

## ИНСТИТУТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ГАЗОДИНАМИКИ И ФИЗИКИ ВЗРЫВА (ИФВ)

В настоящее время экспериментальные исследования развития гидродинамических неустойчивостей проводят на маломасштабных установках. В этих опытах из-за малой ( $\approx 70$  мм max) ширины зоны турбулентного перемешивания трудно определить влияние параметров течения (вязкости, поверхностного натяжения, ускорения) на развитие перемешивания, что необходимо для калибровки численных методов. В ИФВ создана экспериментальная установка КУ-210 с внутренним

диаметром 210 мм, позволяющая исследовать развитие перемешивания и возмущений на границе газ–жидкость при ширине зоны до 200 мм, числах Рейнольдса до  $5 \cdot 10^6$  и ускорении  $g \geq 10^3 g_0$ .

В ИФВ создан измерительно-вычислительный комплекс для исследования пространственно-временной структуры турбулентных течений с применением лазерной диагностики и цифровой видеорегистрации, позволяющий:

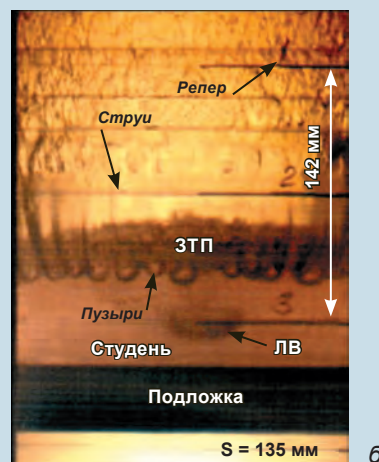
- регистрировать с высоким временным (нс) и простран-

ственным разрешением развитие гидродинамических неустойчивостей, турбулентного перемешивания и распространение ударно-волновых процессов в жидкостях и газах шлирен-методом, распределение плотности в зоне турбулентного перемешивания газов методом «лазерного ножа»;

- визуализировать микронные частицы в газодинамическом потоке, образовавшиеся, например, при развитии турбулентного перемешивания, диспергировании жидкости и при



Ускорительный канал КУ-210



Кинограммы опытов: а – развитие перемешивания на границе газ–жидкость; б – развитие локального возмущения (лунка  $R \approx 6$  мм) на границе газ–низкопрочный студень водного раствора желатина (ЗТП – зона турбулентного перемешивания; S – смещение слоя; ЛВ – локальное возмущение)

пылении металлов под действи-  
ем ударной волны;

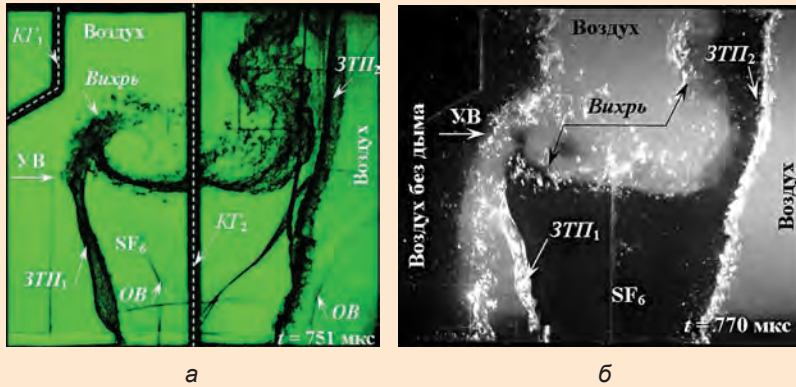
- регистрировать скорость и давление в газодинамическом течении.

