

УДК 534.22.2:537

## НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОТОННОЙ РАДИОГРАФИИ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

В. А. Аринин, С. А. Картанов, Ю. П. Куропаткин, А. И. Лебедев,  
А. Л. Михайлов, К. Л. Михайлюков, В. А. Огородников, О. В. Орешков,  
К. Н. Панов, М. А. Сырунин, М. В. Таценко, Б. И. Ткаченко,  
И. А. Ткаченко, И. В. Храмов, А. П. Цой

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607190 Саров, postmaster@ifv.vniief.ru

В течение примерно 15 лет в РФЯЦ-ВНИИЭФ проводятся исследования быстропротекающих газодинамических процессов с использованием протонного радиографического комплекса, созданного совместно с ГНЦ ИФВЭ на базе ускорителя У-70. Основные преимущества импульсной протонной радиографии перед широко распространенной импульсной рентгенографией — пространственное разрешение, многокадровость, просвечивающая способность, динамический диапазон регистрации и т. п. В последние годы продолжены работы по расширению возможностей протонного радиографического комплекса, связанных с увеличением общего времени и расширением поля регистрации, оснащением его дополнительными методиками диагностики и новыми взрывозащитными камерами. В данной работе приведены результаты исследований, иллюстрирующие реализацию этих возможностей.

Ключевые слова: протонная радиография, детонация, ударная волна, откольное разрушение, сжимаемость, магнитография.

DOI 10.15372/FGV20180501

### ВВЕДЕНИЕ

Протонная радиография на базе высокоэнергетичных протонов раскрывает широкие возможности для невозмущающей диагностики как статических объектов, так и быстропротекающих процессов.

Основные преимущества импульсной протонной радиографии быстропротекающих процессов, реализованной на ускорителе У-70, перед широко распространенной импульсной рентгеновской радиографией обсуждались в работах [1–6]:

- существенно бóльшая многокадровость регистрации динамического процесса (до 29 кадров с межкадровым промежутком 167 нс при длительности просвечивающего импульса  $20 \div 30$  нс);
- на порядки более широкий динамический диапазон регистрации распределения массовой толщины просвечиваемого объекта;

– в несколько раз бóльшие массовые толщины просвечиваемых объектов (до  $\approx 450$  г/см<sup>2</sup>), недостижимые на наиболее мощных современных рентгеновских радиографических комплексах, созданных на базе ускорителей электронов мегаэлектронвольтного диапазона энергии;

– в 2–3 раза лучшее пространственное и временное разрешение по сравнению с рентгеновскими установками.

В настоящее время возможности протонного радиографического комплекса (ПРГК) на базе ускорителя У-70 существенно расширены [7–12]:

- создана новая магнитооптическая система формирования изображения и управления пучком протонов, вследствие чего линейные размеры поля обзора (диаметр протонного пучка) увеличены примерно в четыре раза (с 60 до  $\approx 240$  мм);
- реализовано управление диаметром зондирующего протонного пучка от  $\approx 60$  до  $\approx 240$  мм в зависимости от размеров исследуемого объекта и требуемой плотности потока протонов;
- созданы широкоапертурные многокадровые

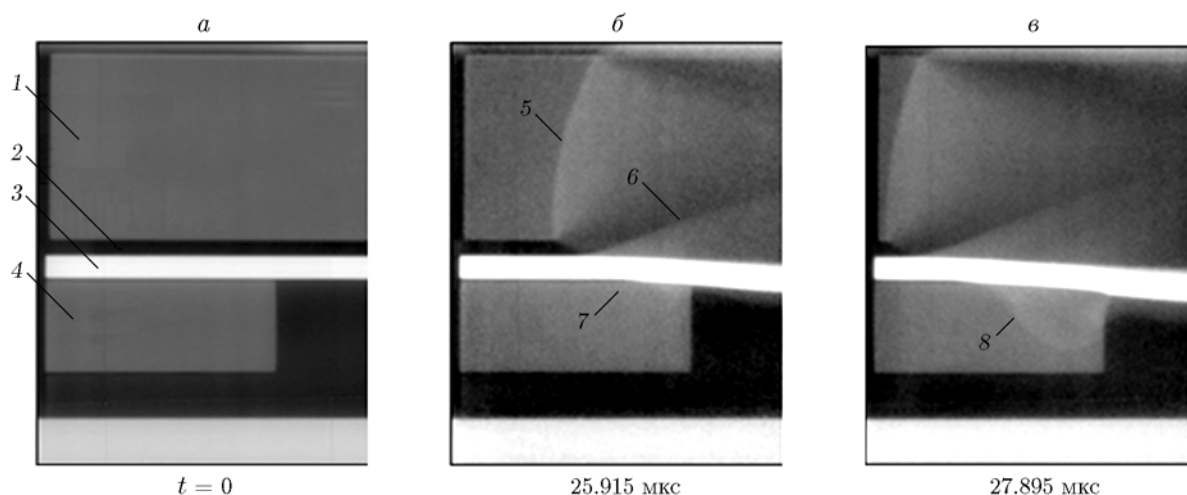


Рис. 1. Динамика процесса передачи детонации через преграду:

1 — активный заряд, 2 — зазор 3.3 мм, 3 — медная пластина, 4 — пассивный заряд, 5 — фронт ДВ в активном заряде, 6 — фронт отраженной УВ в продуктах взрыва, 7 — фронт УВ в пассивном заряде, 8 — фронт ДВ в пассивном заряде

системы регистрации изображения объекта и мониторинга качества пучка в каждом протонном сгустке (банче) по ходу пучка, расположенные в трех позициях: одна — до объекта (мониторинг пучка), две — после него (регистрация изображений объекта);

