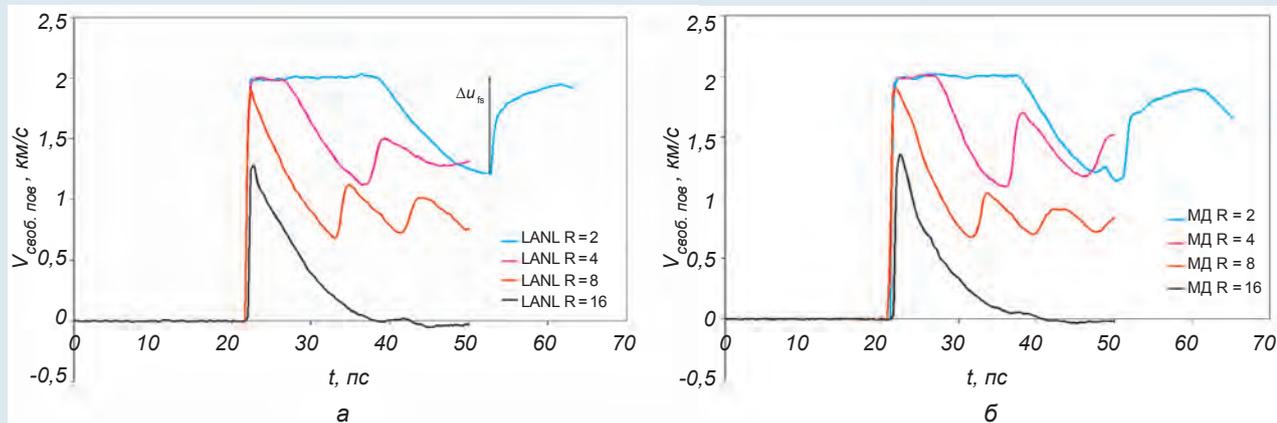


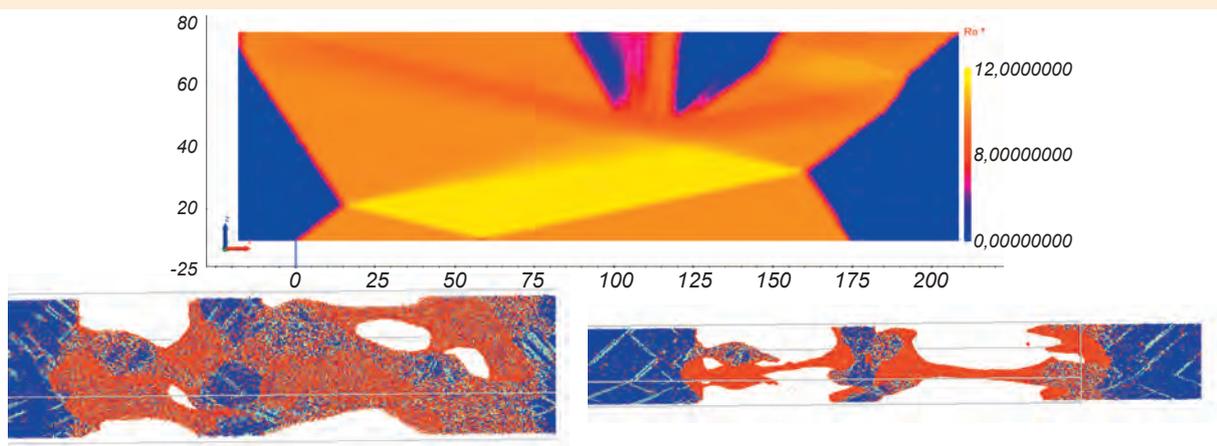
В рамках развития методов и программ молекулярно-динамического моделирования проведены расчеты откольных явлений в монокристалле меди

при различных ударно-волновых нагрузках. Результаты расчетов сравнивались с аналогичными результатами, полученными в Лос-Аламосской лаборато-

рии (США). За исключением отдельных моментов получено хорошее согласие.



