

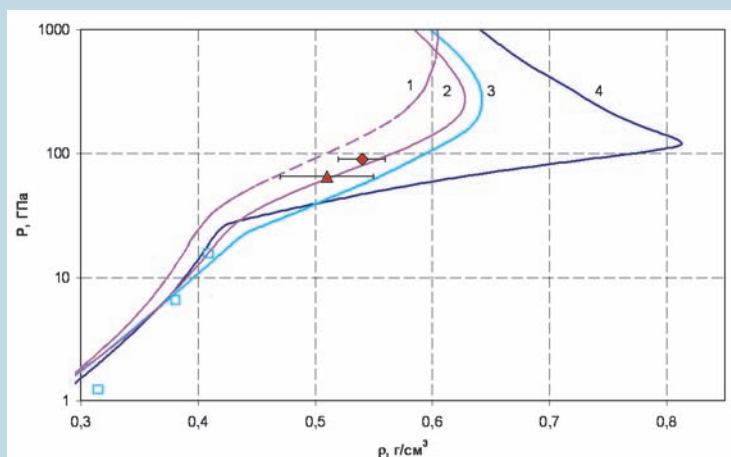
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЗРЫВА (ИФВ)

Впервые получены экспериментальные данные по ударно-волновой сжимаемости и температуре газообразного гелия высокой начальной плотности при давлениях 65 и 90 ГПа. Плотность гелия составила 0,51 и 0,54 г/см³, а температура — 27230 и 51000 К соответственно. В экспериментах использовался газ с начальным давлением $P_0 = 1120$ атм и плотностью $\rho_0 = 0,124$ г/см³, равной плотности жидкого гелия. Скорость ударной волны и температура ударно-сжатого газообразного гелия измерялись оптическим методом с использованием кварцполимерных световодов.

Излучение фронта ударной волны в гелии регистрировалось высокоскоростным 5-канальным пирометром и фотодиодными приемниками на осциллографах типа Agilent и Tetronics.

Экспериментально и теоретически исследованы термодинамические свойства диоксида урана в волнах ударного сжатия и квазиизэнтропического расширения. Исследования представляют интерес для прогнозирования особенностей возможных последствий аварий на объектах современной ядерной энергетики вследствие специфичности теплофизических свойств диоксида урана.

На основе модифицированной модели Ван-дер-Ваальса для простых и многокомпонентных смесевых веществ построено широкодиапазонное уравнение состояния жидкого и газообразного диоксида урана с учетом испарения и химического разложения на компоненты: O, O₂, U, UO, UO₂, UO₃. Относительно простое уравнение состояния согласуется с имеющимися высокотемпературными экспериментальными данными для относительно низких давлений жидкости и пара, а также с данными по ударному сжатию

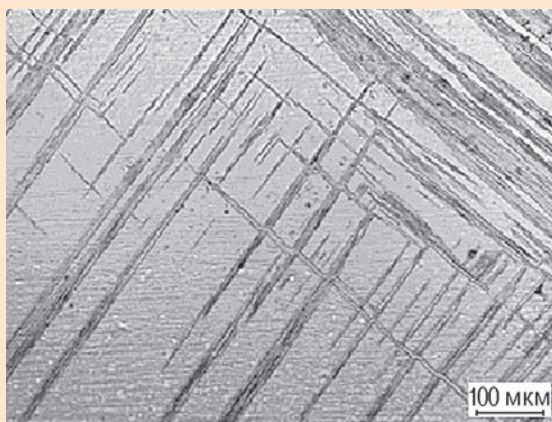


Ударная адиабата гелия:
эксперимент: □ — жидкий гелий (Ливермор);
▲, ◆ — газообразный гелий (ВНИИЭФ);
расчет: 1, 2 — варианты УРС ВНИИЭФ;
3, 4 — варианты УРС SESAME