Предложены и эксперимен-  
тально отработаны смесевые  
взрывчатые вещества (ВВ) для  
сварки взрывом. Основой со-  
ставов является смесь порошков

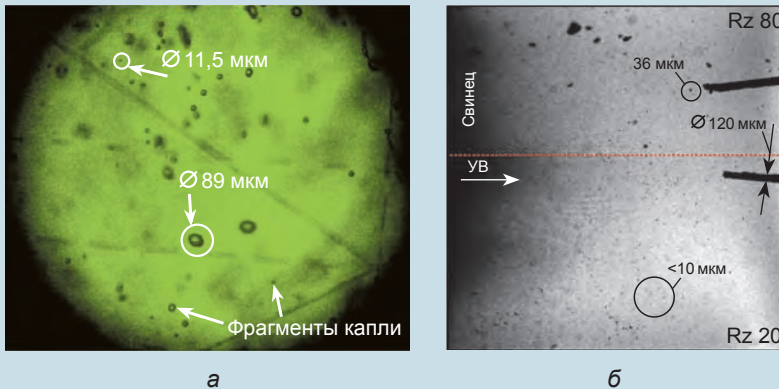
высокобризантного ВВ (гексоген,  
ТЭН) и инертного разбавителя  
(бикарбонат натрия – пищевая  
сода): гексоген – сода, крити-  
ческий диаметр детонации  
 $d_{кр} = 8\text{ мм}$ ; ТЭН – сода,  $d_{кр} = 6\text{ мм}$ .  
При использовании в смеси  
высокодисперсного ТЭНа (ВДТ)  
критический диаметр детона-  
ции понижается до 1,5 мм. Такие  
свойства позволяют существенно  
снизить деформации в области  
нагружения и проводить сварку  
взрывом полых конструкций или  
тонких листов (фольг).

На основании общефизиче-  
ских представлений и извест-  
ного аналитического решения  
Рихтмайера получены приближе-  
ния уравнения для оценки спек-  
тральных характеристик частиц,  
выбрасываемых с поверхности  
жидкости под действием ударной  
волны. Основные характеристи-  
ки спектра – распределение чис-  
ла и массы частиц по размерам  
определяются интенсивностью  
ударной волны, спектром началь-  
ных возмущений на поверхности,  
вязкостью и поверхностным  
натяжением. В случае жидких  
металлов поверхностное на-  
тяжение играет определяющую  
роль в формировании спектра.  
Найденные зависимости близки  
к экспериментальным резуль-  
татам, полученным Werdiger M.  
и др. в 1996 году для меди.

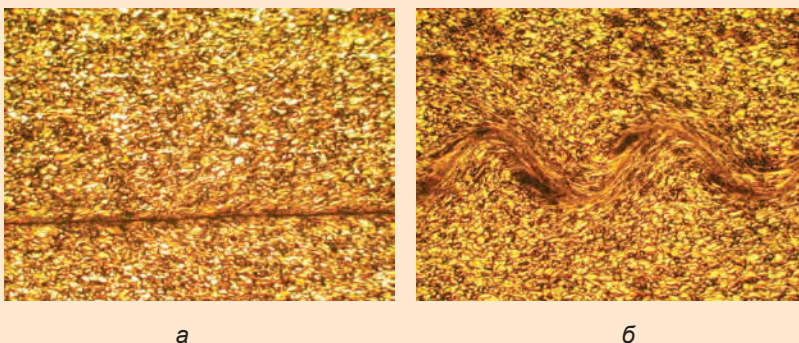
Исследование взаимосвязи  
деформации и структурных  
изменений – сложная задача  
реологии металлов. В течение  
2007–2008 годов проведены экс-  
периментальные исследования  
воздействия ударных волн раз-  
личной длительности и интен-  
сивности на структурные измене-  
ния и прочностные характери-  
стики меди с различным начальным  
размером зерна. Установлено,  
что ударно-волновое деформи-  
рование в диапазоне давления  
25–80 ГПа и времени действия  
ударной волны 1–1,5 мкс приво-  
дит к значительному увеличению  
плотности дислокаций с  $\sim 10^8\text{ см}^{-2}$   
до  $\sim 2 \cdot 10^{11}\text{ см}^{-2}$ , при этом воз-  
растает и сдвиговая прочность.



