

МНОГОКАДРОВАЯ ПРОТОНОГРАФИЯ — МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

В. В. Бурцев, А. И. Лебедев, А. Л. Михайлов, В. А. Огородников,
О. В. Орешков, К. Н. Панов, А. В. Руднев, О. В. Свирский,
М. А. Сырунин, Ю. А. Трутнев, И. В. Храмов

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607190 Саров, root@gdd.vniief.ru

Приведены результаты исследования быстропротекающих гидродинамических процессов методом импульсной протонной радиографии на базе протонного синхротрона У-70 ИФВЭ. Физическая установка для протонной радиографии с максимальной энергией протонного пучка до 70 ГэВ и интенсивностью до $1.5 \cdot 10^{13}$ протонов за цикл обеспечивает регистрацию в одной проекции до 29 кадров с минимальным межкадровым временным промежутком 165 нс. Поле регистрации в настоящий момент составляет в диаметре ≈ 60 мм, с перспективой увеличения до 250 мм. Длительность банча (протонного сгустка) равна $20 \div 30$ нс и может быть снижена до $10 \div 15$ нс. С 2004 г. и по настоящее время РФЯЦ-ВНИИЭФ совместно с ИФВЭ проводит на данной установке статические и динамические эксперименты по исследованию: процессов возбуждения и распространения детонации в конденсированных взрывчатых веществах; распространения ударных волн в инертных материалах; гидродинамических неустойчивостей в металлах; динамического деформирования и разрушения оболочек и пластин; откольных разрушений; формирования кумулятивных струй и их взаимодействия с преградами; других прикладных задач физики взрыва. Созданный учеными РФЯЦ-ВНИИЭФ и ИФВЭ протонный радиографический комплекс на базе ускорителя У-70 является уникальным инструментом для исследования быстропротекающих процессов. Метод протонной радиографии открывает перед российскими исследователями новые возможности: многокадровая регистрация, практически неограниченная толщина исследуемых объектов, высокое пространственное разрешение, огромный динамический диапазон регистрации.

Ключевые слова: протонная радиография, протонный пучок, ускоритель, регистрация, динамический диапазон, банч, изображение, кадр, интенсивность, многокадровость, гидродинамический процесс, ударная волна, детонация, гидродинамическая неустойчивость, разрушение, кумулятивная струя, оболочка, заряд взрывчатого вещества, плотность.

ВВЕДЕНИЕ

В течение более чем полувека импульсная рентгеновская радиография является одним из наиболее информативных инструментов невозможной диагностикой быстропротекающих процессов [1]. Однако, несмотря на многие достоинства импульсной рентгенографии, ее возможности ограничены рядом факторов, связанных со способом генерации излучения (торможение сфокусированного пучка высокоэнергетических электронов на мишени из тяжелого металла) и с механизмами взаимодействия гамма-квантов с веществом исследуемого объекта, которые приводят к существенно нелинейной зависимости сечения взаимодействия от энергии гамма-квантов.

Экспоненциальный закон ослабления гамма-излучения ограничивает максимальную

толщину просвечиваемого объекта. Повышение просвечиваемой способности требует увеличения дозы генерируемого излучения, что сопровождается увеличением размера фокусного пятна источника и соответственно размыванием получаемого изображения. Пропорционально увеличению толщины исследуемого объекта возрастает и уровень рассеянного излучения, уменьшающий контрастность изображения. Поэтому наращивание мощности рентгенографических установок возможно лишь до известного предела.

Повышение энергии генерируемого излучения приводит к увеличению доли рассеянного излучения вследствие комптон-эффекта и образования электрон-позитронных пар, что также ухудшает качество регистрируемых изображений. При рентгенографировании оптически толстых объектов (более 200 г/см^2) каче-

ство получаемых изображений резко падает.

Реально достигнутая к настоящему времени длительность импульса мощных рентгеновских установок на базе ускорителей электронов составляет ≈ 100 нс, что также способствует размыванию границ регистрируемого изображения высокоскоростных процессов.

В совокупности эти проблемы приводят к относительно узкому динамическому диапазону регистрации распределения оптических или «массовых» толщин ρl диагностируемого объекта, измеряемых в единицах $\text{г}/\text{см}^2$: для просвечивания объекта с малыми значениями ρl используются малогабаритные установки мягкого рентгена типа острофокусных рентгеновских трубок с верхней граничной энергией гамма-квантов $E_\gamma \leq 1$ МэВ, а для радиографии массивных объектов используются мощные линейные или циклические ускорители с энергией электронов десятки мега-электрон-вольт. При этом на установках первого типа невозможно за время короткого импульса просветить массивный объект, а на установках второго типа теряются важные детали объекта с малым различием значений ρl по полю регистрации.

Весьма проблемной для мощных ускорителей электронов, особенно линейных, становится реализация многокадровости в микросекундном диапазоне времени регистрации, так как торможение мощного сфокусированного пучка электронов на мишени приводит к ее деградации и необходимости замены к следующему импульсу.

Эти проблемы практически отсутствуют в протонной радиографии [2, 3]. Высокоэнергетичные протоны гига-электрон-вольтного диапазона обладают огромной проникающей способностью при слаболинейной зависимости ионизационных потерь от энергии протонов. Средняя длина их пробега в некоторых веществах приведена в табл. 1. При оптической толщине порядка $300 \text{ г}/\text{см}^2$ доля протонов, проходящих сквозь объект, составляет $2 \cdot 10^{-1}$ против 10^{-6} для гамма-квантов. Поэтому для формирования радиографического изображения необходимо в миллионы раз меньше протонов, а их регистрация существенно эффективнее, чем гамма-квантов. При этом требования к динамическому диапазону детектирующей системы существенно менее жесткие, чем при рентгенографии. Благодаря этому, не представляет трудности получение изоб-

Таблица 1
Длина свободного пробега протонов
с энергией 24 ГэВ в некоторых веществах

Вещество	Пробег λ , $\text{г}/\text{см}^2$
Медь	124
Углерод	79
Вольфрам	173
Полиэтилен	74

ражений оптически толстых объектов целиком, включая их границы, при сохранении разрешения малых неоднородностей в оптической толщине по полю регистрации.

Наиболее дорогая и технически сложная часть комплекса протонной радиографии — это источник высокоэнергетичных протонов с энергией порядка $50 \div 70$ ГэВ. Такая энергия требуется для обеспечения высокой четкости изображения, поскольку с ее увеличением уменьшается размытие изображения за счет хроматических аберраций и многократного кулоновского рассеяния.