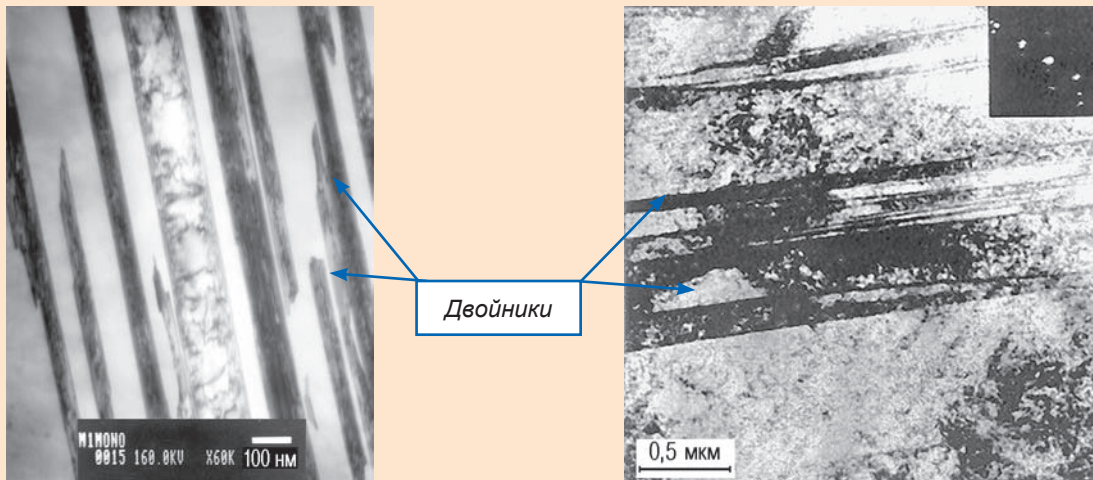
диоксида урана до давлений ~ 100 ГПа.

Развитие гетерогенной структуры деформации в зернах металлов при высокоскоростном деформировании ($\dot{\epsilon} > 10^7$ с⁻¹) в последние годы исследуется достаточно интенсивно. Установлено сильное влияние гетерогенных структур на динамическую прочность, исследованы условия зарождения гетерогенной структуры и ее зависимость от параметров нагружения.

В 2005 году ВНИИЭФ совместно с Институтом проблем сверхпрочности (ИПСП-РАН, г. Уфа) и Ливерморской лабораторией провел исследования внутренней структуры полос локализованного сдвига с использованием электронных просвечивающих микроскопов. Оказалось, что внутренняя структура полос представляет собой множество (до 100) двойников толщиной ~0,1–0,2 мкм, ориентированных в одной плоскости.



Гетерогенная структура деформации, видимая в оптический микроскоп



Полосы сдвига, полученные на просвечивающем электронном микроскопе

Область, прилегающая непосредственно к двойникам, содержит большое количество дислокаций, а также следы рекристаллизации, связанные, по-видимому, с тепловым разогревом при формировании двойниковых пакетов.

Полученные результаты послужат дальнейшему развитию моделей деформирования металлов в области высоких давлений ($\sigma_x > 20$ ГПа) и скоростей деформации $\dot{\varepsilon} > 10^6 \text{ с}^{-1}$.

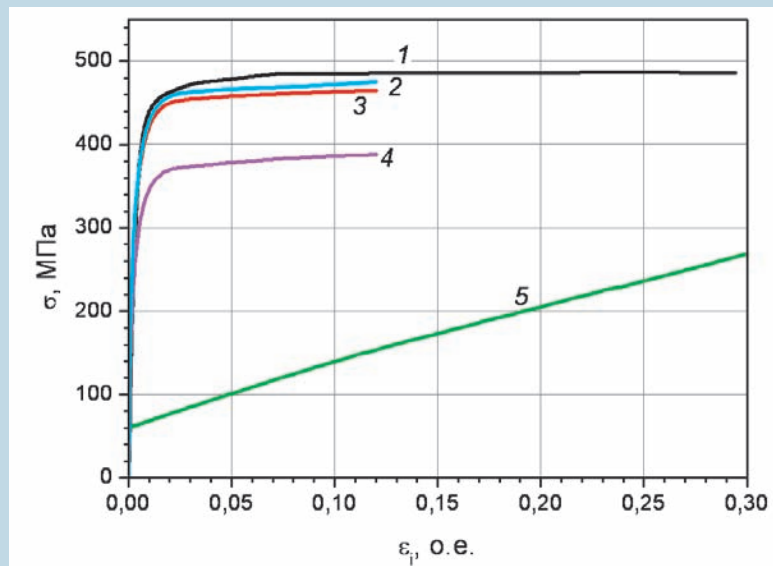
Нанодисперсные и микрокристаллические модификации материалов, обладая чрезвычайно высокой прочностью при достаточно высокой пластичности, представляют большой интерес и могут найти применение в различных областях промышленности.