*Развитие турбулентного перемешивания  
в слоежке воздух – SF<sub>6</sub> – воздух при двумерном течении:  
а – шликрен-метод; б – метод «лазерного ножа» ( УВ – ударная волна;  
ОВ – отраженная волна; КГ<sub>1</sub>, КГ<sub>2</sub> – контактные границы газов)*

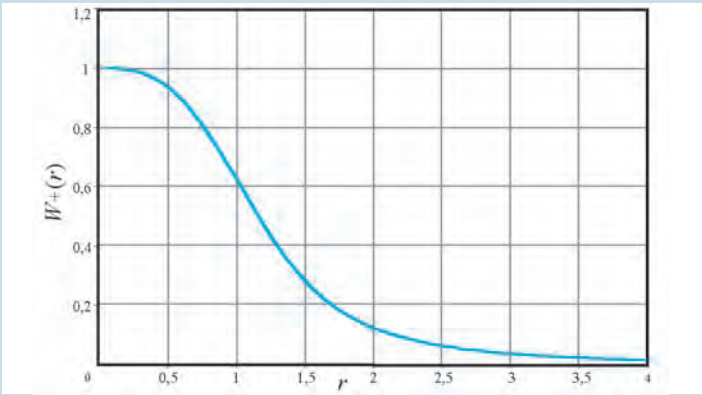


*Микрочастицы в газодинамическом потоке:  
а – фрагменты диспергированной капли  
жидкости; б – частицы пыли свинца*



*Микрошлифы сварных швов для образцов из стали Ст. 3.  
Скорость деформации 2 км/с (а) и 2,3 км/с (б)*

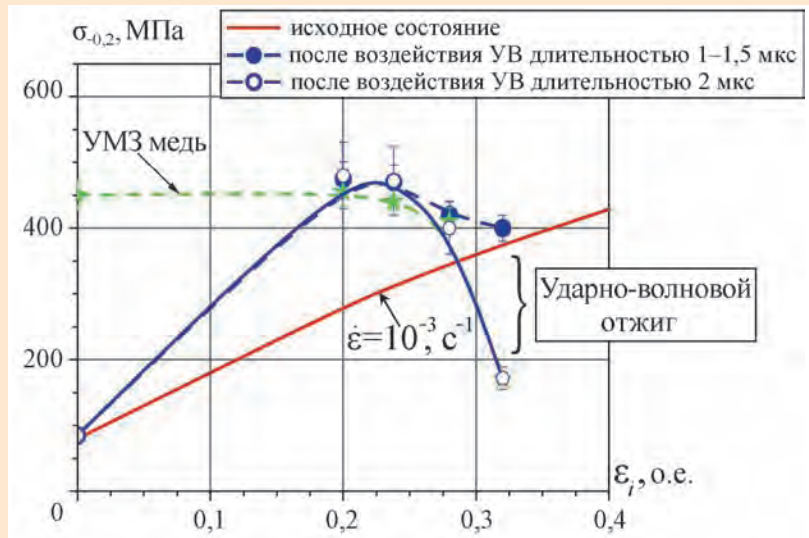




Вероятность обнаружить выбрасываемую с поверхности жидкости частицу с относительным радиусом больше  $R/\bar{R}$ , где  $\bar{R}$  – наиболее вероятный радиус частиц

Проведены исследования плавления церия, олова и природного урана. Для этого при ударно-волновом нагружении с помощью методик индикаторных жидкостей и манганинового датчика определены зависимости упругой продольной и объемной скоростей звука от давления. Установлено, что граница области плавления составляет для церия 12 ГПа, для олова ~65 ГПа, для урана 130 ГПа. Исследования церия в окрестности изоморфного  $\gamma$ - $\alpha$  фазового перехода, характеризующегося скачком объема 16,5%,

При давлениях в ударной волне > 60 ГПа и времени ее действия ~2 мкс начинается существенное снижение плотности дислокаций и сдвиговой прочности. Это связано с тепловой аннигиляцией дислокаций за фронтом ударной волны. Таким образом удалось оценить время ударно-волнового отжига. Так, при давлении > 60 ГПа и температуре за фронтом ~600–700 °С за время 2 мкс плотность дислокаций и прочность снижаются до исходного состояния  $\sim 10^8 \text{ см}^{-2}$ . Аналогичный результат получен и для мелкозернистой меди с размером зерна 0,5 мкм. Полученные данные будут использоваться при построении широкодиапазонной модели меди и других металлов.