Сравнительные графики поведения во времени скорости свободной поверхности:  
а – результаты ЛАНЛ; б – результаты МД



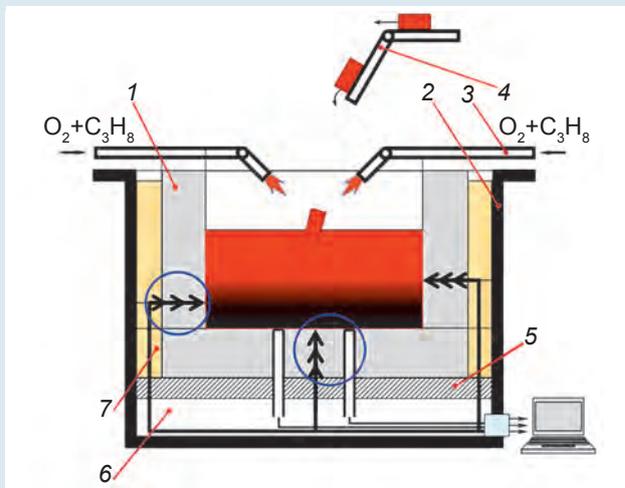
Процесс развития откола и визуализация частиц

## ИНСТИТУТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ГАЗОДИНАМИКИ И ФИЗИКИ ВЗРЫВА (ИФВ)

В ИФВ в целях исследования и обеспечения безопасности ядерных реакторов разработана установка для получения и удержания кориума – расплава активной зоны ядерного реактора. Прототипный расплав образуется в результате реакции  $2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{Zr} = 3\text{ZrO}_2 + 4\text{Fe} + 2840 \text{ кДж/кг}$  в бетонной емкости объемом

$\sim 6 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$ . В ходе эксперимента после инициирования реакции в химически активном составе (ХАС) массой 50 кг в полученный расплав с интервалом 5–10 с сбрасывали брикеты из того же ХАС массой 0,72 кг и плотностью  $3,05 \text{ г/см}^3$  каждый. С использованием термопарной и пирометрической методик по-

казано, что созданный расплав массой  $\sim 100 \text{ кг}$ , имеющий температуру  $2700\text{--}3200 \text{ К}$ , обеспечивает тепловые потоки в стенки и ко дну бетонной емкости в пределах  $100\text{--}150 \text{ кВт/м}^2$  на протяжении  $\sim 10$  мин. Абляция стенок бетонной емкости составила в конце эксперимента  $2,5\text{--}3 \text{ см}$ .

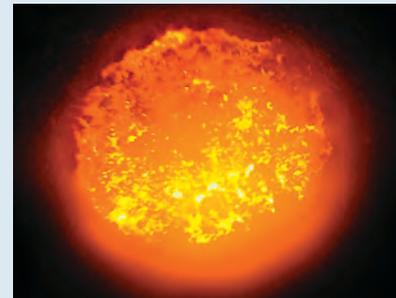


Установка по получению прототипного кориума:

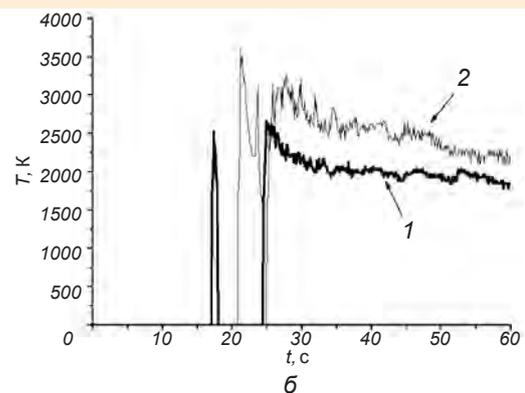
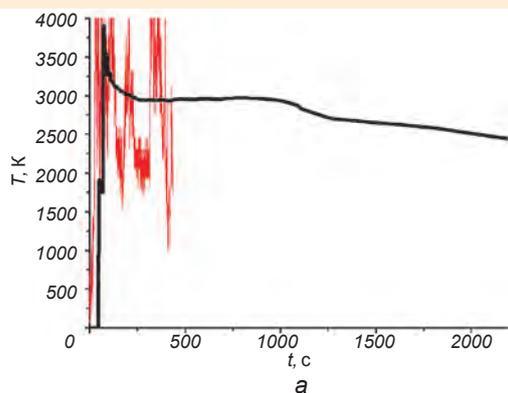
- 1 – бетонная емкость;
- 2 – металлический контейнер;
- 3 – газовые горелки (теплоизоляция кориума);
- 4 – желоб для сбрасывания брикетов;
- 5 – диск из алюминия (для установки термопар);
- 6 – воздушная полость (вывод измерений);
- 7 – силикатный песок (дополнительная изоляция)