Другим способом повышения прочности является ударно-волновое упрочнение. В течение 2005 года ИФВ совместно с НИО-07 и ИПСН-РАН исследовали статические и динамические свойства ультрадисперсной ($d \leq 0,5 \text{ мкм}$) меди и меди, подверженной предварительному ударному нагружению до давлений от 30 до 70 ГПа. Установлено, что ударно-волновое нагружение может повышать прочность обычной меди М1 ($d \approx 100 \text{ мкм}$) до уровня,

достижимого для ультрадисперсного состояния, $\sigma_{0,2} = 420 \text{ МПа}$.

Особенно эффективно воздействие нескольких ударных волн с амплитудой $\sigma_x \approx 30\text{--}40$ ГПа, а также ударных волн с предварительным охлаждением образца (до -190°C). При высо-

кой скорости деформирования $\dot{\varepsilon} \sim 10^5 \text{ с}^{-1}$ (тест Тейлора) прочность ударно-нагруженной меди $\bar{Y}_d \approx 0,58$ ГПа оказалась даже на 15 % выше, чем ультрадисперсной ($\bar{Y}_d \approx 0,51$ ГПа). Ударно-волновое упрочнение, по-видимому, связано



σ - ε диаграммы сжатия различных модификаций меди при $\dot{\varepsilon}_i = 10^{-3} \text{ с}^{-1}$: 1 — ультрадисперсная медь в исходном состоянии; 2 — крупнокристаллическая медь в исходном состоянии; 3 — медь, нагруженная двумя ударными волнами (40, 35 ГПа); 4 — медь после однократного ударно-волнового нагружения до давления 30 ГПа; 5 — медь после однократного ударно-волнового нагружения до давления 30 ГПа с охлаждением образцов до температуры жидкого азота

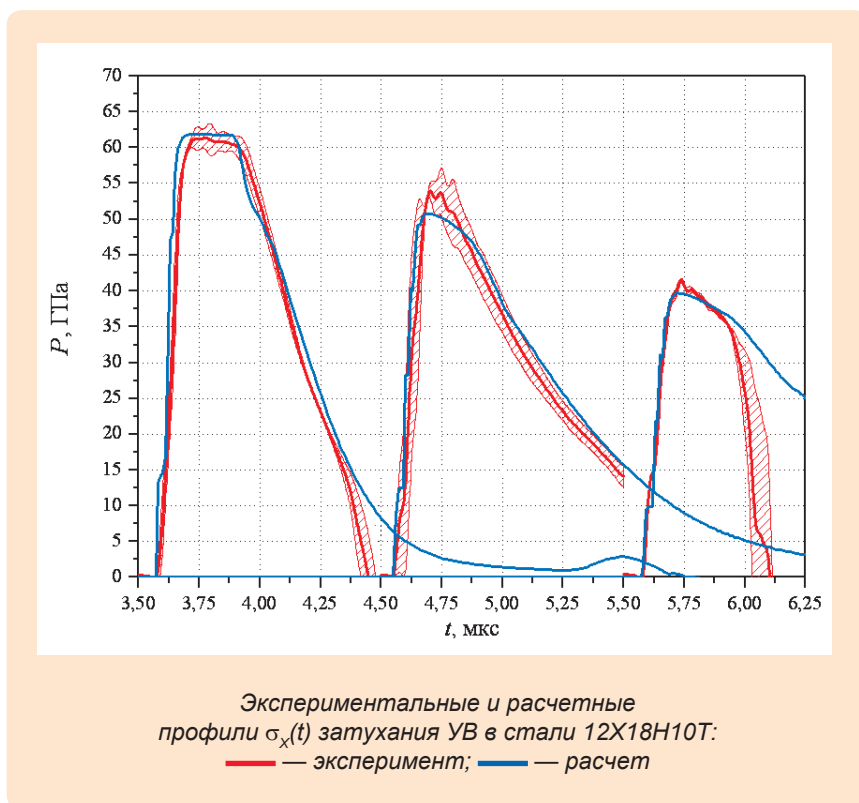
с образованием большого количества двойников, препятствующих движению дислокаций.