С середины 90-х годов XX в. в США активно ведутся исследования с применением многокадровой протонной радиографии. Однако возможности ограничены мощностью имеющихся установок линейного ускорителя протонов в Лос-Аламосе (800 МэВ) и синхротрона в Брукхэйвене (24 ГэВ) [4, 5]. В настоящее время в США разрабатывается более мощный протонный многокадровый радиографический комплекс АНФ (Advanced Hydrotest Facility) для изучения быстротекающих процессов [6]. Стоимость проекта оценивается в 2 млрд долларов. Столь высокая цена установки делает подобную технологию практически недоступной для большинства стран мира.

В России уже имеется установка с требуемыми характеристиками — протонный синхротрон У-70 Института физики высоких энергий (ГНЦ ИФВЭ, г. Протвино) [3] (табл. 2). Ускорительный комплекс включает в себя линейный ускоритель с энергией протонов 30 МэВ, бустер — 1.5 ГэВ и собственно протонный синхротрон У-70 — 70 ГэВ (рис. 1). Ускоритель оборудован системами быстрого вывода требуемого числа сгустков (банчей) протонов в исследовательские каналы, в том числе в канал инъекции в ускорительно-накопительном комплексе. Строительство комплекса прекращено

Таблица 2

Основные параметры протонных синхротронов АНФ и У-70

Параметры	АНФ (проект)	У-70 (действующий ускоритель)
Максимальная энергия, ГэВ	50	70
Энергия инъекции, ГэВ	4	1.52
Интенсивность пучка протонов в импульсе	$3 \cdot 10^{13}$	$1.7 \cdot 10^{13}$
Частота повторения импульсов, Гц	0.04	0.11
Периметр орбиты, м	1443.6	1483.6
Радиус кривизны орбиты в магнитном блоке, м	103.55	194.12
Число магнитных блоков	136	120
Прирост энергии за оборот, кэВ	<140	120
Частота ускоряющего напряжения, МГц	4.84 ÷ 4.99	5.5 ÷ 6.1
Индукция магнитного поля, Тл	1.635	1.2
Кратность частоты ВЧ-поля	24	30
Размеры вакуумной камеры, см	∅10	20 × 10

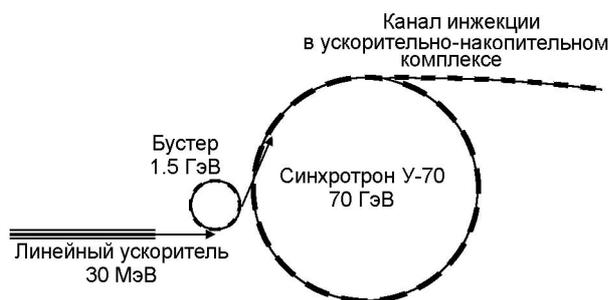


Рис. 1. Схема ускорительного комплекса У-70

в 1990-е годы. На сегодняшний день канал инъекции используется для проведения протонографических экспериментов коллективами специалистов РФЯЦ-ВНИИЭФ и ГНЦ ИФВЭ.

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПРОТОННОЙ РАДИОГРАФИИ

Протон с энергией более 500 МэВ претерпевает при прохождении через вещество несколько типов взаимодействия с его атомами:

- ядерное взаимодействие (упругое и неупругое),
- ионизация атомов вещества в объекте,
- многократное кулоновское рассеяние.

Оптимальная длина свободного пробега протонов в веществе, минимизирующая неопределенность в определении толщины объ-

екта X из этого вещества, составляет $\lambda_{opt} = X/2$. Таким образом, пробег высокоэнергетичных протонов в веществе близок к оптимальной для радиографирования объектов толщине ≈ 200 г/см².

Впервые на возможность применения протонного пучка для радиографии внутренней структуры объектов указал Р. Вильсон в 1946 г. [7], его идея была развита Г. Андерсоном [8]. Однако возможности экспериментов, выполняемых по схеме «протоны — объект — детектор», ограничены многократным кулоновским рассеянием протонов в объекте (рис. 2, а). К. Моррис [9] продемонстрировал, что отрицательные эффекты, связанные с многократным рассеянием, можно подавить, если между объектом и детектором расположить систему магнитных линз (рис. 2, б). Компенсирующая магнитооптическая система состоит из квартета квадрупольных линз. В центральной точке квартета, в так называемой фурье-плоскости, происходит пространственное перераспределение частиц по углам отклонения, обусловленным многократным кулоновским рассеянием. Это позволяет разместить в фурье-плоскости обычный коллиматор или антиколлиматор и управлять контрастностью получаемого изображения, а также разделять на нем элементы с разными значениями ρl (рис. 2, в).

Первые эксперименты по протонному ра-

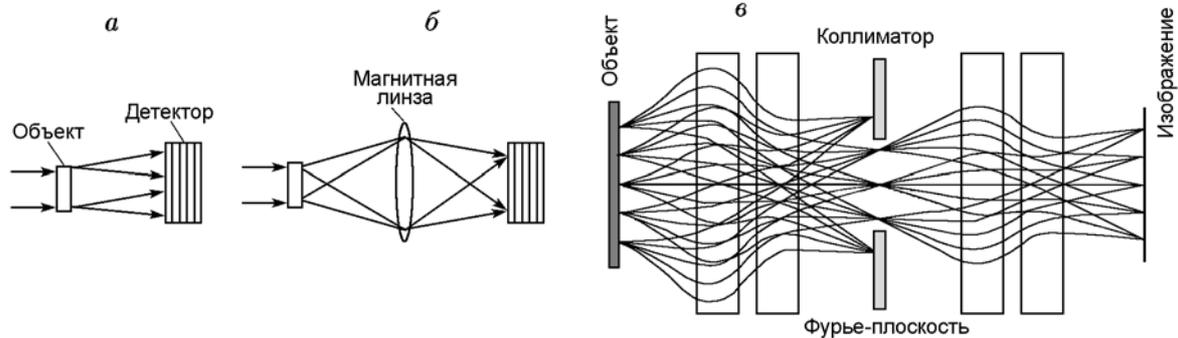


Рис. 2. Отрицательное влияние многократного кулоновского рассеяния на качество теневых протоннографических изображений (а). Подавление влияния многократного кулоновского рассеяния с помощью магнитно-линзовой системы (б). Перераспределение рассеянных частиц по углам в магнитно-линзовом квартете (в)