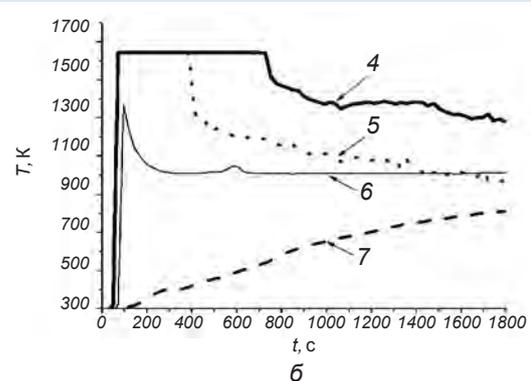
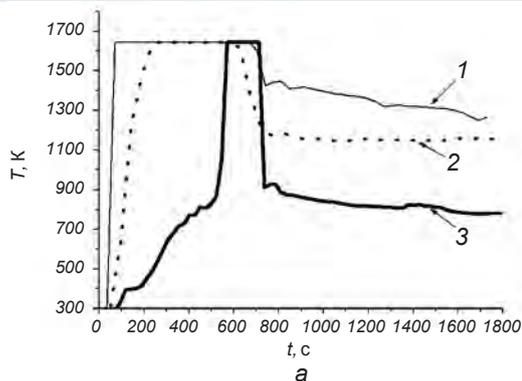
Модельная экспериментальная установка



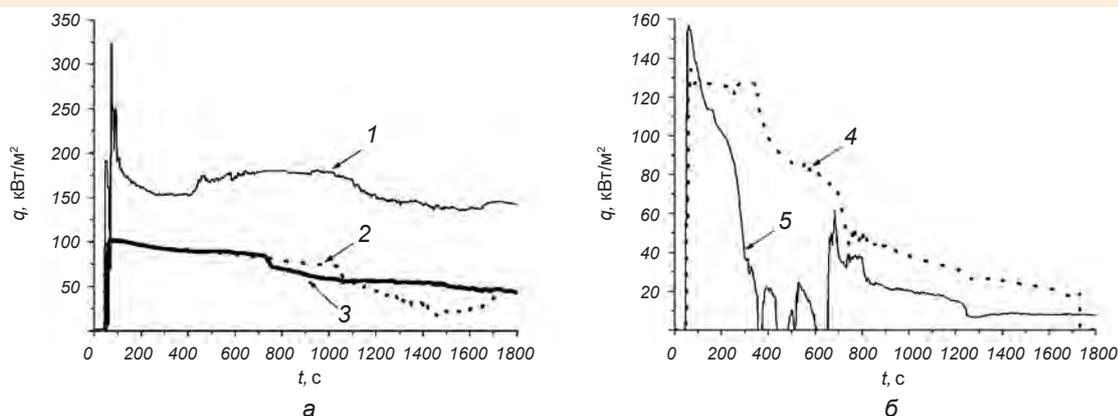
Прототипный кориум в расплавленном состоянии



Температура расплава, измеренная с помощью вольфрам-рениевых термопар (а) и пирометрических датчиков (б): 1 – с молибденовым экраном; 2 – с танталовым экраном



Температура в бетонной емкости: а – в стенке на высоте 40 мм от дна; б – в дне. Расстояние от границы расплава, мм: 1–5; 2–15; 3–25; 4–10; 5–15; 6–20; 7–30



Расчет тепловых потоков: а – в дно; б – на стенки бетонной емкости при высоте 40 мм.  
Расстояние от границы расплава, мм: 1–15; 2,3–20; 4–15; 5–55

Исследована квазиизэнтропическая сжимаемость плазмы гелия и дейтерия в области давлений 1500–2000 ГПа с использованием экспериментальных устройств сферической геометрии и рентгенографического комплекса, состоящего из трех бета-

тронов и многоканальной оптико-электронной системы регистрации рентгеновских изображений. В экспериментах измерены средние значения плотностей 4,3 и 3,8 г/см<sup>3</sup> в дейтерии и гелии при давлениях 2210 и 1580 ГПа соответственно. Внутренняя энер-

гия дейтериевой плазмы при этом давлении составляет ~ 1 МДж/см<sup>3</sup>, что в ~ 100 раз превышает удельную энергию химических конденсированных ВВ. Анализ данных показывает, что степень ионизации гелия при достигнутых параметрах сжатия составляет ~ 0,9.