В 2005 году завершено усовершенствование методики измерения волн сжатия мanganin-овыми датчиками. Новая методика позволяет измерять давления до 68 ГПа, что в ~ 2 раза выше по сравнению с ранее используемой методикой. Погрешность измерения давления после калибровки не превышает 2 %.

С помощью новой методики измерено распространение ударной волны по образцу из стали 12Х18Н10Т, применяемой в полигонных исследованиях для изготовления капсул. Измерения проведены с целью отработки модели динамической прочности стали.

Применение в расчетах релаксационной модели упругопластического деформирования с функциональной зависимостью стационарного предела текучести от параметров напряженно-деформированного состояния позволило описать экспериментальные результаты, что свидетельствует о вязкоупругопластическом поведении реальных материалов в условиях интенсивных динамических нагрузок. Согласно результатам расчетно-теоретического анализа максимальная динамическая прочность стали марки 12Х18Н10Т при $\sigma_x \approx 62$ ГПа составляет $Y_d \approx 3,5$ ГПа.

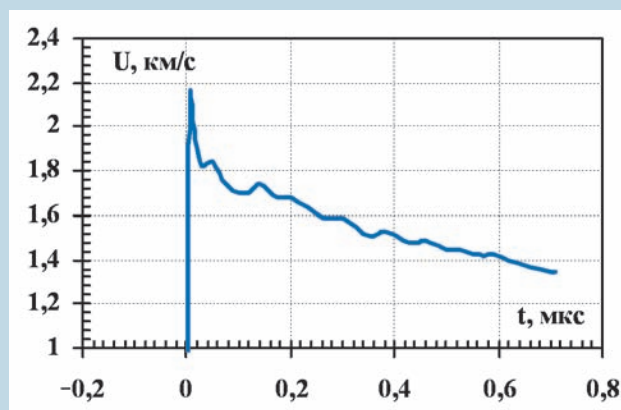
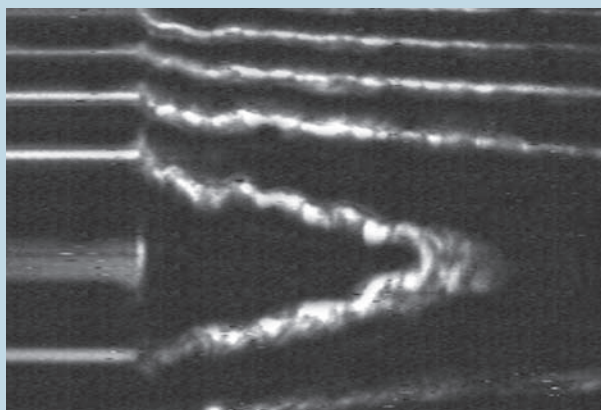
Лазерным интерферометрическим методом Фабри — Перо с



