестник;
- 2 — пластическая ударная волна;
- 3 — упругая разгрузка;
- 4 — пластическая разгрузка;
- 5 — откольный импульс

Специалистами ИЯРФ и ИФВ разработан комплекс РГК-М. Основу комплекса составляет импульсная рентгеновская установка «Страус-Р», формирующая рентгеновский импульс с энергией квантов 3 МэВ и длительностью до 50 нс. Экспозиционная доза в импульсе составляет 10–20 Р/м.

Установка «Страус-Р» позволяет просвечивать стальные конструкции толщиной до 200 мм, регистрировать взрывные процессы в изделиях со стальными корпусами, определять характеристики осколочных полей площадью до 30 м².

Рентгенографирование боеприпаса (см. рисунок) проведено на расстоянии ~20 м от источника на момент завершения работы лидирующего заряда, когда в его зону входит кумулятивная струя основного модуля.



Рентгенограмма испытания тандемного кумулятивного боеприпаса (погрешность 0,1 мкс)

Разработана взрывозащитная камера для исследования взрывных газодинамических процессов. Камера способна выдерживать взрывы мощностью 1,35 кг ТЭ.

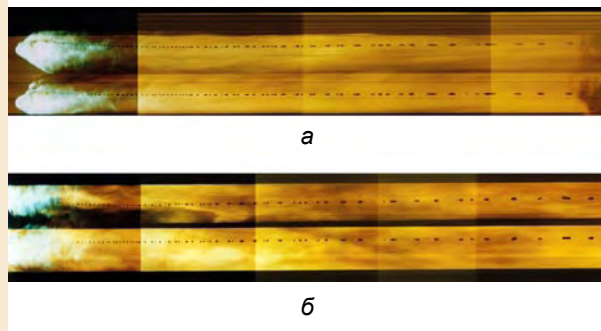
Разработан способ двойной ортогональной синхробаллистической фоторегистрации пора-

жающих элементов. Применение лазерного источника, зеркального отражателя и более совершенного перископного устройства позволило существенно повысить точность позиционирования изделий в измерительной системе. Способ позволяет в одном экспе-