Статическая  $\sigma$ - $\epsilon$  диаграмма сжатия крупнокристаллической меди в исходном состоянии и условный предел текучести после ударно-волнового нагружения давлением 25–75 ГПа различной длительности

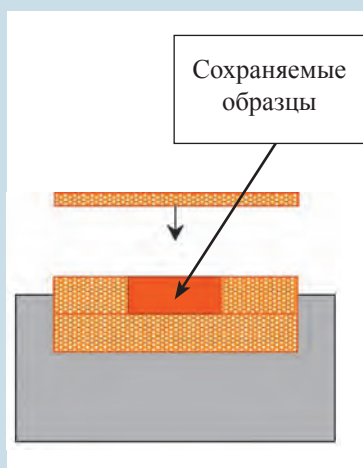
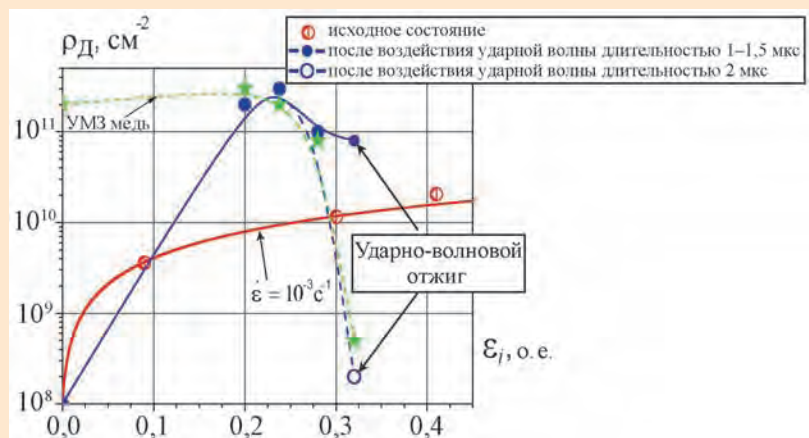


Схема экспериментов

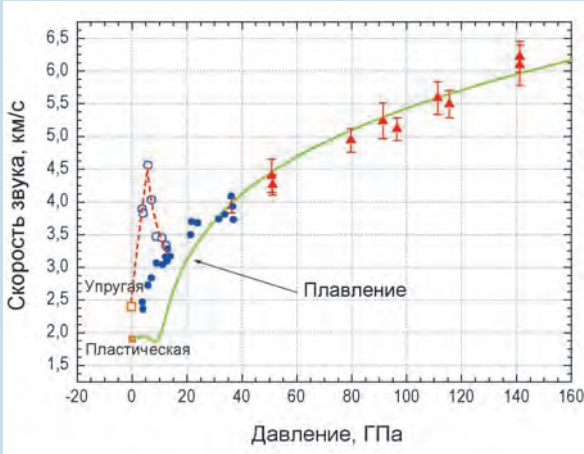


Зависимость плотности дислокаций от деформации при различных режимах нагружения

проведены с помощью методики пьезополимерного датчика давления (ПВДФ-датчик). Показано, что при амплитудах нагружающих давлений менее 4 ГПа фазовое превращение носит незавершенный характер. В результате этого материал представляет собой смесь  $\gamma$  и  $\alpha$  фаз и имеет аномальные свойства. В частности, скорость звука в фазе нагружения обратно про-

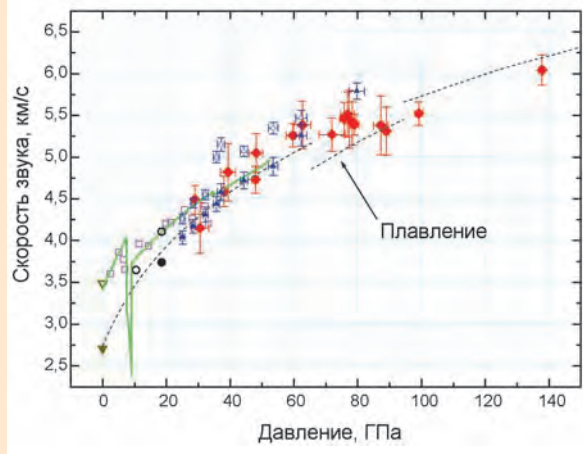
порциональна давлению, что приводит к образованию волны сжатия. В фазе разгрузки ситуация обратная, и формируется ударная волна разрежения, что указывает на быструю релаксацию нестабильного состояния материала. С использованием подхода, основанного на представлении детонационного процесса как непрерывного цикла химико-термодинамических