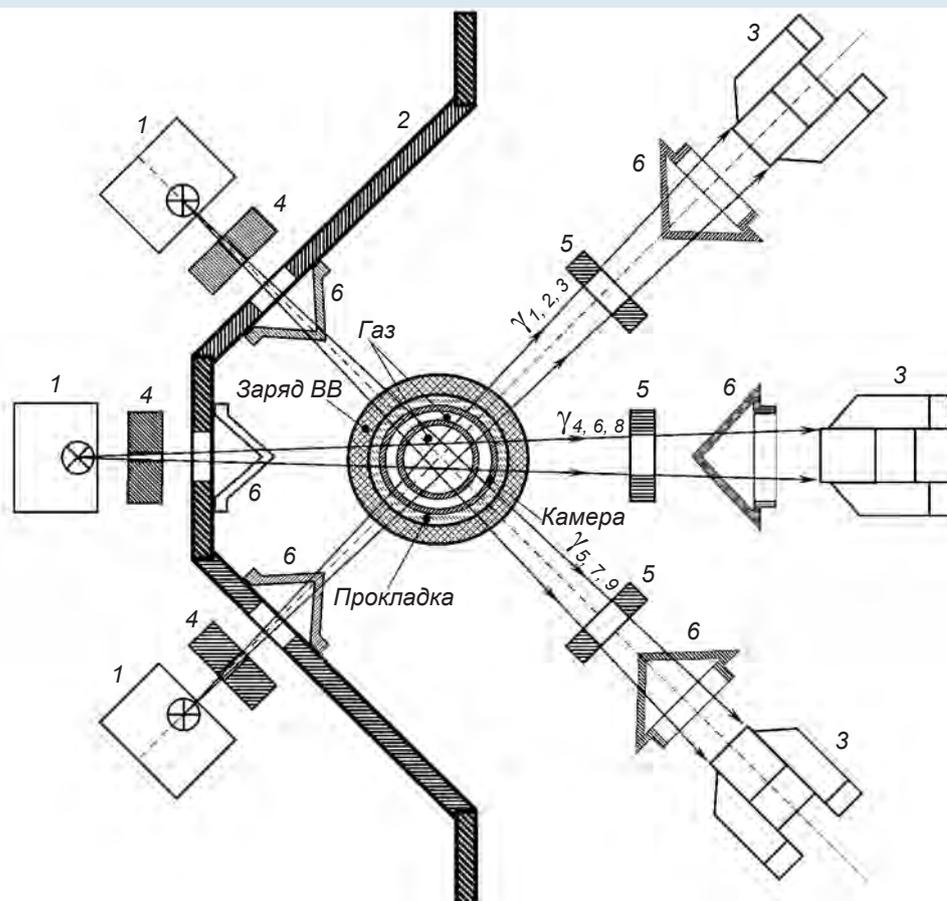
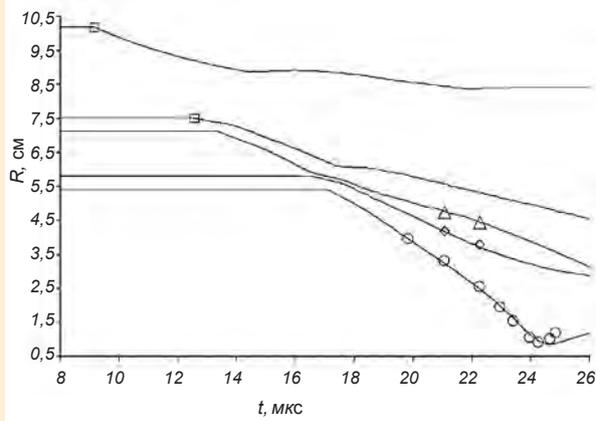
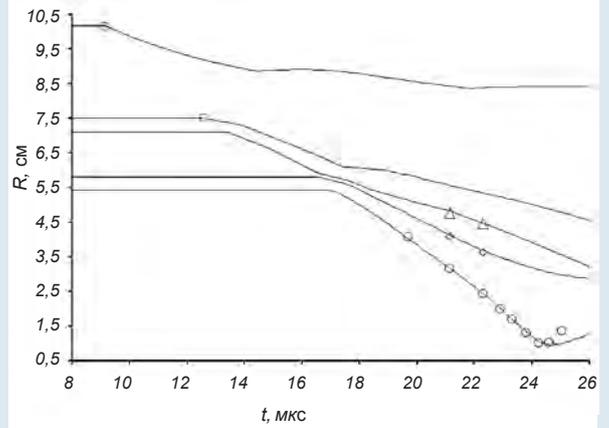