– более чем в семь раз (35/4.8 мкс) увеличено достижимое общее время регистрации динамического объекта за счет «порционного» быстрого резонансного вывода протонов с паузами между порциями банчей, кратными времени пробега банча протонов по орбите их ускорителя (4.8 мкс);

– комплекс оснащен дополнительными методами диагностики динамических процессов (лазерно-доплеровской интерферометрией, электроконтактными и пьезоэлектрическими датчиками и т. п.);

– разработаны взрывозащитные камеры для размещения диагностируемого динамического объекта в пучке протонов с полной локализацией продуктов его взрыва, которые оборудованы аппаратными комплексами мониторинга промышленной безопасности;

– создана юстировочная платформа с дистанционным управлением положения объекта относительно пучка протонов.

Для демонстрации современных возможностей комплекса ПРГК в настоящей работе приведены некоторые результаты исследований ряда быстропротекающих процессов и «статических» экспериментов без динамиче-

ского развития процесса или перемещения объекта.

### ВОЗБУЖДЕНИЕ ДЕТОНАЦИИ В ВВ НА ОСНОВЕ ОКТОГЕНА ЧЕРЕЗ ПРЕГРАДУ СКОЛЬЗЯЩЕЙ (КОСОЙ) УВ

Целью опыта являлось определение формы и положения фронта ударной (УВ) и детонационной (ДВ) волн в пассивном заряде в различные моменты времени в процессе его инициирования через преграду.

В эксперименте использовали сборку (рис. 1, а), состоящую из двух зарядов взрывчатого вещества (ВВ) шириной 60 мм на основе октогена, один из зарядов — активный, другой — пассивный, высотой 40 и 20 мм соответственно. Заряды разделены инертной пластиной из меди толщиной 5 мм, которую устанавливали с верхним и нижним зазорами 3.3 и 0.3 мм соответственно. Активный заряд высотой 40 мм инициировали линейным генератором ДВ, который представляет собой пластину из пластического ВВ на основе тэна толщиной 4 мм и шириной 60 мм.

Некоторые протонографические изображения, полученные в опыте в определенные моменты регистрации, приведены на рис. 1. На снимках удалось зафиксировать динамику переходных процессов инициирования пассивного заряда: сначала виден фронт УВ, затем с задержкой появляется фронт детонации. В дальнейшем фронт ДВ в пассивном и активном

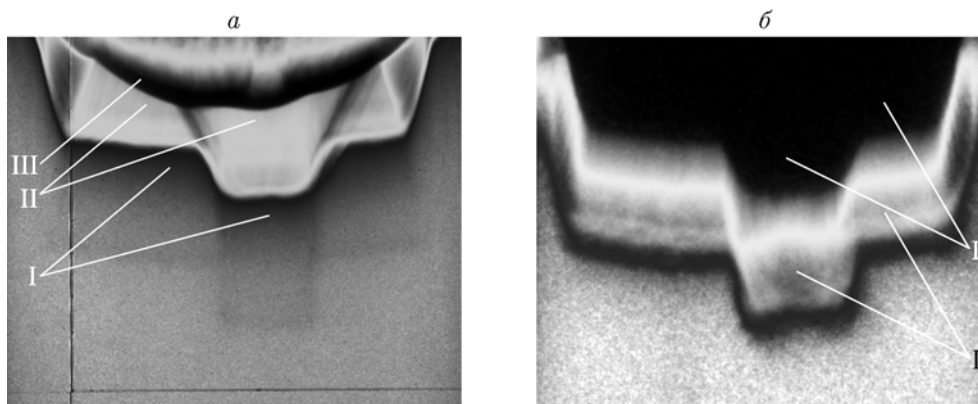


Рис. 2. Кадры, полученные на протонографическом (а) и рентгенографическом (б) комплексах: I — зона пыления, II — зона откольного разрушения, III — зона неразрушенного материала

зарядах, а также фронт отраженной от меди УВ в продуктах взрыва удовлетворительно регистрируются на изображениях и могут быть использованы для проведения количественных измерений.

#### ОТКОЛЬНОЕ РАЗРУШЕНИЕ И ВЫБРОС ЧАСТИЦ СО СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦА ИЗ СВИНЦА ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ

Эксперимент иллюстрирует возможности применения протонного радиографического комплекса для исследования откольного разрушения и выброса частиц со свободной поверхности образца при выходе на нее УВ. Образец из свинца размером  $110 \times 60 \times 3$  мм с шероховатостью свободной поверхности  $Rz = 40$  мкм нагружали детонационной волной удлиненного заряда ВВ размером  $100 \times 40 \times 25$  мм, который инициировали одновременно по двум параллельным линиям с расстоянием между ними 7 мм. В результате такого нагружения на свободную поверхность образца выходила УВ с амплитудой на фронте в центральной области 43 ГПа, а в периферийных областях — 32 ГПа, в обоих случаях достаточной для плавления свинца [13]. В данном эксперименте также применяли пьезоэлектрические датчики и PDV-датчики лазерной доплеровской диагностики.

На рис. 2,а приведен один из десяти кадров, зарегистрированных на протонном радиографическом комплексе. Здесь же для сравнения помещен рентгенографический снимок аналогичного опыта (рис. 2,б), полученный в близкий момент времени регистрации.