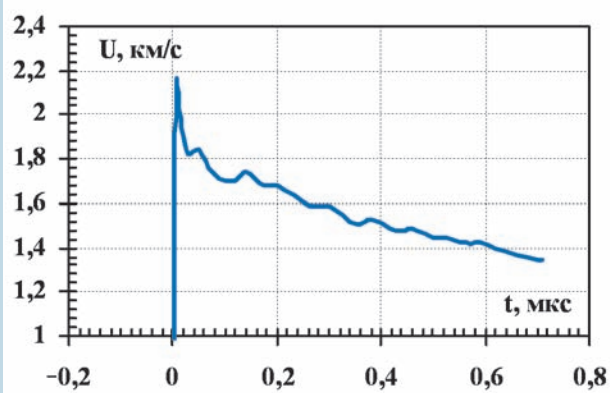
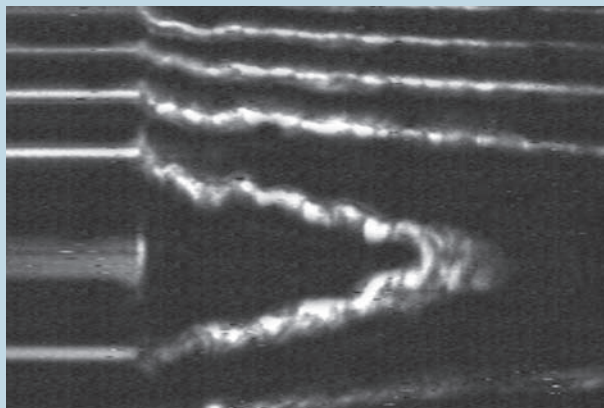
наносекундным временным разрешением проведены комплексные исследования детонационных характеристик пластизольных ВВ ОЛД-20 и ОЛП-25Т. В опытах регистрировалась массовая скорость границы раздела ВВ-монокристалл LiF и определялись давление детонации, профиль и структура волны. На профиле массовой скорости границы раздела зарегистрированы пульсации, вызванные турбулентностью течения за фронтом детонационной волны

вследствие гетерогенности ВВ (ВВ состоит из нескольких компонентов). Параметры детонации в состоянии Чепмена — Жуге для состава ОЛД-20 составили: давление $P = 33,2$ ГПа, массовая скорость $U = 2,15$ км/с; а для ОЛП-25Т — $P = 25,5$ ГПа, $U = 1,96$ км/с.

Благодаря малому размеру пятна зондируемой поверхности ($\sim 0,1$ мм) лазерным интерферометрическим методом Фабри — Перо регистрируется тонкая структура течения за фронтом



Характерная интерферограмма и график скорости границы раздела ОЛД-20-LiF



Характерная интерферограмма и график скорости границы раздела TNT-LiF

детонационной волны, например, в зависимости от типа и структуры исходного ВВ. Так, для тротила (ТНТ) зарегистрирован плавный «классический» вогнутый профиль массовой скорости границы раздела с монокристаллом LiF.

Измерены параметры детонации и химических пиков в штатных ВВ на основе октогена, гексогена, тротила, ТЭНа и жидких взрывчатых растворах на основе нитрометана, тетранитрометана и нитробензола.

В 2005 году разрабатывались взрывные системы и исследовались синхронные и асинхронные множественные воздействия твердых тел на твердые преграды при скорости соударений ~ 1 км/с. Анализировались экспериментальные и расчетные данные по определению характера разрушения дюралюминиевых преград при воздействии стальных шариков. По-видимому, впервые зафиксировано явление внутреннего откола вблизи сквозных пробоин.

Проведено исследование нового мощного литейного ВВ ТНАЗ. Показано, что ТНАЗ по мощности существенно превосходит тротил, обладает малой чувствительностью к механическим воздействиям и имеет малую критическую толщину детонирующего слоя. Полученные характеристики свидетельствуют о перспективности



Внутренний откол в дюралюминии при множественном ударе стальных шариков диаметром 5 мм со скоростью 1400 м/с (длина трещины 300 мкм)

применения ТНАЗ в качестве компонента мощных литейных составов для неядерных боеприпасов.

Исследован состав ГАВ (CL-20). Установлено, что ГАВ по мощности существенно (до 15 %) превосходит октоген. По своим основным характеристикам (термическая стойкость, чувствительность) ГАВ близок к октогену и ТЭНу. Показана возможность разработки на основе ГАВ новых мощных взрывчатых составов.