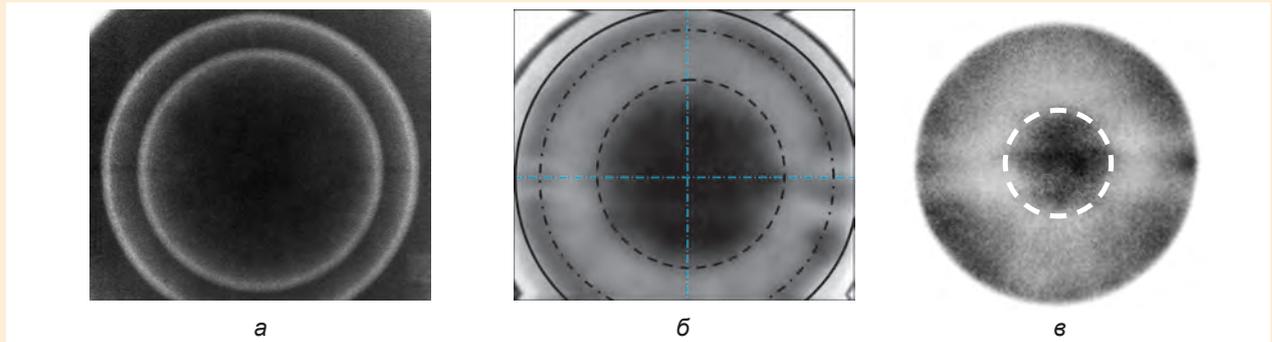
Схема эксперимента на рентгенографическом комплексе РГК-Б: 1 – бетатрон БИМ234.3000; 2 – защитное сооружение; 3 – оптико-электронный регистратор; 4, 5 – коллиматор; 6 – защитный конус



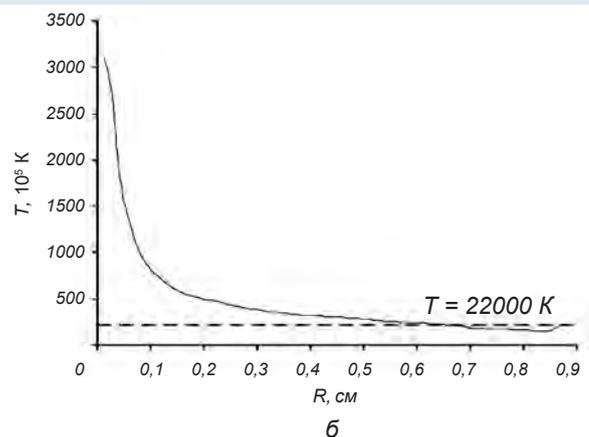
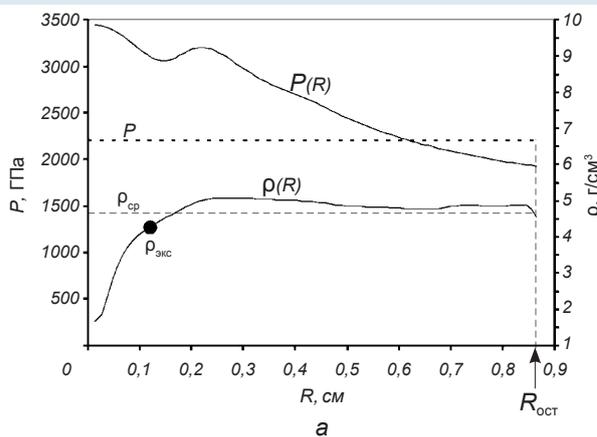
*R(t) диаграммы движения оболочек в эксперименте с дейтерием, времена отсчитываются от начала детонации заряда ВВ: □ – электроконтактные измерения движения УВ при газодинамическом исследовании устройства; результаты рентгенографирования: △ – внутренняя граница первого каскада; ◇ – внешняя граница второго каскада; ○ – внутренняя граница второго каскада*