превращений ВВ и связывающего функционально значения детонационных параметров в пике Неймана с параметрами в плоскости Чепмена–Жуге, построены «холодные» (неискаженные химической реакцией разложения)  $D-U$ -соотношения тротила, гексогена, ТЭНа, тетрила, октогена и нитрометана до давлений, отвечающих пику Неймана детонационной волны.



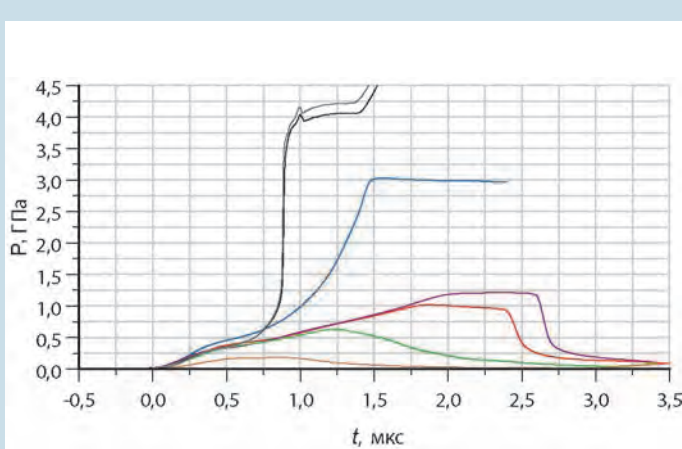
Зависимость скорости звука в цери от давления ударного сжатия:

- расчет по УРС ВНИИЭФ;
- ▲ – объемная скорость звука (оптический метод);
- , ○ – объемная и упругая (продольная) скорости звука (манганин);
- – упругая (продольная) скорость звука (ультразвуковой метод, ВНИИЭФ);
- – объемная скорость звука из «Справочника по редким металлам», 1965 г.

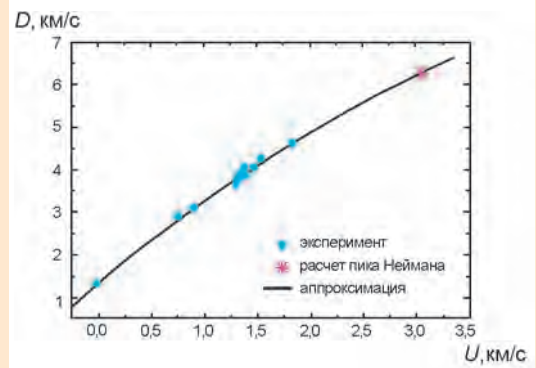


Зависимость скорости звука в олове от давления ударного сжатия:

- ▽ – ультразвуковой метод, ВНИИЭФ;
- – лазерный интерферометр [Martinez E. и др.];
- , ● – манганин;
- △, ▲ – VISAR [Jianbo Hu и др.];
- ◆ – оптический метод;
- ▼ – «Справочник по редким металлам», 1965 г.;
- расчет по УРС [Сох G. A.];
- – расчет по УРС [ИТЭС]



Зависимость давления от времени в цери для разных условий нагружения

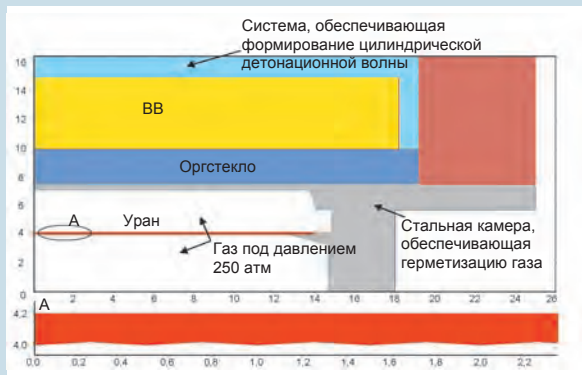


$D-U$ -соотношение и точка, отвечающая состоянию пика Неймана для нитрометана ( $D$  – скорость ударной волны;  $U$  – массовая скорость)