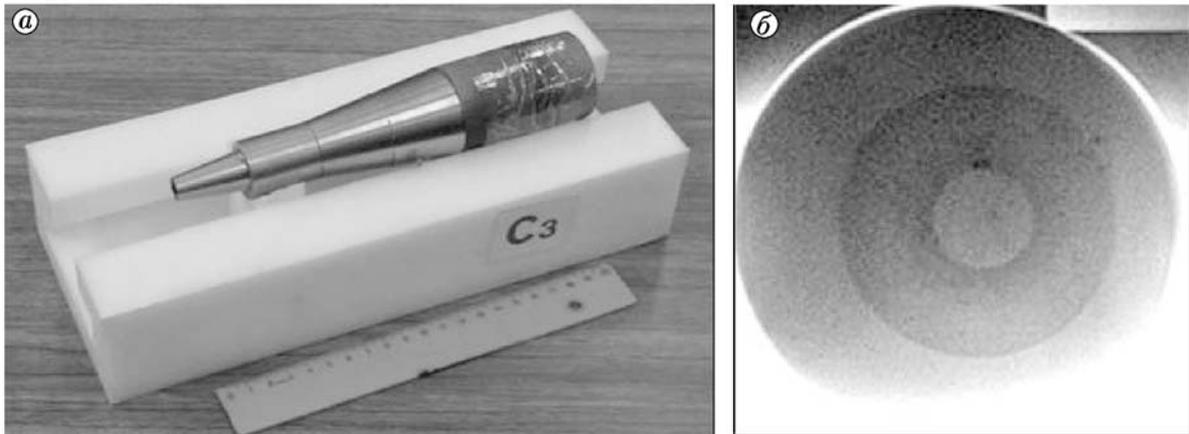


Рис. 3. Оптически плотный модельный тест-объект из сплава ВНЖ с наращиваемой толщиной до 500 г/см^2 (а) и протоннографическое изображение тест-объекта (б)

диографированию с использованием системы магнитооптической фокусировки на ускорительном комплексе У-70 были проведены в 2005 г. Для оценки просвечивающей способности протонного радиографического комплекса использовался тестовый объект из сплава вольфрама, никеля, железа (ВНЖ) с наращиваемой толщиной до 500 г/см^2 . Внешний вид одного из подобных тест-объектов и его протоннографическое изображение, полученное при энергии протонов 60 ГэВ с помощью запоминающих люминесцентных экранов, представлены на рис. 3.

Для объектов с малой массовой толщиной тогда же было продемонстрировано пространственное разрешение по полю регистрации не хуже 100 мкм, а точность определения массовой толщины объекта составила не хуже 100 мкм по вольфраму или 0.2 г/см^2 (рис. 4) при параметрах протонного пучка таких же, как в

предыдущем эксперименте с массивным тест-объектом, что в принципе недостижимо для импульсной рентгенографии в настоящее время.

Протонный радиографический комплекс, созданный на базе синхротрона У-70, обеспечивает регистрацию в одной проекции до 29 кадров с минимальным межкадровым промежутком 167 нс. Диаметр поля регистрации около 60 мм с перспективой увеличения до 250 мм. Длительность следующих друг за другом сгустков протонов (банчей), генерируемых ускорителем, составляет $20 \div 30 \text{ нс}$, что существенно уменьшает влияние динамического размытия изображения при исследовании быстротекущих процессов. В отличие от источников гамма-излучения, в источниках протонов отсутствуют мишени и связанные с ними проблемы.

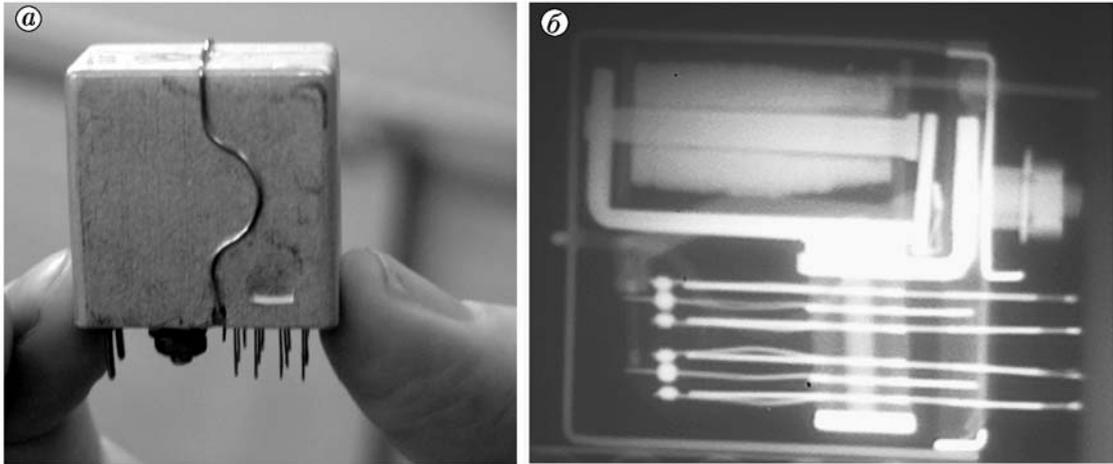


Рис. 4. Электромагнитное реле (а) и его протонографическое изображение (б)