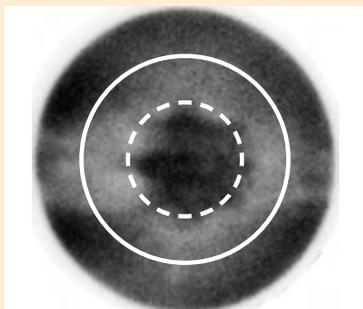
*R(t) диаграммы движения границ оболочек в эксперименте с газообразным гелием ( $P_0 = 167$  атм;  $T_0 = 27$  °С): □ – электроконтактные измерения движения УВ при газодинамическом исследовании устройства; результаты рентгенографирования: △ – внутренняя граница первого каскада; ◇ – внешняя граница второго каскада; ○ – внутренняя граница второго каскада*



*Рентгенограммы в эксперименте с дейтерием: а – устройство в исходном состоянии; б –  $t = 21,08$  мкс; в –  $t = 24,26$  мкс (момент максимальной сжатия). Пунктиром показаны границы оболочек, полученные в результате обработки рентгенограмм*



*Квазиизэнтропическая сжимаемость газообразного дейтерия. Распределение давления и плотности (а); температуры (б)*

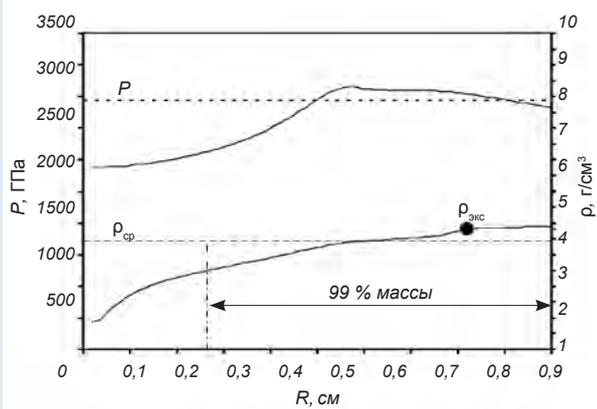


Рентгенограмма полости со сжатым гелием. Белым пунктиром и белой линией показаны результаты функциональной обработки рентгеновского изображения полости со сжатым гелием и радиуса волны сжатия в стальной оболочке на момент максимального сжатия газа

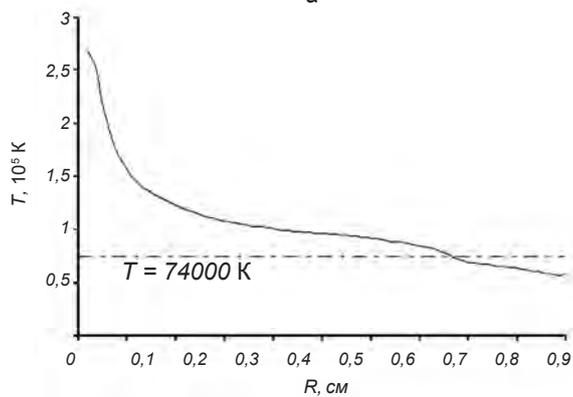
Гидродинамические неустойчивости Рэля – Тейлора, Рихтмайера – Мешкова и вызванное ими турбулентное перемешивание веществ являются отрицательными факторами при работе импульсных устройств для получения высоких плотностей энергии. Для точного численного моделирования этих неустойчивостей важно иметь экспериментальные данные о времени перехода процесса развития возмущений в турбулентную стадию. При расчете процессов теплопередачи необходимо знать размеры фрагментов веществ в зоне турбулентного

перемешивания. Для решения этих задач в ИФВ разработана микроскопическая электронно-оптическая методика, позволяющая разрешать микроструктуру зоны перемешивания.