Разработаны и сданы в эксплуатацию измерительно-вы-

числительные комплексы (ИВК) «Газодинамика», «Технолог», «Структура», «Теплофизика», «Чувствительность», «Физхимия». ИВК позволяют автоматизировать процессы регистрации параметров при исследовании свойств ВВ, повысить достоверность и качество получаемой информации, уменьшить трудоемкость ее обработки.

При исследовании высокоскоростного метания к числу важнейших характеристик исследуемых процессов относятся зависимости скорости и ускорения разго-

няемого тела от времени. В том случае, когда разгон ударника происходит в сплошной стальной трубе, непрерывное невозмущающее измерение параметров движения является очень сложной задачей. Тем не менее эти характеристики могут быть измерены с помощью радиointерферометров. Вполне достаточная точность измерений может быть получена в миллиметровом диапазоне длин волн.

Эксперименты проводились с использованием высокоскоростного ударного стенда «Ствол-65». Процесс метания ударника регистрировался при помощи радиointерферометра с квазиоптической антенно-фидерной системой (АФС), зондирующее излучение поступало на ударник, размещенный в канале ствола установки «Ствол-65», при помощи дополнительного зеркала. Полное расстояние от АФС до поверхности ударника составляло 1,1 м. Метание ударника осуществлялось за счет энергии взрыва заряда ВВ.

В 2005 году закончена разработка программируемого генератора временных интервалов (ГВИП). По своим техническим характеристикам генератор находится на уровне лучших зарубежных аналогов и превосходит все известные разработки в РФЯЦ-ВНИИЭФ.

В настоящее время ГВИП интегрирован в состав АСУК перспективного рентгенографического комплекса РГК-М на основе ускорителя «СТРАУС-Р». Управление генератором осуществляется по интерфейсу RS-232. Это позволяет внедрить генератор в любую вновь разрабатываемую АСУК. Возможно управление генератором от персонального компьютера на расстоянии до 2000 м с помощью дополнительных покупных модулей. Программное обеспечение ГВИП позволяет контролировать работоспособность генератора. Квалифицированный оператор может установить необходимые

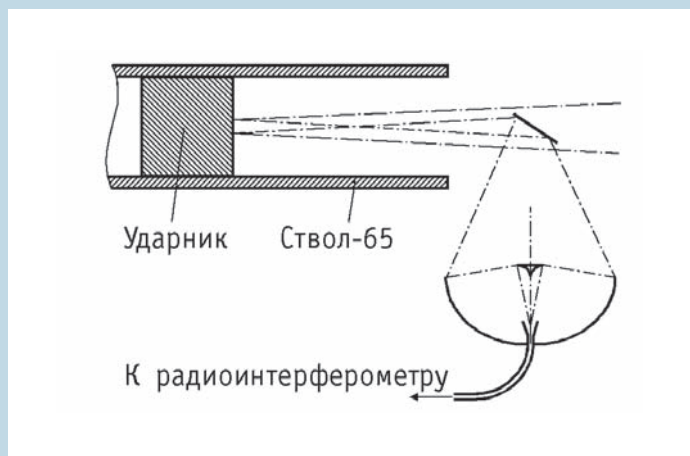
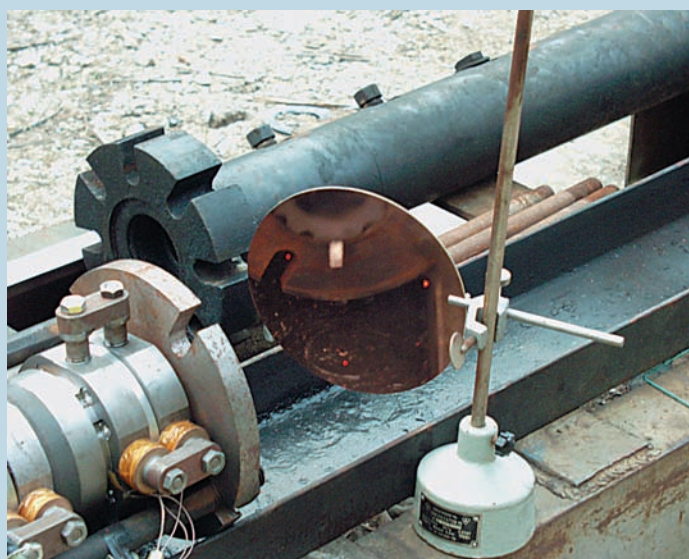
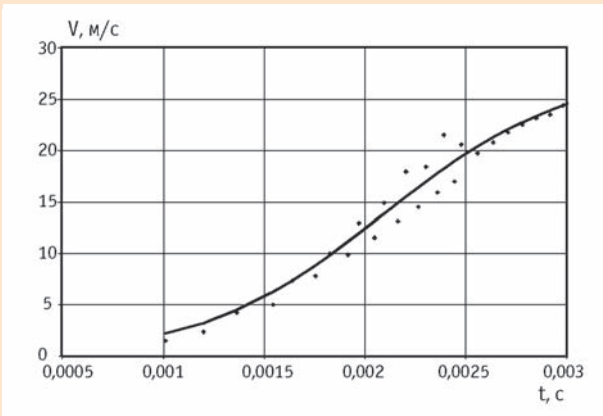