Результаты экспериментов показали, что в данном опыте жидкий свинцовый образец состоял из трех областей:

- зона I — низкоплотное ( $\approx 0.05 \div 0.1$  г/см<sup>3</sup>) облако частиц, образующихся в результате их выброса со свободной поверхности образца (область «пыления»);
- зона II — диспергированная часть образца плотностью  $\approx 1 \div 1.5$  г/см<sup>3</sup>, образовавшаяся в результате откольного разрушения;
- зона III — неразрушенная часть свинцового образца.

«Мягкий» рентген с применением импульсной установки с верхней граничной энергией сплошного спектра рентгеновских лучей  $\approx 1$  МэВ позволил получить изображение облака частиц (пыление) лучшего качества, но сам свинцовый образец оставался непросвеченным (см. рис. 2,б). Протонографический комплекс зарегистрировал как облако частиц (пыление), так и структуру разрушенного образца до его неразрушенной части (см. рис. 2,а).

На рис. 3 приведено распределение плотности  $\rho$  в образце вдоль координаты  $X$  (направление движения), полученное при обработке протонного изображения. На рис. 4 представлены зарегистрированные различными методами распределения плотности выброшенных частиц вдоль координаты  $X$  и массы выброшенных частиц  $m_s$  в более поздний (через  $\approx 5$  мкс), чем на рис. 3, момент времени (зона I).

Информацию о распределении плотности диспергированной части образца внутри зоны II одновременно с регистрацией малоплотного пылевого потока удалось получить впервые. Это стало возможным только за счет

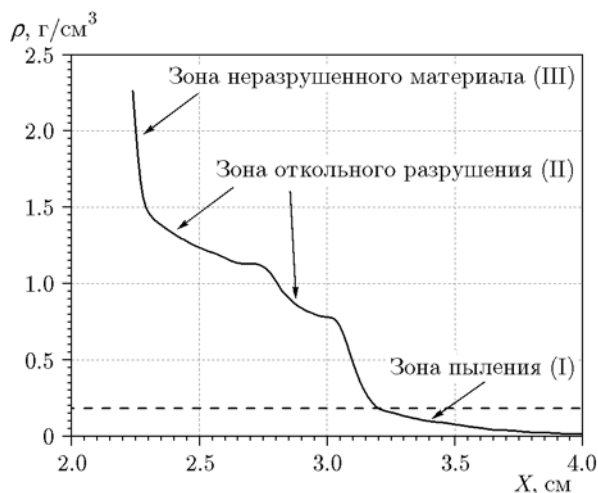


Рис. 3. Распределение плотности в центральной области образца в направлении его движения в момент времени  $t \approx 14.4$  мкс:

штриховая линия — граница, разделяющая область пыления от области диспергированного материала (откол)

применения импульсной протонографии, позволяющей определить распределение плотности среды в широком диапазоне — от малоплотных пылевых потоков до сплошного материала, в данном случае — свинца.

### КВАЗИИЗЭНТРОПИЧЕСКАЯ СЖИМАЕМОСТЬ ГАЗОВ В ОБЛАСТИ ДАВЛЕНИЯ МЕГАБАРНОГО УРОВНЯ

Квазиизэнтропическую сжимаемость аргона и гелия исследовали с использованием малогабаритного сферического нагружающего устройства, крупногабаритные аналоги которого описаны в [14]. В устройствах, аналогичных рассматриваемым в настоящей работе, газ сжимается серией падающих и отраженных УВ и сходящейся к центру оболочкой. Этот процесс получил название квазиизэнтропического сжатия [14] и характеризуется значительно меньшим нагревом исследуемого газа по сравнению с ударно-волновым нагружением.

Устройство содержало заряд ВВ на основе октогена, его наружный и внутренний радиусы  $R = 52$  и  $33$  мм соответственно. Внутри заряда ВВ размещали медную оболочку толщиной  $\approx 2$  мм, заполненную аргоном или гелием под давлением  $p = 14.44$  или  $40.45$  атм соответственно. Начальная температура газа в обоих устройствах составляла  $289$  К. С учетом этого

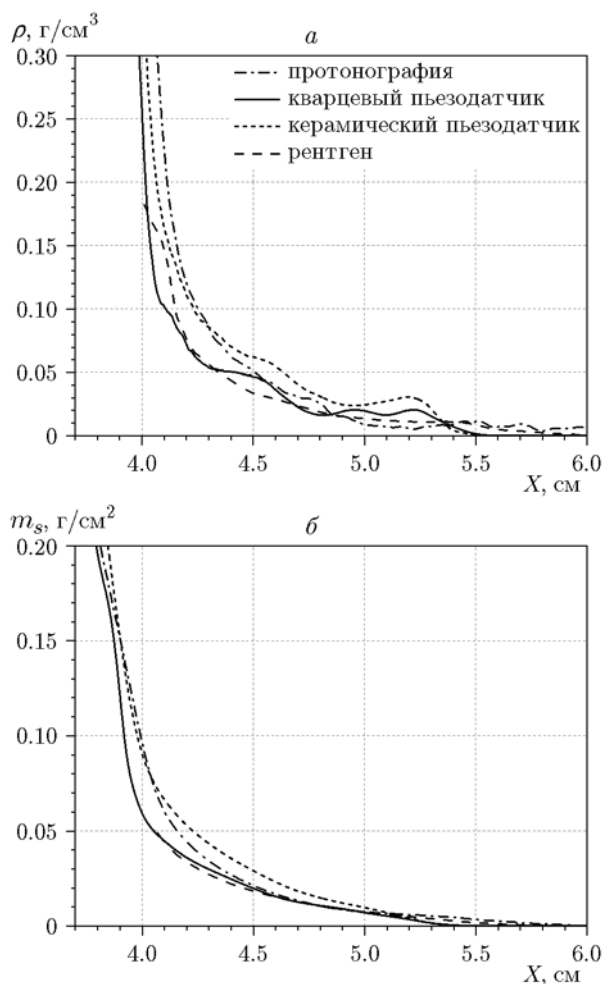


Рис. 4. Распределения плотности выброшенных частиц вдоль координаты  $X$  (а) и массы выброшенных частиц (б) в момент времени  $t = 19$  мкс (зона I)

начальная плотность аргона в опытах составляла  $0.0188$  г/см<sup>3</sup>, гелия —  $0.00648$  г/см<sup>3</sup>.