Проведены исследования фазовых превращений титана в ударных волнах. Для этого при ударно-волновом нагружении с помощью индикаторных жидкостей и манганинового датчика определены зависимости упругой продольной и объемной скоростей звука от давления. Рентгеноструктурный анализ показал, что измерения проведены

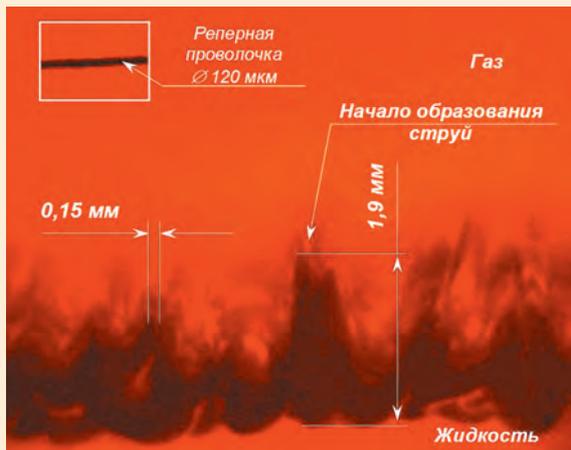


а

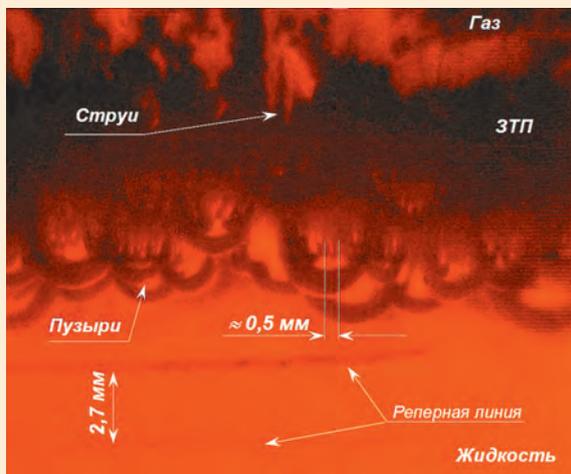


б

Квазиизэнтропическая сжимаемость газообразного гелия. Распределение давления и плотности (а); температуры (б)



а



б

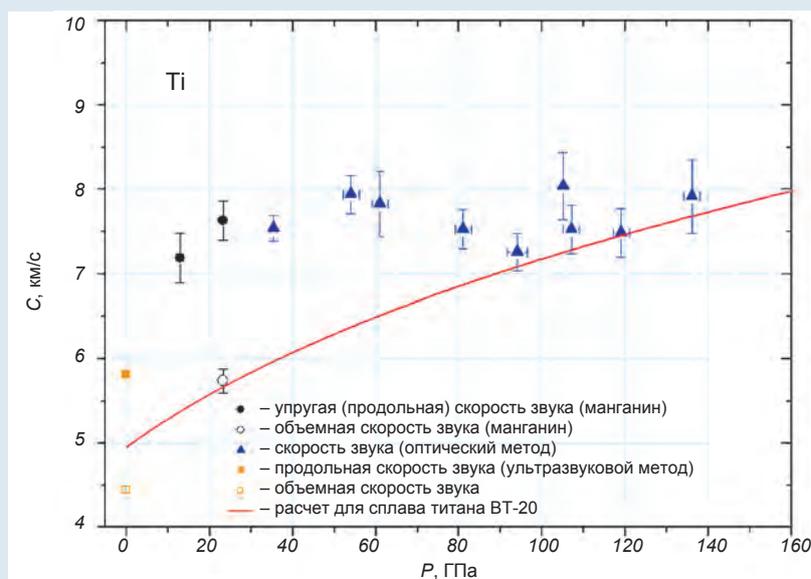
Микроструктура зоны турбулентного перемешивания на границе газ-жидкость: а – переход процесса развития возмущений в турбулентную стадию; б – развитая зона турбулентного перемешивания (ЗТП)

в исходном титане, состоящем из одной  $\alpha$ -фазы (периоды решетки:  $a = 2,950 \text{ \AA}$ ,  $c = 4,683 \text{ \AA}$ ). Фазовый анализ ударно-сжатого (постопытного) титана показал, что во всех исследованных образцах содержатся две фазы титана:  $\alpha$ -Ti и  $\omega$ -Ti. При давлениях на ударной адиабате титана 20–40 ГПа и 55–95 ГПа впервые зарегистрированы два излома зависимости скоростей звука. Первый излом может быть связан с ( $\alpha$ - $\omega$ ) фазовым превращением титана. Второй излом также отвечает фазовому превращению и требует дополнительного исследования.