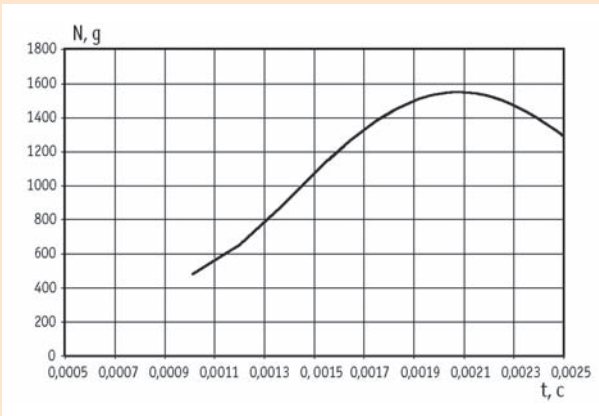
Схема проведения опытов по измерению скорости ударника



Экспериментальная установка



Зависимость скорости движения ударника от времени



Аппроксимированная зависимость перегрузки ударника

длительности задержки каждого из восьми выходных каналов, выбрать любой из четырех каналов запуска, проконтролировать прохождение запускающих сигналов чтением регистра состояния.

В конструкцию прибора заложен модульный принцип построения, использована современная зарубежная элементная база (ПЛИС, микропроцессоры).

ГВИП предназначен для создания многоканальных систем синхронизации в сложных электрофизических установках. В ИФВ налажено мелкосерийное производство этих приборов.

Лабораторный баллистический комплекс БУТ-76 ИФВ является инструментом, используемым для динамического

нагружения образцов пластинами-ударниками, имеющими скорость до 700 м/с. При этом в образцах реализуются давления до 10 ГПа с длительностью импульса от 0,5 до 10 мкс. В 2005 году на базе установки БУТ-76 создан новый лабораторный оптический комплекс, позволяющий за счет высокого временно-го разрешения ~ 5 нс проводить