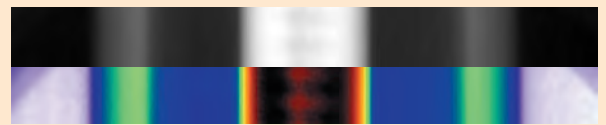
Завершен цикл экспериментов по исследованию упругопластических свойств природного урана в области давлений 250–300 ГПа методом возмущений на цилиндрическом нагружающем устройстве. Рост возмущений, предварительно нанесенных на внутреннюю поверхность урановой оболочки, регистрировали методом двухкадровой импульсной рентгенографии. При детонации ВВ оболочки осесимметрично сходятся к центру. По мере схождения во внутренней

полости газа растет давление. С некоторого момента урановая оболочка испытывает торможение. В этот период возмущения на внутренней поверхности начинают интенсивно развиваться. Скорость роста возмущений зависит от прочностных свойств материала, в данном случае урана. В эксперименте рентгенографическим методом регистрировали положение границ оболочек и возмущений на определенных моменты времени. Последующим математическим

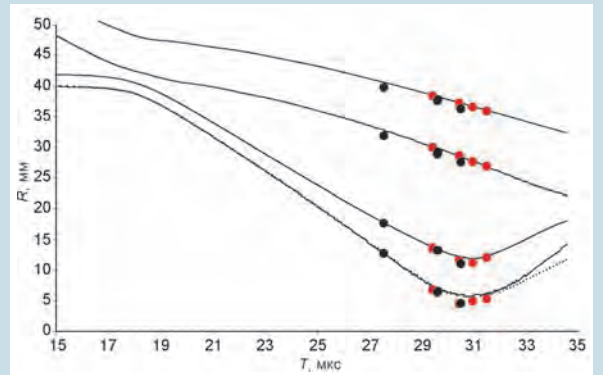
моделированием модели прочности верифицировали. Анализ экспериментов показал, что упругопластическое поведение урана в данном диапазоне давлений сложное и не описывается существующими моделями прочности. В частности, сдвиговая прочность урана при таком режиме деформирования значительно ниже, чем в расчетах. Возможно, это объясняется эффектом временного ударно-волнового разупрочнения, ранее наблюдавшегося в меди и алюминии.



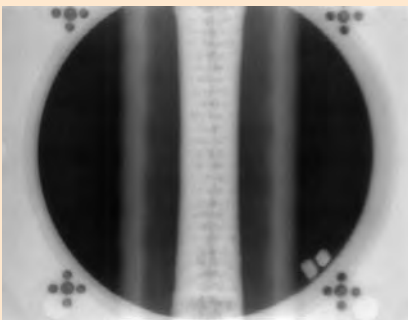
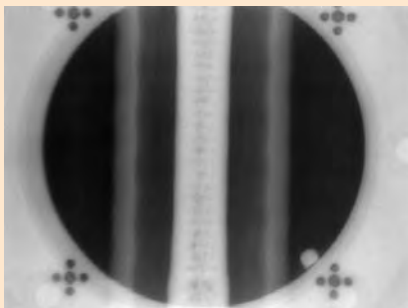
Принципиальная схема экспериментального устройства для исследования прочности



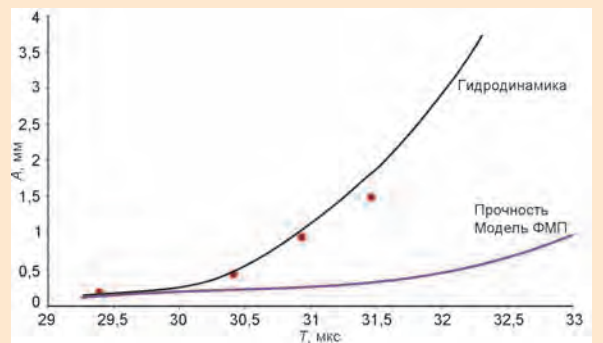
Результат математической обработки участка рентгенограммы для трассировки границ и определения амплитуды возмущений