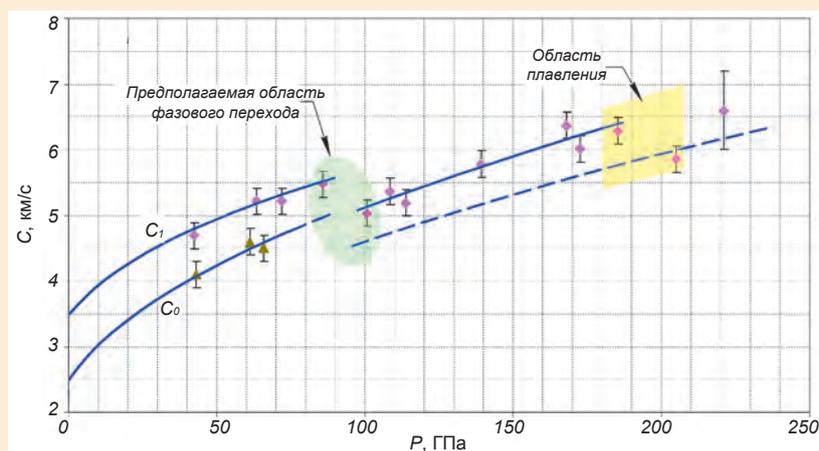
Для природного урана ( $\rho = 18,91 \text{ г/см}^3$ ) с помощью лазерного интерферометра Фабри – Перо в области давлений до 2,2 Мбар определены зависимости продольной и объемной скорости звука от давления ударной волны. В области давлений 85–100 ГПа продольная и объемная скорости звука уменьшаются на  $\approx 600 \text{ м/с}$ . Это приводит к излому кривых  $C_l(P)$  и  $C_o(P)$ , что, по-видимому, свидетельствует об  $\alpha$ - $\gamma$  фазовом переходе в уране. Результаты экспериментов в диапазоне давлений 170–220 ГПа свидетельствуют, что плавление урана на удар-

ной волне начинается в области давлений  $P = 185\text{--}190 \text{ ГПа}$  и заканчивается в области, близкой к  $P = 205 \text{ ГПа}$ . По результатам экспериментов определены коэффициент Пуассона  $\mu = 0,35\text{--}0,43$  и сдвиговая прочность  $1,06\text{--}2,42 \text{ ГПа}$ .

Проведены исследования анизотропии откольной прочности стали 12X18H10T в нестационарной ударной волне интенсивностью  $\sim 55 \text{ ГПа}$ . Скорость деформации в разгрузочной части импульса составляла  $\dot{\epsilon} \sim 2 \cdot 10^6 \text{ 1/с}$ . Направление ударно-волнового нагружения образцов либо совпадало с направлением технологической прокатки, либо было перпендикулярно ему. Измерение откольной прочности осуществлялось методом непрерывной регистрации профиля скорости свободной поверхности лазерным интерферометром Фабри – Перо. Часть образцов во время опытов разгружалась либо во фторопласт, либо в LiF и в дальнейшем использовалась для измерений в них поврежденности оптическим методом. Выполнено численное моделирование экспериментов. Результаты измерения лазерным интерферометром показали, что при совпадении направления нагружения и направления технологической прокатки средняя откольная прочность составила  $\sigma = 3,60 \pm 0,20 \text{ ГПа}$ , а когда они перпендикулярны –  $\sigma = 2,95 \pm 0,24 \text{ ГПа}$ . Анизотропия для данных условий проведения опытов достигает  $\sim 20 \%$ . Из измерений поврежденности постопытных образцов следует, что в образцах первого типа максимальная поврежденность более чем в 2 раза меньше максимальной поврежденности образцов второго типа, что косвенно также подтверждает наличие анизотропии в стали при субмегабарном уровне нагружения.



Зависимость скорости звука в титане от давления



Зависимость продольной  $C_1$  и объемной  $C_0$  скорости звука в природном уране от давления ударной волны