В опытах с аргоном и гелием получено соответственно 10 и 17 снимков в различные моменты времени схождения, остановки и разлета оболочки со сжатым газом. На рис. 5, а, б приведены контрольные результаты трассировки границ и формы газовой полости, полученные в опытах с аргоном и гелием в моменты, близкие к моменту максимального сжатия, в той же манере, как и в [14].

Проведено численное моделирование исследуемых процессов в одномерном гидродинамическом комплексе [15], предназначенном для решения нестационарных гидродинамических задач различной геометрии с учетом теплопроводности и упругопластических свойств среды.

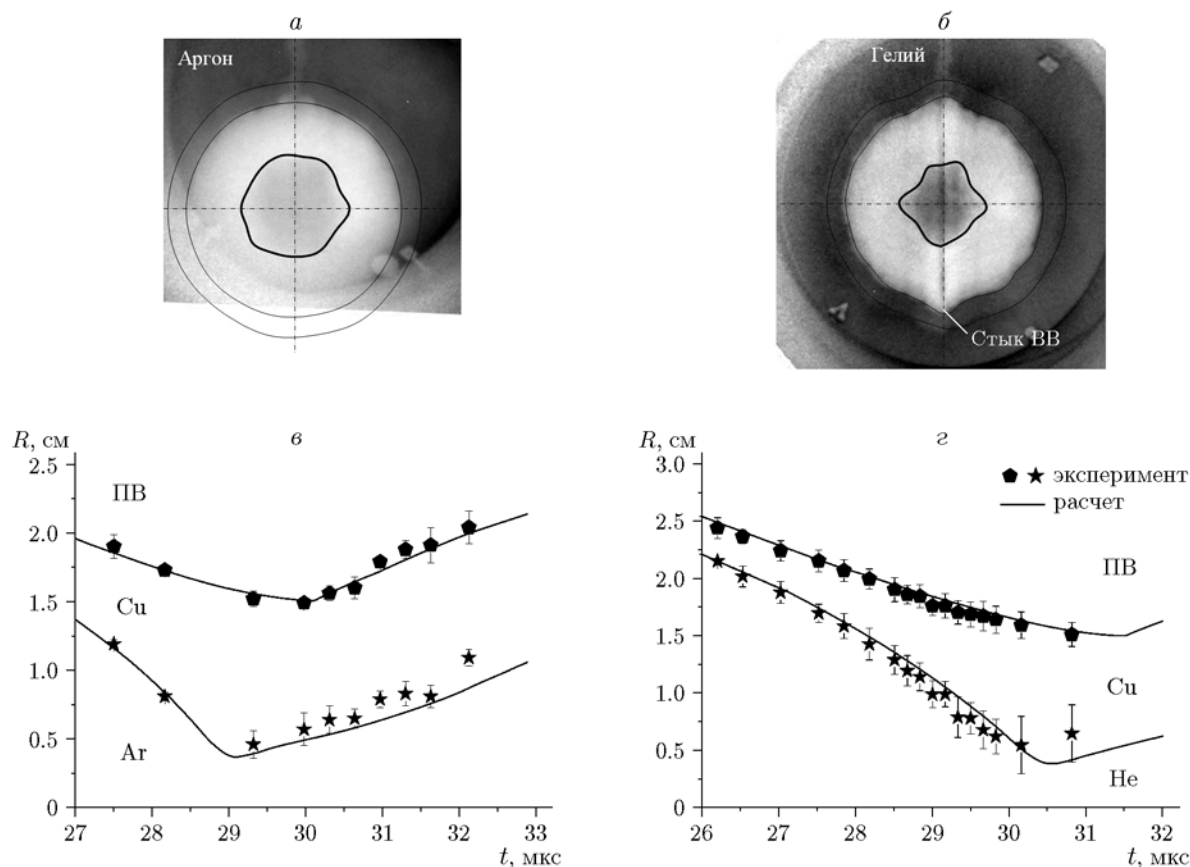


Рис. 5. Процесс сжатия газа в динамическом устройстве

Для аргона использованы уравнения состояния из библиотеки SESAME [16], для гелия — (по аналогии с [14]) из [17]. На рис. 5, в, з приведены расчетные и экспериментальные  $R-t$ -диаграммы процесса сжатия газа в сферическом устройстве. Наблюдается удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных данных, что позволяет надеяться на корректный расчет значений термодинамических величин в газе по аналогии с [14].

Результаты опытов по сжатию аргона и гелия в координатах  $p-\rho$ , полученные аналогично [14], приведены на рис. 6 вместе с данными по квазиизоэнтропической сжимаемости аргона и гелия из [14, 18–20]. Результаты протонографических экспериментов вполне удовлетворительно согласуются с результатами других авторов. Это указывает на перспективность использования протонного радиографического комплекса для исследования сжимаемости различных газов и их смесей.

### ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ СФЕРИЧЕСКОГО МАКЕТА ПРИ ОДНОТОЧЕЧНОМ ИНИЦИИРОВАНИИ

В экспериментах по исследованию особенностей динамики схождения сферического макета, содержавшего полевой заряд ВВ на основе октогена с тонкой оболочкой внутри, при его одноточечном инициировании на внешней поверхности проводилась многокадровая регистрация процессов, разнесенных по времени — как на начальном этапе при распространении детонации по ВВ, так и на более позднем этапе при сжатии оболочки вблизи момента ее фокусировки. Эти два интервала регистрации, оба длительностью 4.8 мкс, разделены промежутком времени без регистрации  $\approx 10$  мкс. Для увеличения длительности регистрации газодинамического процесса был применен многооборотный метод быстрого резонансного вывода пучка протонов [10]. Этот метод позволил увеличить длительность регистрации до  $\approx 35$  мкс, что примерно в семь раз превышает время од-

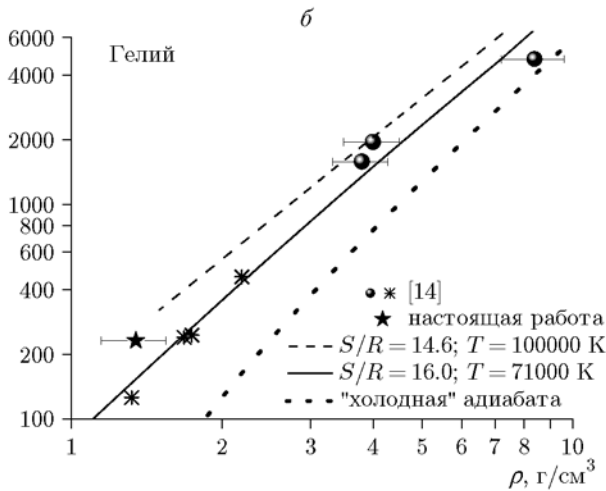
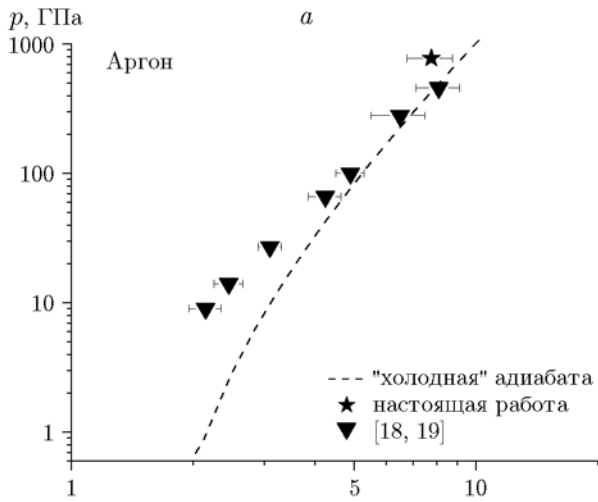


Рис. 6. Квазиизэнтропическая сжимаемость аргона (а) и гелия (б)

нооборотного вывода банчей протонов на объект, а также зарегистрировать в одном эксперименте процесс от начала распространения детонации по заряду ВВ до имплозивного сжатия оболочки и последующего ее разлета. Эксперименты проведены с полем регистрации диаметром 120 мм.

Осциллограмма сигнала тока с пояса Роговского, зарегистрированная в опыте методом быстрого резонансного вывода пучков протонов, показана на рис. 7. Видно, что после вывода двух серий ( $t_0^1$  и  $t_0^2$ ) длительностью по 4.8 мкс каждая, содержащих по восемь банчей с близкой интенсивностью сигналов, на осциллограмме имеются еще сигналы, соответствующие третьему сбросу пучка протонов ( $t_0^3$ ) из восьми банчей с интенсивностью сигналов су-

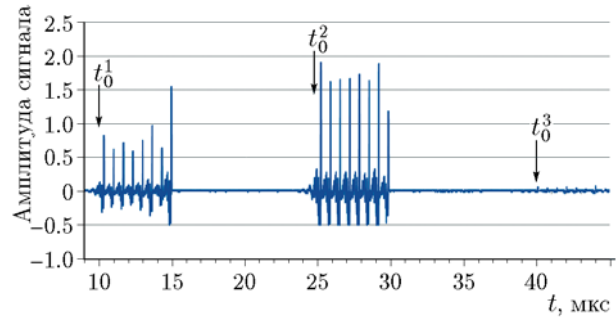


Рис. 7. Осциллограмма токового сигнала с пояса Роговского в опыте с выводом пучка протонов методом быстрого резонансного вывода (отсчет времени ведется от подачи электрического импульса в систему инициирования заряда ВВ)

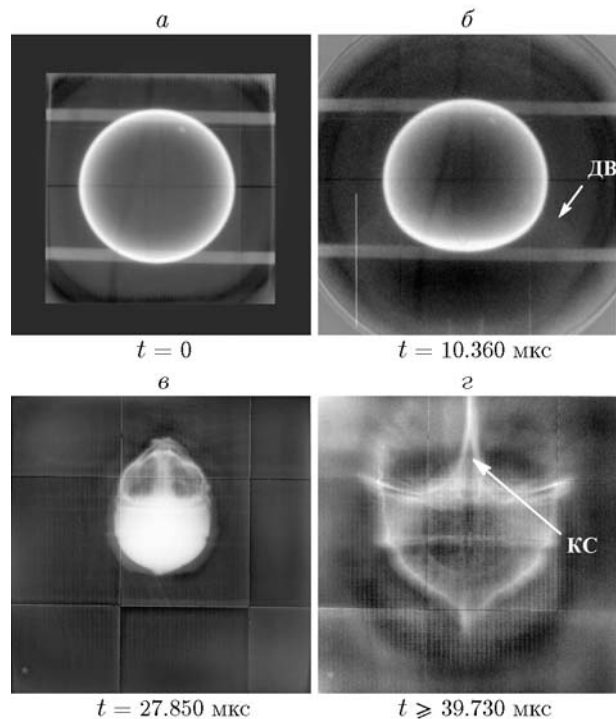


Рис. 8. Характерные протонограммы, полученные в опыте в различные моменты времени:

ДВ — фронт детонационной волны, КС — кумулятивная струя

щественно ниже, чем в двух предыдущих сериях. Реализовавшийся в методе быстрого резонансного вывода третий сброс протонов позволил зарегистрировать в стробоскопическом режиме еще более поздний по времени ( $\approx 35$  мкс) процесс — развитие кумулятивной струи. На рис. 8 приведены предварительный снимок и

некоторые рабочие снимки опыта. На протонограммах рис. 8 точка инициирования расположена снизу на вертикальной оси, проходящей через центр макета.

В экспериментах зарегистрированы в различные моменты времени: фронт детонационной волны в сферическом заряде ВВ (рис. 8,б), положение границ оболочки при разлете (рис. 8,в), формирование и развитие кумулятивной струи из материала оболочки (рис. 8,г), т. е. показана возможность увеличения длительности регистрации с  $\approx 4.8$  до  $\approx 35$  мкс при использовании метода быстрого резонансного вывода пучка протонов.

### ВОЗМОЖНОСТИ ПРОТОННОЙ МАГНИТОГРАФИИ

Традиционные рентгенография и протонография не могут различать части объекта, если между ними отсутствует различие в массовых толщинах  $\rho l$ , где  $\rho$  — плотность,  $l$  — протяженность в направлении просвечивания. Протонная магнитография, использующая для просвечивания объекта заряженные частицы, позволяет фиксировать границы даже между идентичными материалами при использовании метода контрастирования с помощью «вмороженных» магнитных полей. Это открывает новые возможности для получения количественной информации, например, о массовых и волновых скоростях, о плотности материала, необходимой для построения ударных адиабат веществ, для исследования нестационарных течений внутри однородных веществ и ряда других процессов (обычно для изучения сжимаемости материалов в УВ используют измерения массовых и волновых скоростей с последующим расчетом плотности материала за фронтом УВ с использованием законов сохранения).

Ниже приведен пример статического эксперимента по исследованию возможности различать проводящие и непроводящие материалы (в более общем случае — материалы с различающейся магнитной проницаемостью) в импульсном магнитном поле. Исследуемый объект представлял собой алюминиевый блок с прорезью, заполненной стеклом такой же массовой толщины  $\rho l$  (рис. 9,а). Обычное протонное изображение объекта (как и рентгеновское) не позволяет различать стекло и алюминий из-за близких значений  $\rho l$  и заряда ядер алюминия и кремния (рис. 9,б). При включении импульсного магнитного поля на время облучения

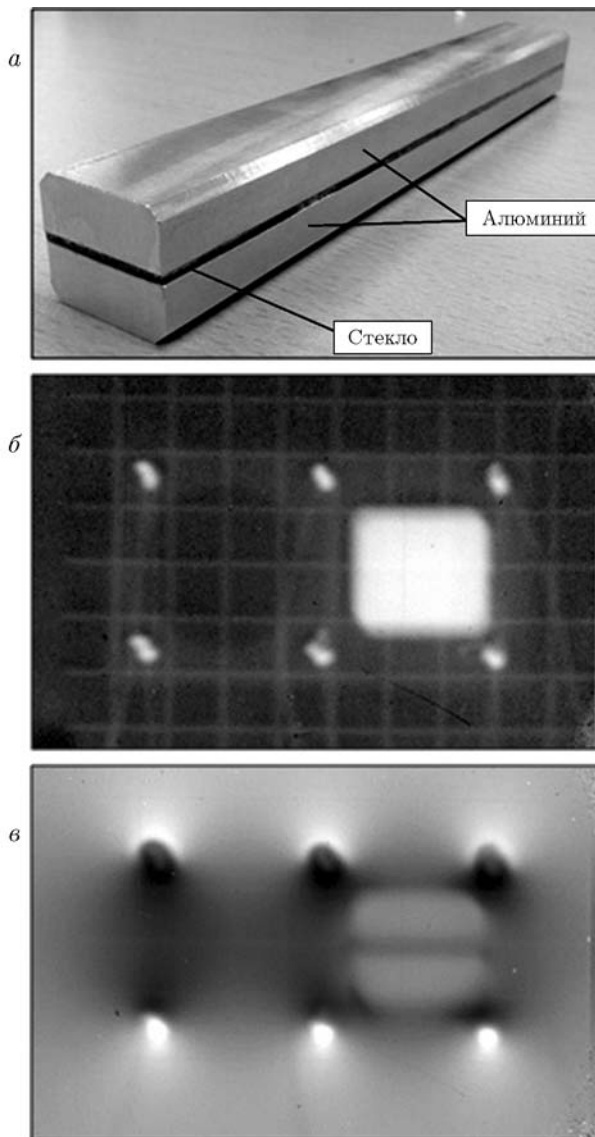


Рис. 9. Протонограммы объекта

объекта пучком протонов около  $5 \div 10$  мкс его силовые линии успевают проникнуть в стекло, отклоняя соответствующую часть поперечного сечения пучка, но не успевают проникнуть в алюминий, что дает возможность при использовании соответствующим образом сконструированных коллиматоров различать эти вещества на протонограмме (рис. 9,в). В случае динамических экспериментов «протонная магнитография» основывается на различии на 1–2 порядка времени существования «вмороженного» в вещество потока магнитного поля и времени регистрации процесса с помощью проходящих через вещество протонов.