Временная диаграмма движения стальной и урановой оболочек. Экспериментальные точки и расчетные зависимости

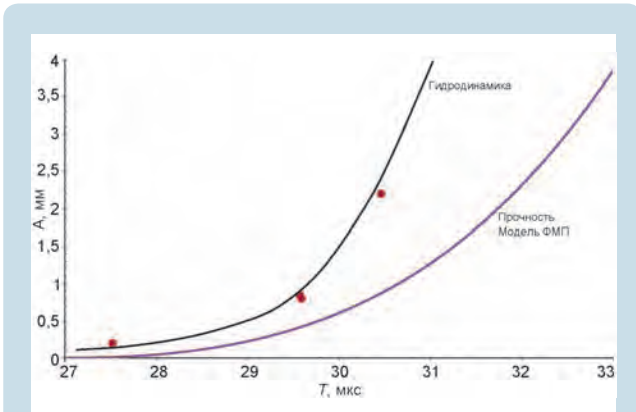


Рентгенограммы сходящейся к центру оболочки, полученные на комплексе 2БИМ234.500 на разные моменты времени

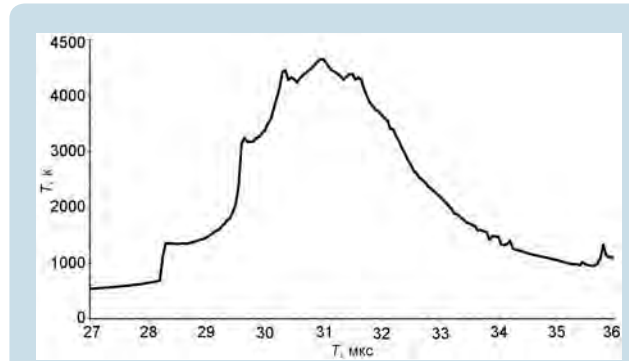


Развитие возмущений в случае начальной амплитуды  $A_0 = 0,1$  мм. Экспериментальные точки и расчетные зависимости

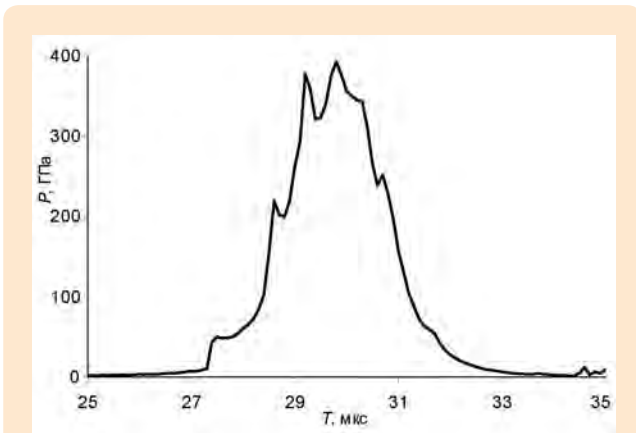




Развитие возмущений в случае начальной амплитуды  $A_0 = 0,25$  мм. Экспериментальные точки и расчетные зависимости