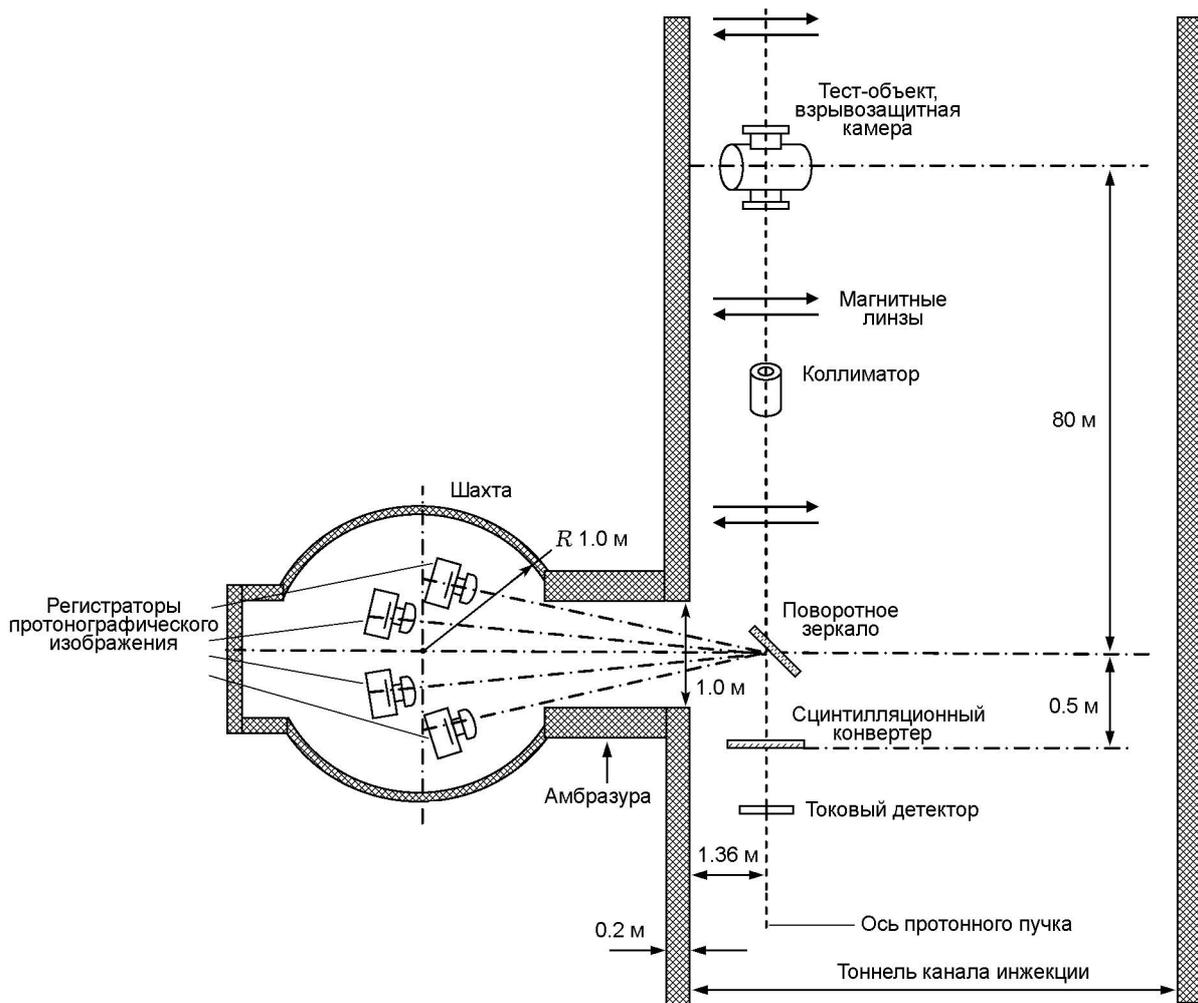


Рис. 5. Схема размещения элементов протонографического комплекса в канале инъекции ускорителя У-70

Схема размещения измерительной аппаратуры в канале инъекции представлена на рис. 5. Протонографическое изображение тест-объекта формируется магнитооптической системой на сцинтилляционном конвертере, расположенном на расстоянии ≈ 80 м от исследуемого объекта. В качестве конвертера системы регистрации использован сцинтиллятор из монокристалла LSO. Напротив сцинтиллятора — в плоскости регистрации протонографических изображений — перпендикулярно тоннелю канала инъекции имеется шахта для размещения регистрирующей аппаратуры. Поворотное зеркало отклоняет изображение с конвертера и передает его на объективы модулей многокадровой электронно-оптической системы регистрации.

Интенсивность пучка протонов контролируется с помощью кремниевого детектора, расположенного в плоскости регистрации на расстоянии ≈ 1 м от ионопровода. Детектор регистрирует фоновое радиационное излучение вторичных частиц и рассеянных протонов, сопровождающих протонный пучок. Импульсы с кремниевых детекторов используются при выборе временных задержек в каналах системы синхронизации работы регистрирующих модулей.

На рис. 6, 7 показана многокадровая система регистрации протонографических изображений на основе двух- и четырехкадровых электронно-оптических модулей, на рис. 8 — взрывозащитная камера в канале инъекции У-70, аттестованная на локализацию продуктов взрыва 2.4 кг взрывчатого вещества (ВВ) в тротиловом эквиваленте (ТЭ) [10, 11].

Ниже мы кратко проиллюстрируем возможности протонографии на примере некоторых экспериментов по исследованию: возбуждения и распространения детонации в конденсированных ВВ; распространения ударных волн в инертных материалах; гидродинамических неустойчивостей в металлах; динамического деформирования и разрушения оболочек и пластин; откольных разрушений; формирования кумулятивных струй и их взаимодействия с преградами; других прикладных задач физики взрыва.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБЖАТИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ШАРОВ СХОДЯЩИМИСЯ СФЕРИЧЕСКИМИ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ

Исследования по обжатию шаров сходящи-



Рис. 6. Внешний вид двухкадровых модулей системы регистрации протонографических изображений



Рис. 7. Внешний вид модуля четырехкадровой электронно-оптической камеры



Рис. 8. Взрывозащитная камера (2.4 кг ТЭ) в канале ускорителя У-70

мися сферическими ударными волнами (УВ) дают информацию о пластических и прочностных свойствах металлов при воздействии на них интенсивных импульсных нагрузок и о происходящих в металле необратимых структурных изменениях. С помощью многокадровой импульсной протонографии впервые получены экспериментальные данные по динамике фокусировки УВ в центре шара и по развитию внутренней полости в нем [12] при отражении УВ из фокуса.

Сходящиеся сферические УВ в шаре создаются с помощью синхронного подрыва размещенного на его поверхности слоя ВВ. При отражении УВ от центра по веществу распространяется расходящаяся сферическая УВ, за фронтом которой движение направлено от центра, что создает условия для формирования полости в центре шара с сохранением его целостности. Фотография разрезанного после опыта шара приведена на рис. 9.

Протонограммы шара — снимки в различные моменты времени после нагружения — представлены на рис. 10. На рис. 10,б зафиксировано движение сходящейся УВ, фронт которой находился на расстоянии $R_{УВ} \approx 9.8$ мм от центра шара. На рис. 10,в показан момент фокусировки УВ в центре шара. На рис. 10,г зарегистрировано зарождение полости в центре шара, на рис. 10,д — эволюция образовавшейся полости.

На рис. 11 приведены результаты обработки протонографических экспериментов по ди-



Рис. 9. Диаметральный разрез шара после взрывного нагружения

намике формирования полости и один из вариантов расчетной зависимости, полученной с привлечением широкодиапазонного уравнения состояния, учитывающего различные фазовые состояния меди и дислокационную модель прочности в твердом состоянии.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ФОРМИРОВАНИЯ КУМУЛЯТИВНОЙ СТРУИ И ДИНАМИКИ ЕЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С РАЗЛИЧНЫМИ ПРЕГРАДАМИ

На рис. 12–14 приведены кадры протонной радиографии процессов формирования медной кумулятивной струи диаметром 2 мм и ее вза-