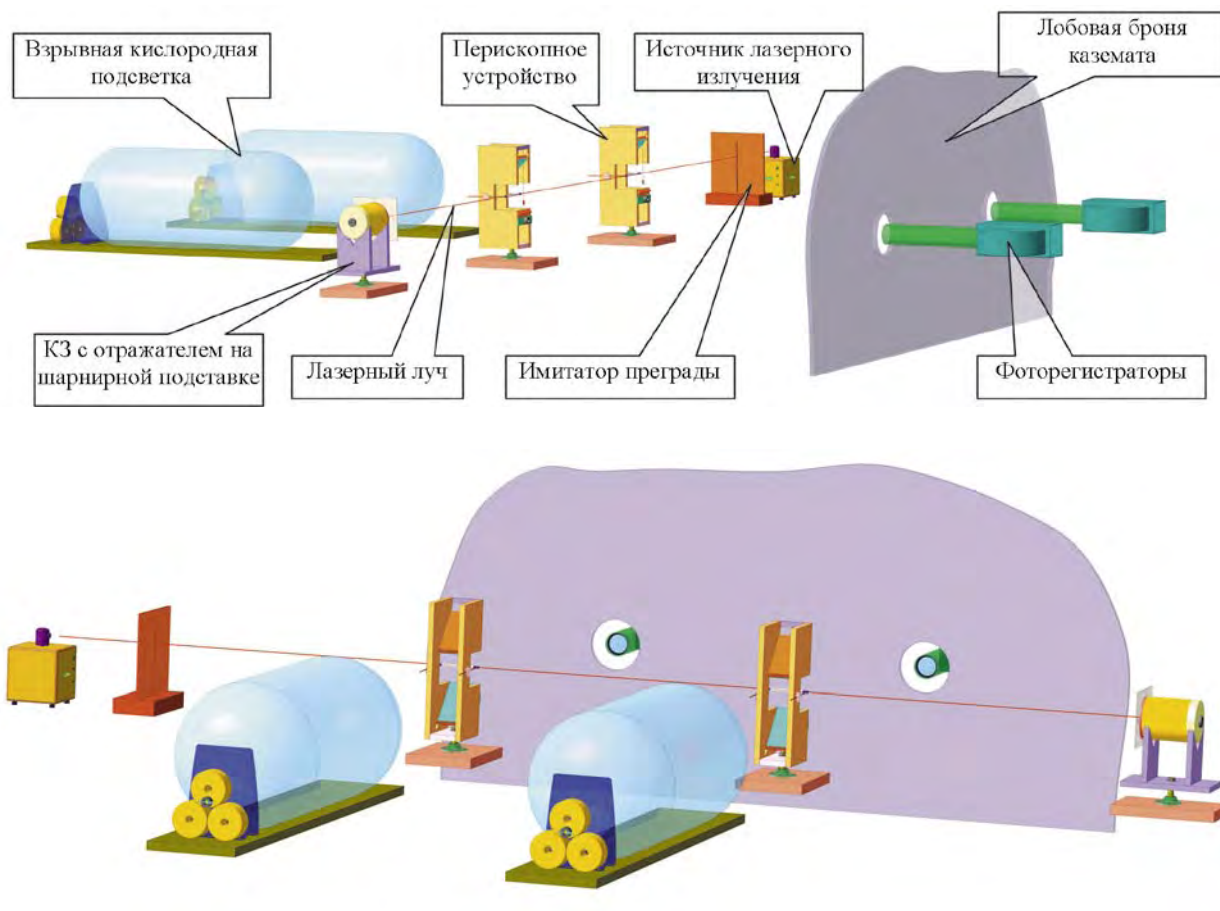
рименте успешно регистрировать как малые (несколько десятков м/с) скорости радиального смещения, так и существенно большие (10 км/с и более) осевые скорости поражающих элементов (например фрагментов кумулятивной струи).



Камера после испытания взрывом мощностью 1,35 кг ТЭ



Фотохронограмма кумулятивной струи: а — база регистрации 3,28 м; б — 4,65 м

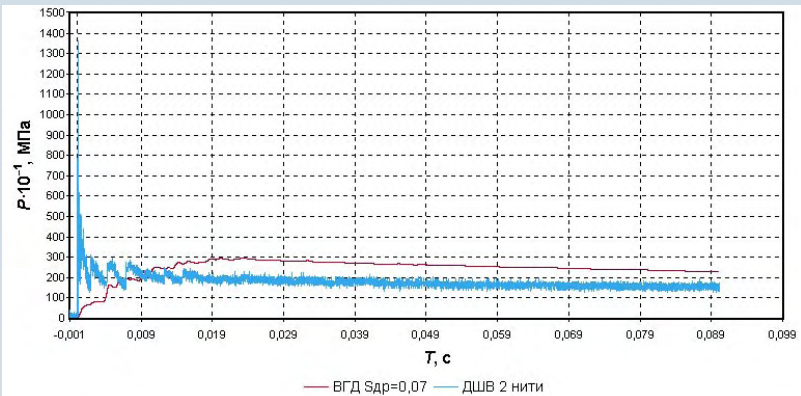


Фоторегистрация поражающих элементов

Разработана новая методика раскалывания крупных образцов блочного камня с минимальной трещиноватостью и минимальным количеством осколков. Особенностью применения взрывного генератора давления (ВГД) в данном случае является то, что подрыв заряда ВВ производится в камере, расположенной на поверхности, а в шпур поступают продукты взрыва под высоким давлением. В этом случае на горную породу действует сглаженное давление продуктов взрыва. Отсутствует бризантное воздействие взрыва, характерное для распространенного метода отбойки с помощью детонирующего шнура (ДШ), приводящее к образованию микротрещин в обрабатываемой породе. Проведены испытания работы ВГД на промышленном гранитном карьере ЗАО ПО «Возрождение» недалеко от г. Выборга Ленинградской обл. Устройство защищено патентом RU 54094.