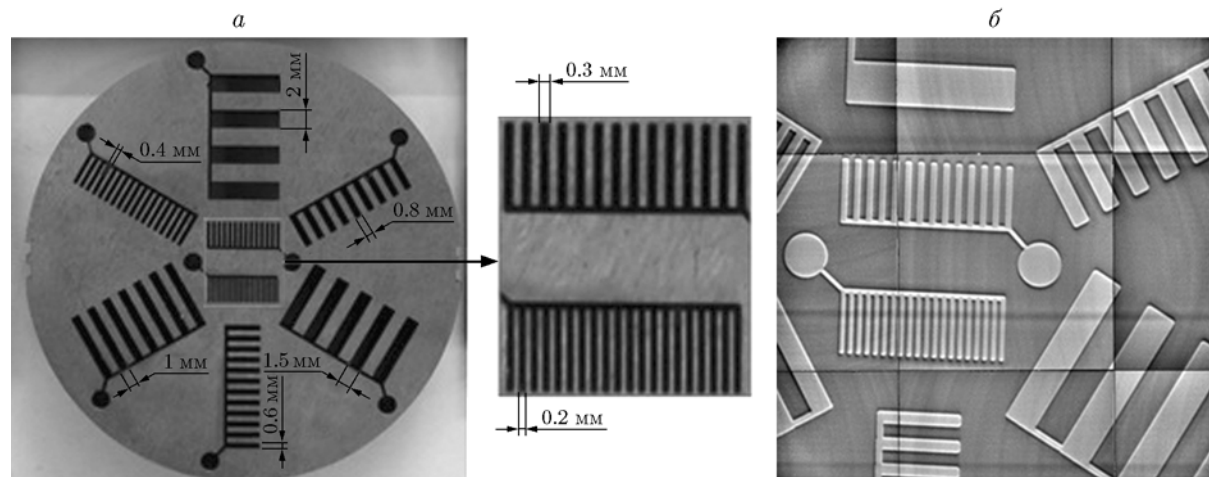


Рис. 10. Протонные изображения центральной области тест-объекта «мира», полученные на ПРГК в обычном режиме (а) и в режиме протонного микроскопа с 5-кратным увеличением (б)

### РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОТОННОГО МИКРОСКОПА НА БАЗЕ УСКОРИТЕЛЯ У-70

Существенного увеличения разрешающей способности, более чем в пять раз по сравнению с достигнутой на действующем комплексе, можно добиться путем создания магнитооптической системы, работающей с увеличением, — протонного «микроскопа». Для этой системы требуются квадрупольные линзы с большими градиентами магнитного поля. Специалистами РФЯЦ-ВНИИЭФ и ГНЦ ИФВЭ ведется разработка проекта протонного микроскопа с энергией протонов  $\approx 50$  ГэВ и к настоящему моменту проработана физическая часть проекта.

Предварительные расчеты показали, что при энергии протонов 50 ГэВ из двух позиций комплекса можно организовать протонный микроскоп с коэффициентом увеличения вплоть до 20 [21]. Был проведен эксперимент с протонным микроскопом с коэффициентом увеличения 5. Относительно небольшие градиенты магнитного поля в линзах, использующихся в комплексе в настоящее время, а также фиксированные положения этих линз налагают определенные ограничения на оптимизацию данной магнитооптической системы. В результате хроматические aberrации в системе подавить пока не удалось, однако за счет пятикратного увеличения во столько же раз было уменьшено размытие, связанное с регистрирующей системой.

На рис. 10 для демонстрации возможностей микроскопа представлены протонные

изображения тест-объекта «мира» (расстояние между мелкими штрихами составляет 200 мкм). Предварительный анализ показал, что разрешающая способность для таких тонких объектов выросла примерно в  $2.5 \div 3$  раза по сравнению с обычной «—1» оптикой.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты статических и динамических экспериментов, проведенных на протонном радиографическом комплексе, показали, что расширение возможностей протонной радиографии за счет увеличения поля обзора с 60 до 240 мм и общего времени регистрации динамического объекта, совмещение метода протонной радиографии с дополнительными методиками диагностики (лазерной интерферометрией, электроконтактными и пьезоэлектрическими датчиками и т. п.), разработка методов и средств протонной магнитографии и протонной «микроскопии» выводят исследование быстротекающих гидродинамических процессов на новый качественный уровень.

Работа выполнена под руководством академика Ю. А. Трутнева в сотрудничестве с коллективом ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт».

### ЛИТЕРАТУРА

1. Антипов Ю. М., Афонин А. Г., Василевский А. В., Трутнев Ю. А., Бурцев В. В., Волков А. А., Михайлов А. Л. и др. Радиографическая установка ускорителя протонов с