Зависимость температуры урана от времени в зоне возмущений

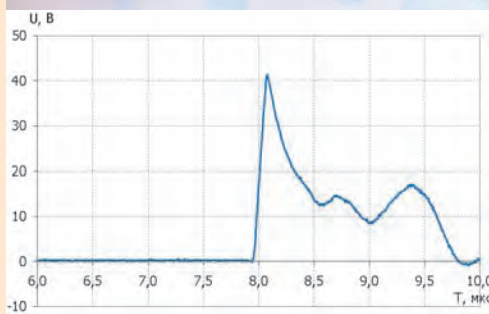


Зависимость давления от времени в уране в зоне возмущений

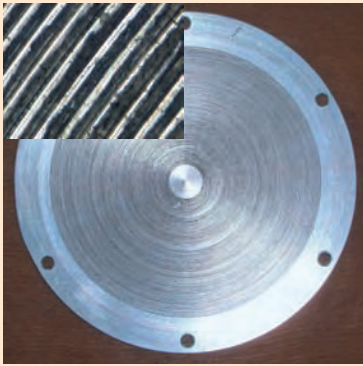


Разработан ряд конструкций пьезокерамических датчиков ударных и детонационных волн, работающих в области давлений от 0,1 до 100 ГПа. Применение новых подходов позволило существенно улучшить их метрологические характеристики, уменьшить размеры и приспособить для использования в сложных условиях взрывных экспериментов.

Методом пьезоэлектрического датчика измеряют параметры малоплотных высокоскоростных потоков пыли, выбрасываемых с поверхности ударно-нагруженных пластин. Разработанный метод может использоваться в исследованиях свойств материалов на внутренних и внешних полигонах ВНИИЭФ.

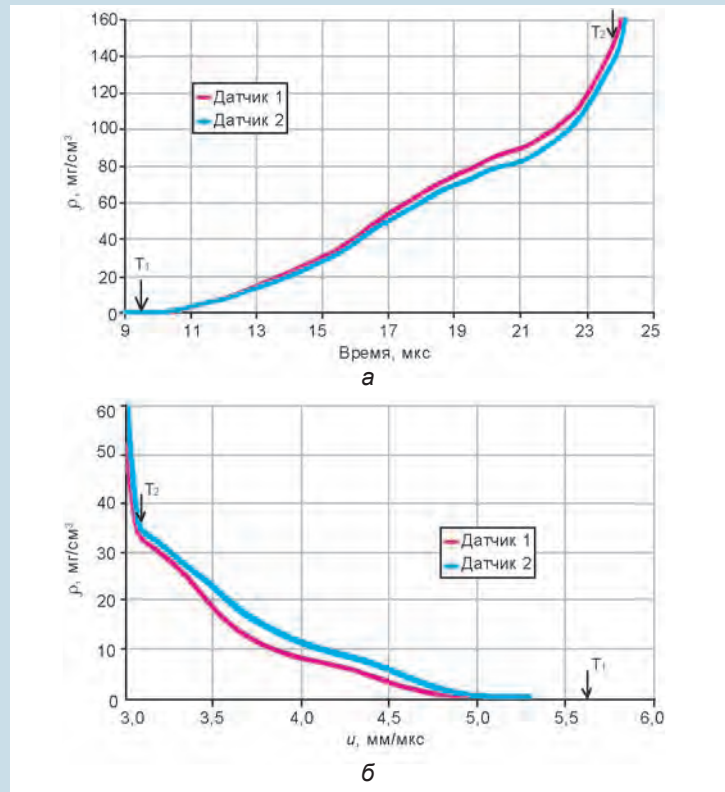


Пьезокерамические датчики ударных волн



Алюминиевая пластина – источник пыли

Разработана установка для резки изношенных автомобильных шин, в том числе и крупногабаритных, на части, пригодные для дальнейшей переработки. Установка перевозится на места скопления изношенных шин в разобранном состоянии и монтируется на месте. Для работы установки не требуется электроэнергия. Принцип действия основан на разгоне режущего модуля продуктами взрыва, локализованного во взрывной камере. Рабочее движение режущего модуля происходит снизу вверх, что обеспечивает его возврат в исходное положение под действием силы тяжести после срабатывания. В установке используется дешевое промышленное ВВ типа аммонита, применяемое в горнорудной промышленности. В зависимости от конфигурации режущего модуля возможны различные варианты фрагментов шины. В апреле 2008 года на Международном салоне изобретений, новой техники и товаров, в Женеве (Швейцария) разработке присуждена золотая медаль.



Распределение плотности пыли в зависимости от времени (а) и скорости (б) частиц при давлении ударного нагружения  $P_{Ai} = 35 \text{ ГПа}$



Диплом



Установка для резки изношенных автомобильных шин



Фрагменты шин