Взрывной генератор давления



Сравнительная диаграмма развития давления в шпуре при работе ВГД и подрыве двух нитей ДШ

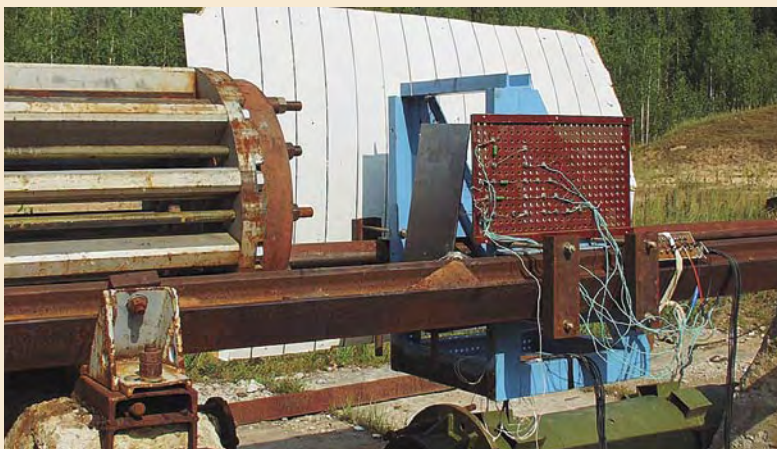


Кинограмма процесса раскалывания

В рамках договора с НПО «Сатурн» с использованием стенда «Ствол» проведены исследования работы вентилятора авиационного двигателя в условиях больших ускорений, возникающих при аварийных ситуациях. В частности, исследовано ударное воздействие фрагмента одной из лопаток двигателя при аварийном отрыве.

Создан переносной вариант лазерного интерферометра Майкельсона (система VISAR), адаптированного к условиям взрывных экспериментов. Трансляция лазерного излучения от исследуемого объекта до интерферометра осуществляется по длинным линиям из оптического волокна. Работоспособность

интерферометра проверена в условиях взрывных экспериментов. Созданный комплекс позволяет проводить исследования ударно-волновых процессов в материалах на современном уровне с высоким временным и амплитудным разрешением характеристик быстропротекающих процессов.



Установка «Ствол-410ПБ»



Модель лопатки после опыта

Полученные результаты позволили существенно изменить представления заказчика о характере деформации и разрушения лопаток вентилятора авиадвигателя в аварийных условиях.

Разработана электропушка, способная разгонять тонкие диэлектрические ударники до нескольких километров в секунду, используя энергию электровзрыва тонкой металлической фольги. Пушка предназначена для исследования материалов при коротком ударно-волновом воздействии — динамической прочности, скорости звука за ударным фронтом, проверки модельных представлений о физике ударного сжатия и физике релаксационных процессов в твердых телах.