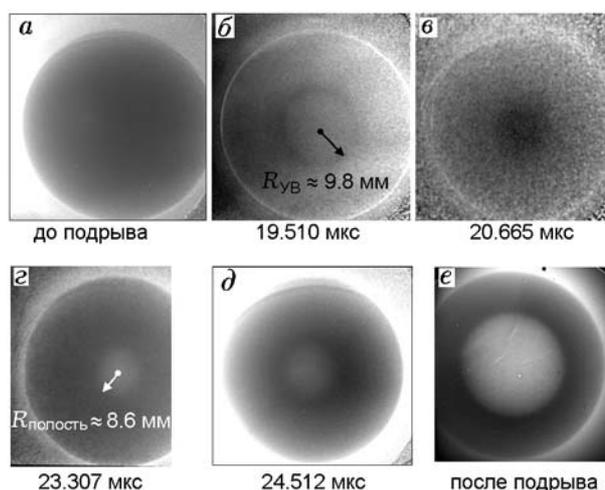


Рис. 10. Протонные изображения медного шара в различные моменты времени

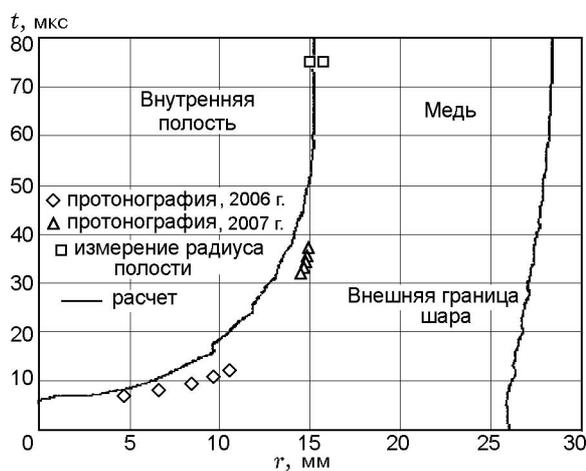


Рис. 11. $r-t$ -Диаграмма процесса образования полости внутри шара

имодействия с различными преградами: стальной пластиной толщиной 4 мм, по нормали к ее поверхности; плоским макетом имитатора динамической защиты, состоящего из двух тонких (по 0.5 мм) стальных пластин со слоем (1.5 мм) пластического ВВ между ними.

Рис. 14 иллюстрирует механизм возмущающего действия динамической защиты на кумулятивную струю, проявляющийся в изме-

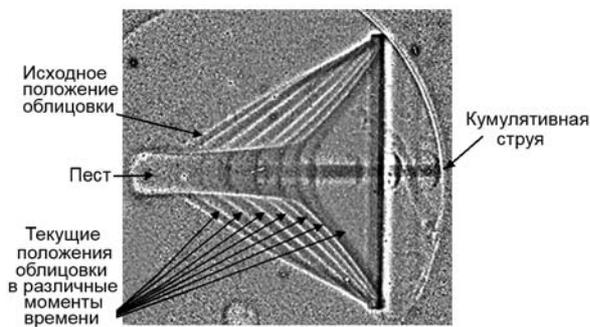


Рис. 12. Формирование кумулятивной струи: съемка в стробоскопическом режиме камерой с открытым затвором, наложение восьми кадров (снимок С. А. Картанова и М. В. Таценко)

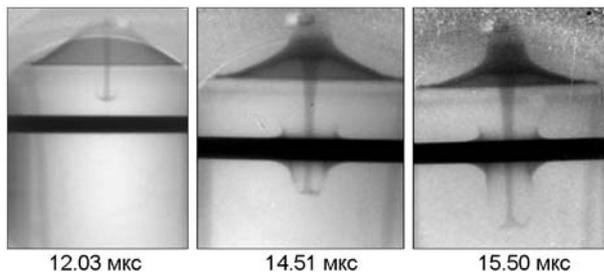


Рис. 13. Пробитие стальной пластины

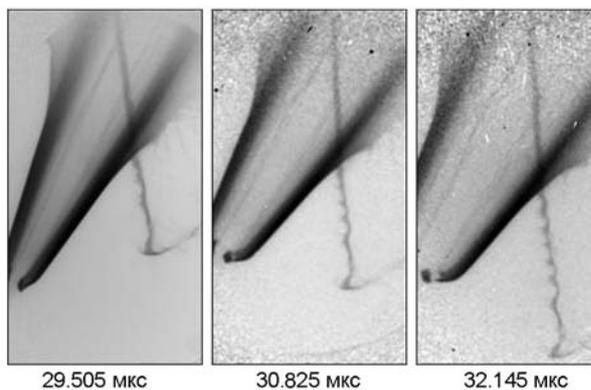


Рис. 14. Взаимодействие струи с макетом динамической защиты

нении направления полета струи и генерации вдоль ее длины квазипериодических возмущений. Эксперимент подтвердил недавно отмеченную в [13] особенность — большее возмущающее влияние тыльной пластины.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ НЕУСТОЙЧИВОСТИ РЭЛЕЯ — ТЕЙЛОРА

Метод возмущений заключается в радиографическом исследовании развития заданных возмущений на нагружаемой (или свободной) поверхности металлического лайнера вследствие проявления неустойчивости Рэля — Тейлора и служит для тестирования моделей динамической прочности материалов в численных расчетах в широком диапазоне скоростей деформирования $\dot{\epsilon} = 10^6 \div 10^9 \text{ с}^{-1}$ [14–16].

До применения многокадровой протонной радиографии во ВНИИЭФ методом импульсной рентгенографии регистрировали один или два кадра формы лайнера в одном опыте. Два кадра получали с помощью регистрации двух последовательных гамма-импульсов на один и тот же чувствительный элемент (рентгенопленку или фотохромные экраны). Изучение динамики развития возмущений путем их регистрации, например, на десять и более моментов времени требовало проведения, как минимум, пяти опытов с учетом соответствующих погрешностей, связанных с допусковыми отклонениями при изготовлении каждого макета.

Исследование развития неустойчивости Рэля — Тейлора в меди проводилось при квазиизотропическом режиме нагружения при давлениях $p_{\text{max}} \approx 38$ и ≈ 55 ГПа. На нагружаемую поверхность лайнера наносились периодические протяженные возмущения треугольной формы (рис. 15). Лайнер имел две зоны возмущений. Период возмущений (длина волны) составлял $\lambda = 2$ мм, фактические амплитуды $A_1^0 = 0.07^{+0.005}$ мм, $A_2^0 = 0.11^{+0.005}$ мм при нагружении до $p_{\text{max}} \approx 38$ ГПа и $A_1^0 = 0.04^{+0.005}$ мм, $A_2^0 = 0.07^{+0.005}$ мм при нагружении до $p_{\text{max}} \approx 55$ ГПа.

На рис. 16 приведены протонографические изображения при нагружении до $p_{\text{max}} \approx 38$ и ≈ 55 ГПа в различные моменты времени радиографирования. На рис. 17 представлены зависимости амплитуды возмущений для двух зон от пройденного пути при нагружениях $p_{\text{max}} \approx 38$ и ≈ 55 ГПа.