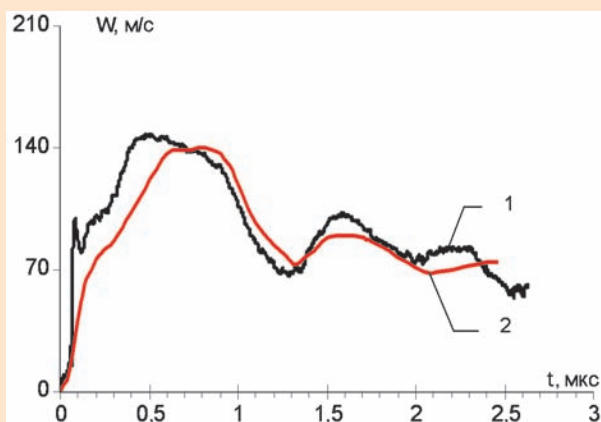
Технические характеристики ГВИП

Количество независимых модулей задержки и внешних сигналов запуска	4
Количество выходных импульсов в каждом модуле	2
Возможность программируемого запуска каждого модуля от любого из четырех входных сигналов запуска	
Диапазон программирования временного интервала	от 0 до 39,999995 мс
— погрешность временного интервала определяется следующим выражением:	$\pm(2 \times 10^9 + 2 \times 10^{-6} \times T_{\text{зад}}) \text{ с}$
— шаг изменения временного интервала	5 нс
Хранение данных	энергонезависимое
Связь по входным и выходным сигналам	волоконно-оптическая
— входная оптическая мощность	не менее -20 дБм (0,01 мВт)
— выходная оптическая мощность	не менее -15 дБм (0,03 мВт)
— тип кабеля	оптоволоконный с диаметром волокна 62,5 или 125 мкм, разъем типа ST
Напряжение питания	24 В
Потребляемая мощность	не более 3,5 Вт
Конструктивное исполнение	функциональный модуль, размещаемый в приборной стойке типа «С19»
Типоразмер	141,9 × 128,4 × 167
Диапазон рабочих температур	0–50 °С
Управление от PC	по интерфейсу RS-232

исследования ударно-волнового деформирования материалов на качественно новом уровне по сравнению, например, с ранее используемым методом емкостного датчика. Модификация созданного на установке БУТ-76 интерферометра позволит создать в ИФВ малогабаритный транспортный лазерный комплекс с перспективой его использования на внутренних и внешних полигонах.

Для исследования физики глубоководного взрыва и моделирования воздействия взрыва на элементы конструкций подводного вооружения ВМФ разработана камера высокого давления (КВД) диаметром 1600 мм, рассчитанная на рабочее давление 15 МПа. КВД оснащена технологическими коммуникациями для подачи воды и сжатого воздуха, датчиками статического давления, гермовводами для измерительных линий. КВД имеет систему регистрации реакции корпуса на взрывное воздействие и систему регистрации параметров воздействия подводной ударной волны на объект испытания. Проведены первые исследования по эффективности действия перспективных взрывчатых составов в глубоководных условиях.

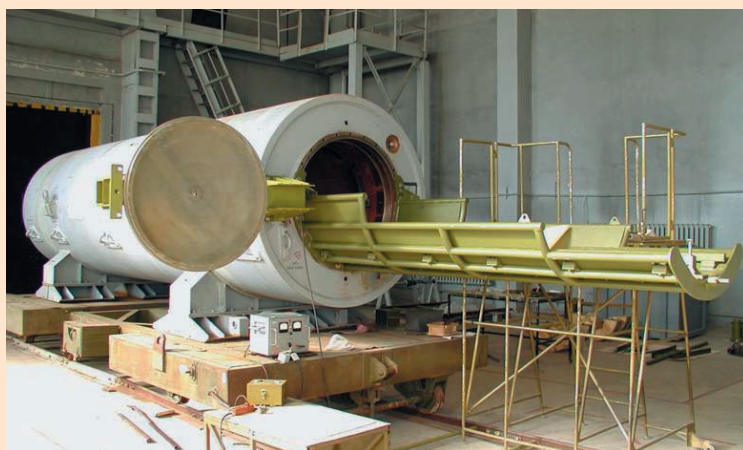
Передан на оснащение Аварийно-технического центра (АТЦ) ВНИИЭФ взрывостойкий контейнер АТ 601. Основное назначение контейнера — обеспечение экологической безопасности при устранении последствий аварии со спецприборами за счет полной локализации внутри полости контейнера продуктов вероятного взрыва мощностью не более 60 кг ТНТ. Контейнер может применяться для транспортировки, временного хранения, дистанционной разборки или ликвидации аварийных спецприборов.



Профили скорости свободной поверхности стальных образцов толщиной 4 мм:
1 — регистрация с помощью интерферометра;
2 — регистрация с помощью емкостного датчика



Камера высокого давления



Контейнер с пристыкованным загрузочным устройством