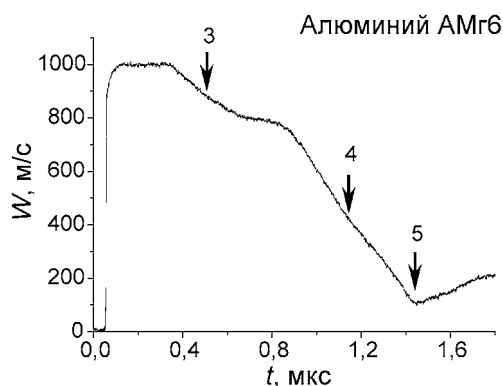
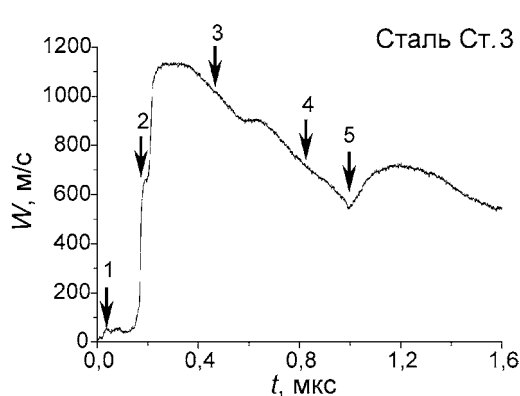
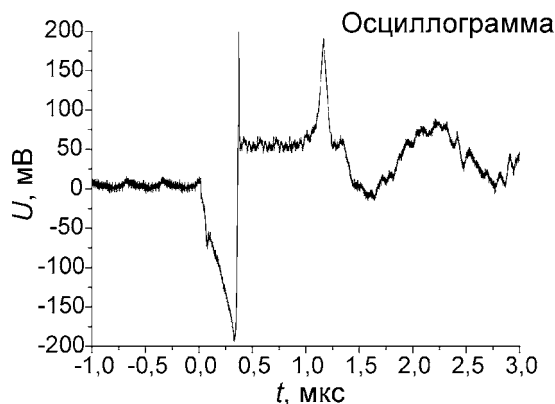
Достигнуты скорости метания: 2,7 км/с для ударника из оргстекла толщиной 1 мм и боковыми размерами 30 × 120 мм; 6 км/с для ударника из лавсана толщиной 0,15 мм и боковыми размерами 30 × 120 мм.

Параметры электропушки

Запасенная электрическая энергия	46 кДж
Частота собственных колебаний	100 кГц
Максимальная амплитуда тока в режиме короткого замыкания	10 ⁶ А



Электропушка



Осциллограмма и профили скорости контактной границы, зарегистрированные в опытах с алюминием АМг6 и сталью (Ст. 3):

- 1 — упругий предвестник; 2 — фазовый переход;
3 — упругая разгрузка; 4 — пластическая разгрузка;
5 — откольный импульс

Создан многофункциональный аппаратный комплекс АКМ-03 для многоканальной регистрации временных характеристик быстротекущих процессов с помощью оптических, контактных и генераторных датчиков, выдающих сигнал под действием ударной волны. Комплекс применяется в основных методиках при газодинамической отработке и испытании спецузлов.

В комплекс АКМ-03 входят:
— измерительный модуль с системой микроклимата;
— входные преобразователи для оптического сигнала ОЭП (ЛУЗА) и сигнала с контактных датчиков МЭФИС;
— управляющий модуль.
Измерительный канал построен на базе плат LA-64F (Лаборатория автоматизированных систем и управления, г. Москва), работающих по принципу логи-

ческого анализатора. Управляющий модуль по линии «витая пара» может на расстоянии до 1 км управлять режимами работы измерительного модуля. Комплекс зарегистрирован в Государственном реестре средств измерений под № 29458-05 и допущен к применению в Российской Федерации.

Создан многоканальный измерительный комплекс АКМ03-КСК, предназначенный для мониторинга состояния корпусов взрывозащитных камер (ВЗК), подвергнутых взрывному нагружению при испытаниях газодинамических узлов. По результатам мониторинга выносится заключение об экологической безопасности испытаний изделий в ВЗК. В состав АКМ03-КСК входят управляющий модуль, измерительный модуль и многоканальное устройство согласования с датчиками физических величин. Обмен информацией между управляющим и измерительными модулями, удаленными на расстояние до 1000 метров, осуществляется по линиям Ethernet. Для комплекса разработано программное обеспечение для регистрации аналоговых сигналов, записи данных в файл и визуализации сигналов в графическом виде.

Основные характеристики АКМ-03

Частота дискретизации	100 МГц
Количество измерительных каналов	576
Требуемый уровень оптической мощности на входе ($\lambda = 0,6 - 0,9$ мкм)	≥ 30 мкВт
Объем оперативной памяти измерительного канала	64 кслов