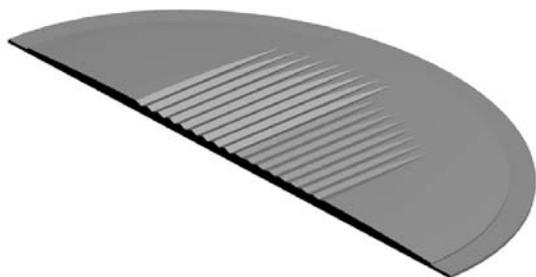


Рис. 15. Изображение лайнера перед опытом

Ценность полученных экспериментальных результатов состоит в получении большого количества протонных изображений в эксперименте, что позволяет откалибровать модель прочности материала с существенным уменьшением экспериментальных погрешностей и повышением ее точности.

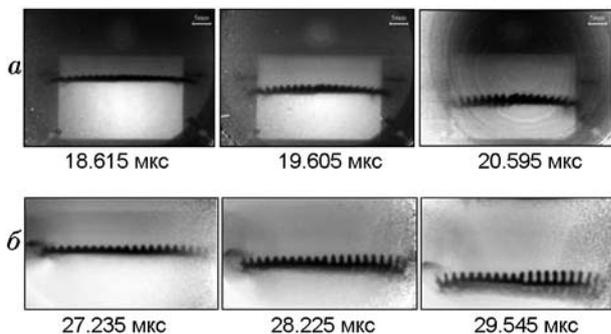
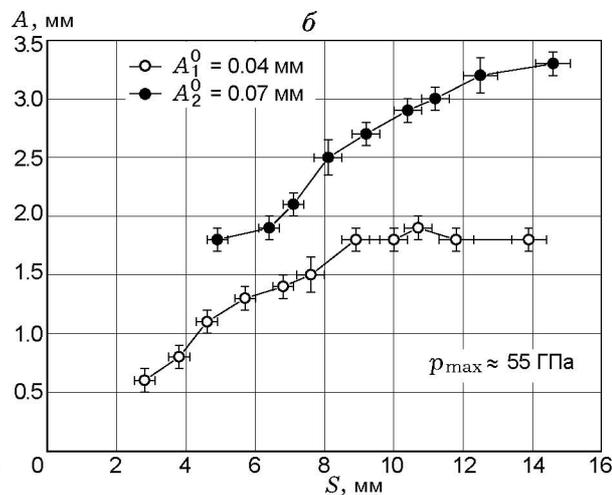
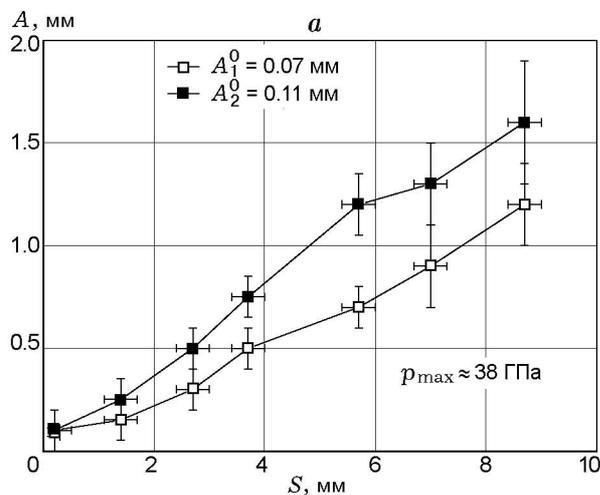
Рис. 16. Динамические изображения при нагружении до $p_{\max} \approx 38$ ГПа (а) и ≈ 55 ГПа (б)

Рис. 17. Зависимости амплитуды возмущений от пройденного пути

РАЗВИТИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ ПРИ СХОЖДЕНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ

В качестве еще одного примера, демонстрирующего возможности протоннографической регистрации, приведем результаты одного из опытов с цилиндрическим макетом по исследованию развития детерминированных возмущений на внутренней границе медной оболочки при ее торможении на пористом веществе (пенопласте).

Основным элементом экспериментального макета является цилиндрическая оболочка, сходящаяся к центру под действием взрыва нагружающего заряда ВВ. В процессе схождения на внутренней поверхности оболочки формируются возмущения, обусловленные столкновением детонационных волн между восьмью линиями инициирования ВВ на образующей макета, расположенными равномерно по азимуту. Внутри оболочки находится цилиндр из пенопласта плотностью $\rho_0 = 0.09$ г/см³.

На рис. 18 показаны кадры протоннографической регистрации развития возмущений на внутренней границе медной оболочки и движения фронта УВ в пенопласте. Видно формирование и развитие возмущений в местах столкновения детонационных волн как в медной оболочке, так и в пенопласте. Участки фронта УВ в пенопласте напротив зон образования возмущений на оболочке первоначально уходят в опережение (рис. 18, а, б). В момент времени ≈ 21.065 мкс происходит трансформация про-

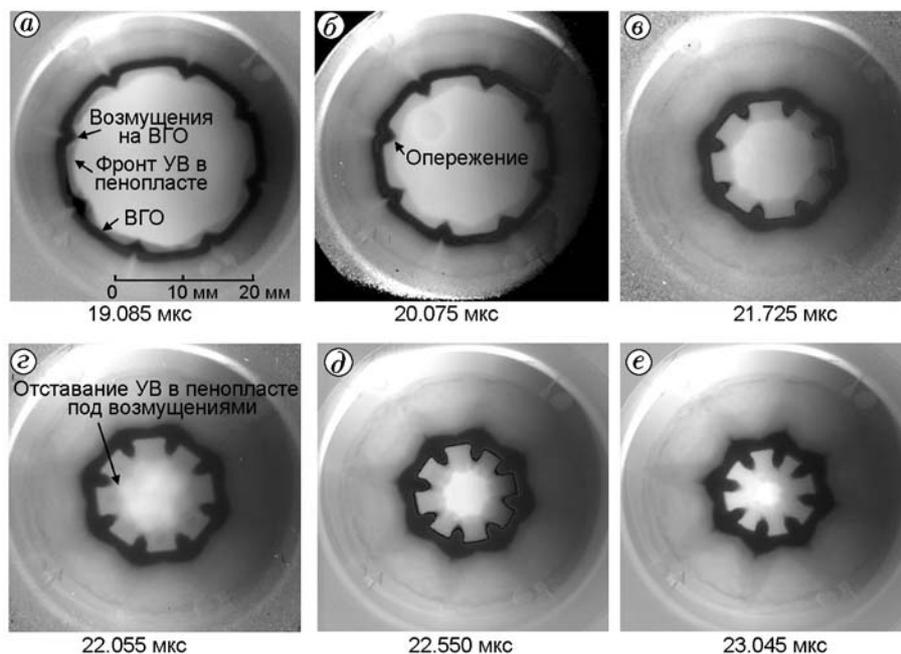


Рис. 18. Кадры развития возмущений на внутренней границе медной оболочки (ВГО)

филя УВ в пенопласте: наблюдается отставание участков фронта УВ вблизи возмущений (рис. 18, в–д).

ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЕТАНАЦИИ В КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВВ

Достоинства импульсной многокадровой протонной радиографии в полной мере проявляются и в исследованиях ударно-волновых и детонационных процессов в конденсированных ВВ.

На рис. 19 представлена схема одного из экспериментальных устройств, состоящего из пластифицированного ТАТБ и двух разнесенных инициаторов из пластифицированного октогена, различающихся массой (шириной). На рис. 20 приведен пример многокадровой протоннографической регистрации процесса возбуждения и развития детонации в ТАТБ в направлении распространения иницирующей волны, показано формирование боковых «темных» зон нереагирующего ВВ, сжатого расходящейся ударной волной. Обработкой протонограмм удается восстанавливать динамическую картину распределения плотности ВВ и продуктов взрыва за фронтами ударных и детонационных волн по полярным координатам.

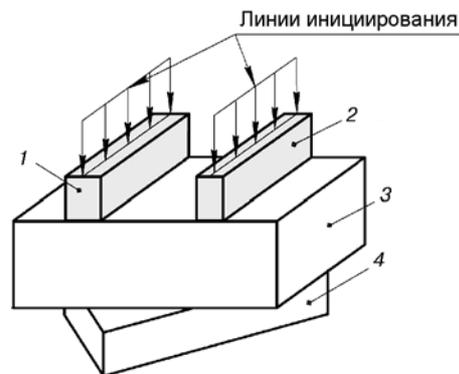


Рис. 19. Схема экспериментального устройства:

1 — инициатор № 1 сечением 8 × 10 мм, 2 — инициатор № 2 сечением 6 × 10 мм, 3 — образец из ТАТБ, 4 — «оптический» клин

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ДВИЖЕНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ПРИ ВНУТРЕННЕМ И НАРУЖНОМ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИЯХ

Методом многокадровой протонной радиографии исследовались процессы фрагментации (разрушения) полусферических металлических оболочек, нагружаемых взрывом заряда ВВ,

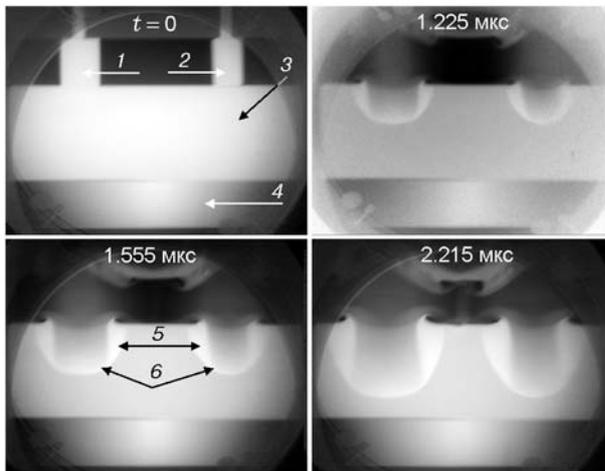


Рис. 20. Возбуждение и развитие детонации в ТАТБ:

1 — инициатор № 1, 2 — инициатор № 2, 3 — образец, 4 — «оптический» клин, 5 — «темные зоны», 6 — фронт детонационной волны

прилегающего к их внутренней стороне. Общая схема и фотография сборки показаны на рис. 21. Заряд ВВ инициировался в центральной точке плоскости со стороны торца полушеры. Приведенные на рис. 22 характерные кадры протонографических изображений фрагментации тонких оболочек из стали толщиной 0.4 мм (а) и алюминия толщиной 1.1 мм (б) соответствуют времени полного разделения на

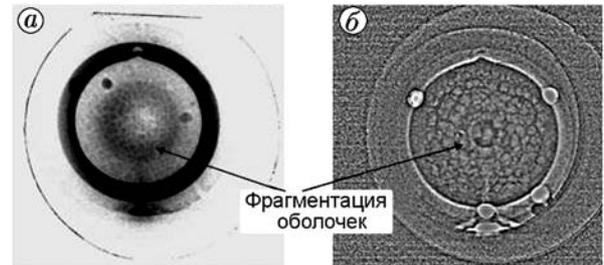


Рис. 22. Протонографические изображения оболочки из стали Ст. 20 (а) и оболочки из сплава АМг-6 (б) после фрагментации

отдельные фрагменты стенок оболочек.

На рис. 23 приведен еще один пример, демонстрирующий уникальные возможности и широкий динамический диапазон протонной радиографии на базе существующего ускорителя, — импlosionное обжатие тонких оболочек при одноточечной детонации наружного заряда ВВ с формированием кумулятивных струйных течений по направлению инициирования ВВ. Взаимодействие сформированной кумулятивной струи с противоположными направлению инициирования стенками оболочек иллюстрирует рис. 24. Кадр получен в стробоскопическом режиме съемки камерой с открытым затвором. На нем видна достаточно тонкая структура возмущений, развивающихся в

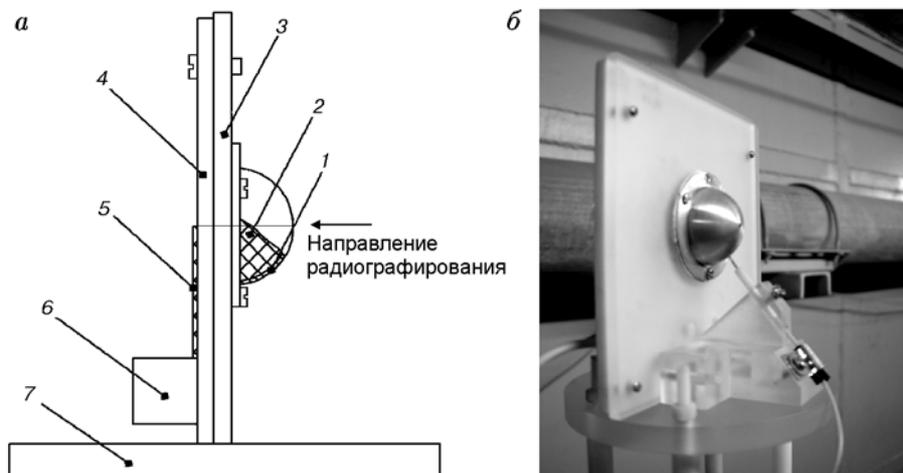


Рис. 21. Схема (а) и фотография (б) экспериментальной сборки с оболочкой из алюминиевого сплава АМг-6:

1 — полусферическая оболочка (из стали толщиной 0.4 мм или из сплава АМг-6 толщиной 1.1 мм); 2 — полусферический заряд ВВ радиусом 16.3 мм и массой 14.5 г; 3, 4 — диски из оргстекла и пенопласта; 5 — «мостик» из ВВ для передачи детонации от электродетонатора (б) к заряду; 7 — основание