- энергией 70 ГэВ ГНЦ ИФВЭ // Приборы и техника эксперимента. — 2010. — № 3. — С. 5–12.
2. Бурцев В. В., Лебедев А. И., Михайлов А. Л., Огородников В. А., Орешков О. В., Панов К. Н., Руднев А. В., Свицкий О. В., Сырунин М. А., Трутнев Ю. А., Храмов И. В. Многокадровая протонография — метод исследования быстропротекающих гидродинамических процессов // Физика горения и взрыва. — 2011. — Т. 47, № 6. — С. 16–28.
  3. Бурцев В. В., Михайлов А. Л., Панов К. Н., Руднев А. В., Сырунин М. А. Исследование инициирования детонации во взрывчатом веществе на протонном ускорителе У-70 // Физика горения и взрыва. — 2011. — Т. 47, № 3. — С. 115–121.
  4. Аринин В. А., Бурцев В. В., Михайлов А. Л., Подурец А. М., Руднев А. В., Сырунин М. А., Терешкина И. А., Ткаченко Б. И., Ткаченко М. И., Трунин И. Р., Цой А. П., Шиберин И. В. Экспериментально-расчетное исследование квазисферического обжатия медной ампулы при нагружении ее детонацией слоя пластического ВВ // Физика горения и взрыва. — 2015. — Т. 51, № 5. — С. 112–120.
  5. Бурцев В. В., Панов К. Н., Руднев А. В., Сырунин М. А. Исследование инициирования детонации в ТАТБ методом протонной радиографии // XV Харитоновские тематические научные чтения: тр. междунар. конф. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013. — С. 74–81.
  6. Аринин В. А., Руднев А. В., Сырунин М. А., Трунин И. Р. Откольное разрушение меди при сферическом сжатии волн // XV Харитоновские тематические научные чтения: тр. междунар. конф. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013. — С. 507–515.
  7. Сырунин М. А., Вишневецкий Е. Д., Чернов В. А., Абакумов А. И., Орешков О. В. Взрывозащитная камера: пат. РФ 2524064. — Оpubл. 27.07.2014. — Бюл. № 21.
  8. Максимов А. В., Тюрин Н. Е., Федотов Ю. С. Оптическая система протонной облучательной установки на ускорителе У-70 ГНЦ ИФВЭ ПРГК // Журн. техн. физики. — 2014. — Т. 84, вып. 9. — С. 132–139.
  9. Андриянов А. И., Афонин А. Г., Гусев И. А., Зятьков О. В. и др. Ввод в эксплуатацию комплекса ПРГК на ускорителе У-70 ГНЦ ИФВЭ // Приборы и техника эксперимента. — 2016. — № 3. — С. 61–68.
  10. Авраменко С. В., Логинов А. А., Максимов А. А. и др. Многооборотный вывод ускоренного пучка из ускорителя У-70 // Приборы и техника эксперимента. — 2016. — № 3. — С. 5–10.
  11. Сырунин М. А., Огородников В. А. Взрывозащитные камеры для исследований гидродинамических процессов и взрывных технологий // Приборы и техника эксперимента. — 2015. — № 2. — С. 5–13.
  12. Цой А. П., Сырунин М. А., Кислинский В. П., Леонов В. А., Синягин М. А. Способ доставки взрывозащитной камеры к месту проведения опыта и транспортно-юстировочный комплекс для его осуществления: пат. на изобретение 2596858. — Зарегистрирован в гос. реестре 15.08.2016.
  13. Федоров А. В., Михайлов А. Л., Финюшин С. А., Назаров Д. В., Чудаков Е. А., Калашников Д. А., Бутусов Е. И. Исследование особенностей поведения свинца при ударно-волновом нагружении и последующей разгрузке // XV Харитоновские тематические научные чтения: тр. междунар. конф. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013. — С. 274–282.
  14. Мочалов М. А., Ильяев Р. И., Фортвов В. Е., Михайлов А. Л., Макаров Ю. М., Аринин В. А., Бликов А. О., Баурин А. Ю., Комраков В. А., Огородников В. А., Рыжков А. В., Пронин Е. А., Юхимчук А. А. Измерение квазиизотропической сжимаемости гелия и дейтерия при давлениях 1500–2000 ГПа // ЖЭТФ. — 2012. — Т. 142, № 4 — С. 696–711.
  15. Гаврилов Н. Ф., Иванова Г. Г., Силян В. И., Софронов В. Н. Программа УП-ОК для решения одномерных задач механики сплошной среды в одномерном комплексе // ВАИТ. Сер. Методики и программы численного решения задач математической физики. — 1982. — Вып. 3/11. — С. 11–14.
  16. SESAME: Los Alamos National Laboratory of State Database / S. P. Lyon (Ed.) // Group T-1, Los Alamos National Laboratory Document LA-UR-92-3407. — 1992. — P. 1.
  17. Копышев В. П., Хрусталева В. В. Уравнение состояния водорода до 10 Мбар // ПМТФ. — 1980. — Т. 21. — С. 122–128.
  18. Урлин В. Д., Михайлова О. Л., Толочко А. П. Квазиизотропическое сжатие газобразного аргона сферической оболочкой до 7 Мбар // III Харитоновские тематические научные чтения. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2002. — С. 139–141.
  19. Михайлова О. Л., Мочалов М. А., Урлин В. Д. Квазиизотропическое сжатие аргона до 500 ГПа // Мат. моделирование. — 1992. — Т. 4, № 12. — С. 162.

20. Мочалов М. А., Илькаев Р. И., Фортов Е. В., Михайлов А. Л., Аринин В. А., Бликов А. О., Комраков В. А., Рыжков А. В., Огородников В. А., Юхимчук А. А. Термодинамические свойства неидеальной плазмы гелия при квазиизоэнтропическом сжатии в 575 раз давлением 3 000 ГПа // Письма в ЖЭТФ. — 2015. — Т. 101, вып. 8. — С. 575–582.
21. Максимов А. В., Федотов Ю. С. О возможности создания протонного микроскопа на базе радиографического комплекса на синхротроне У-70. — Протвино, 2015. — (Препр./ИФВЭ; № 12).

*Поступила в редакцию 4/XI 2017 г.*

---