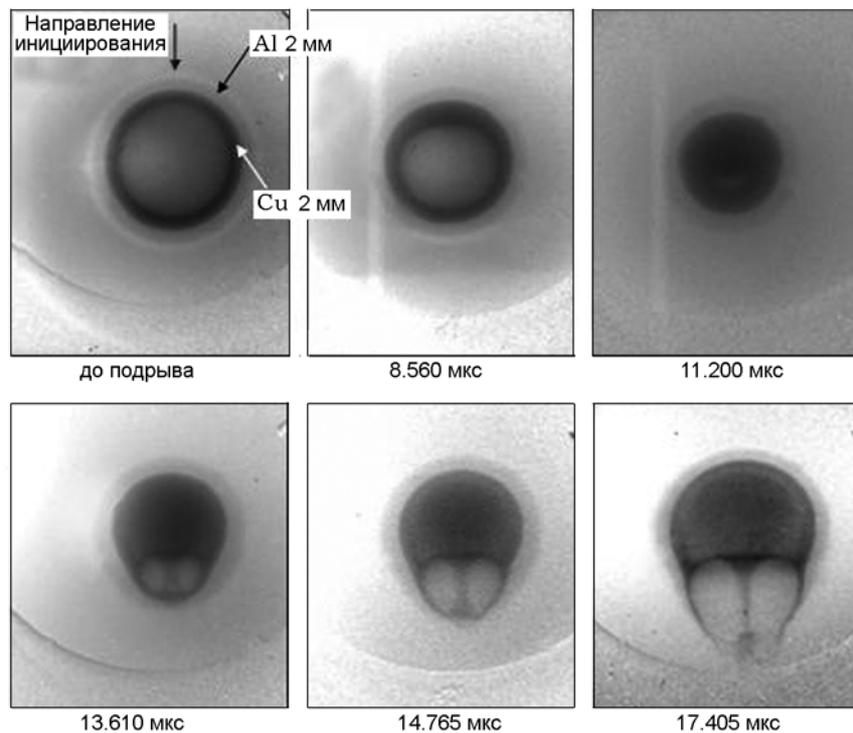


Рис. 23. Импульсивное обжатие тонких оболочек при одноточечной детонации наружного заряда



Рис. 24. Взаимодействие сформировавшейся кумулятивной струи с противоположными направлениями инициирования стенками оболочек: съемка проводилась в стробоскопическом режиме камерой с открытым затвором, выполнена С. А. Картановым и М. В. Таценко

различные моменты времени в процессе взаимодействия стенок оболочек и струи.

В настоящей работе обсуждается лишь

несколько примеров использования многокадровой протонной радиографии. Созданный в РФЯЦ-ВНИИЭФ и ИФВЭ протонный радиографический комплекс на базе ускорителя У-70, является уникальным инструментом для изучения быстропротекающих процессов. Метод протонной радиографии открывает перед российскими исследователями новые возможности: высокое пространственное разрешение, многокадровая регистрация, практически неограниченная толщина исследуемых объектов, огромный динамический диапазон регистрации.

Внедрение метода протонной радиографии в практику физических исследований стало возможным благодаря работе большого коллектива сотрудников Института физики высоких энергий и сотрудников Российского федерального ядерного центра, ВНИИЭФ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Физика** быстропротекающих процессов / под ред. Н. А. Златина. — М.: Мир, 1971. — Т. 1.
2. **Антипов Ю. М., Афонин А. Г., Василевский А. В. и др.** Протонная радиографическая установка на 70 ГэВ ускорителе ГНЦ ИФВЭ. — Протвино, 2009. — (Препр. ИФВЭ).

3. Антипов Ю. М., Афонин А. Г., Василевский А. В., Трутнев Ю. А., Бурцев В. В., Волков А. А. и др. Радиографическая установка ускорителя протонов с энергией 70 ГэВ ГНЦ ИФВЭ // Приборы и техника эксперимента. — 2010. — № 3. — С. 5–12.
4. Morris Ch., Hopson J. W., Goldstone Ph. Proton Radiography // Los Alamos Science. — 2006. — № 30. — P. 32–45.
5. Addendum to the written statement submitted to the Strategic forces subcommittee of the Senate armed services committee, Los Alamos, April 10, 2002.
6. The advanced hydrotest facility overview, Arch Thiessen, presentation for Snowmass meeting, July 11, 2001. — LA-UR 01-3742.
7. Wilson R. R. Radiological use of fast photons // Radiology. — 1946. — V. 47. — P. 487.
8. Pat. US 2953510. Neutronic reactor / Anderson H. L. Publ. 20.09.1960. Patent Office, Patent Gazette 758, 673.
9. Gavron A., Morris C. L., Ziock H. J., Zumbro J. D. Proton radiography. — Los Alamos National Laboratory document LA-UR-96-420. — 1996.
10. Пат. РФ 2367899 С1. Локализирующее устройство для радиографических исследований взрывных процессов / Сырунин М. А., Вишневецкий Е. Д., Михайлов А. Л. и др. — Оpubл. 20.09.2009. Бюл. № 26.
11. Пат. РФ 2404407 С1. Взрывозащитная камера / Сырунин М. А., Вишневецкий Е. Д., Федоренко А. Г., Чернов В. А. — Оpubл. 20.11.2010. Бюл. № 32.
12. Шиберин И. В., Батьков Ю. В., Бурцев В. В., Михайлов А. Л., Панов К. Н., Сырунин М. А., Руднев А. В., Ткаченко И. А. и др. Исследование развития полости в медном шаре при квазисферическом взрывном нагружении // Тр. междунар. конф. «XI Харитоновские тематические научные чтения». — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2009. — С. 304–309.
13. Held M. Defeating mechanisms of reactive armour sandwiches // Proc. of 22 Intern. Ballistics Symposium. — Vancouver, Canada, 2005.
14. Lebedev A. I., Nizovtsev P. N., Rayevsky V. A. Rayleigh — Taylor instability in solids // 4th Intern. workshop on the physics of compressible turbulent mixing. Cambridge, England, 29 March–1 April 1993. — P. 81–93.
15. Lebedev A. I., Nizovtsev P. N., Rayevsky V. A., Soloviev V. P. Rayleigh — Taylor instability in strong media. Experimental study // 5th Intern. workshop on the physics of compressible turbulent mixing. New York, USA, 18–21 July 1995. — P. 231–236.
16. Aprelkov O. N., Igonin V. V., Lebedev A. I., Nizovtsev P. N., Raevsky V. A., et al. Perturbation method for study of shear strength of materials at pressures up to ~ 300 GPa // Shock Compression of Condensed Matter — 2005 / M. D. Furnish, M. Elert, T. P. Russell, C. T. White (Eds). — Melville, New York: American Inst. of Physics, 2006. — P. 745–748.

Поступила в редакцию 22/III 2011 г.