### ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

#### ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2009–14 ОУ-У70

Ю.М. Антипов, А.Г. Афонин, А.В. Василевский, И.А. Гусев, В.И. Демянчук, О.В. Зятьков, Н.А. Игнашин, Ю.Г. Каршев, А.В. Ларионов, А.В. Максимов, А.А. Матюшин, А.В. Минченко, М.С. Михеев, В.А. Миргородский, В.Н. Пелешко, В.Д. Рудько, В.И. Терехов, Н.Е. Тюрин, Ю.С. Федотов (ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий)

Ю.А. Трутнев, В.В. Бурцев, А.А. Волков, И.А. Иванин, С.А. Картанов, Ю.П. Куропаткин, А.Л. Михайлов, К.Л. Михайлюков, О.В. Орешков, А.В. Руднев, Г.М. Спиров, М.А. Сырунин, М.В. Таценко, И.А. Ткаченко, И.В. Храмов (РФЯЦ-ВНИИЭФ)

# ПРОТОННАЯ РАДИОГРАФИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА НА 70 ГэВ УСКОРИТЕЛЕ ГНЦ ИФВЭ

Направлено в ПТЭ

Протвино 2009

УДК 539.1.074

#### Аннотация

Антипов Ю.М., Афонин А.Г., Василевский А.В. и др. Протонная радиографическая установка на 70 ГэВ ускорителе ГНЦ ИФВЭ: Препринт ИФВЭ 2009—14. — Протвино, 2009. — 15 с., 14 рис., библиогр.: 6.

Описывается протонная радиографическая установка на 70 ГэВ ускорителе ГНЦ ИФВЭ. Установка сооружена с использованием имеющейся инфраструктуры в начальной прямолинейной части канала инжекции (КИ). Линзы КИ предназначены только для транспортировки протонного пучка из У-70 в УНК и имеют диаметр 100 мм. Поэтому установка рассчитана на энергию 50 ГэВ с полем обзора 60 мм. Для вывода пучка используется имеющаяся система быстрого вывода. Установка позволяет получать при наличии некоторых потерь в канале изображение объектов с оптической толщиной свыше 300 г/см². Оптическое разрешение установки составляет 0.25 мм.

В период 2004—2008 гг. на установке проведен ряд экспериментов с многокадровой регистрацией быстропротекающих процессов. При проведении динамических экспериментов использовались малогабаритные взрывозащитные камеры нескольких типов, локализующие энерговыделение до ~2,5 кг ТЭ, а также измерительная система мониторинга состояния камеры и окружающей среды.

#### **Abstract**

Antipov Yu.M., Afonin A.G., Vasilevsky A.V. et al. The Proton-Radiographic Facility Based on IHEP 70 GeV Proton Synchrotron: IHEP Preprint 2009–9. – Protvino, 2009. – 15 p., figs. 14, , ref.: 6.

Proton-radiographic facility based on IHEP 70 GeV proton synchrotron is described. It's created on the basis of existing infrastructure – initial part of injection channel (IC). The quadrupoles lenses (100 mm aperture) are used for proton beam focusing. This experimental facility designed for proton beam energy 50 GeV and has field of view  $\sim$ 60 mm. The existing U70 extraction system is used. The facility allows to obtain optical resolution less than 0.3 mm for objects with an optical thickness  $\sim$ 300 g/cm<sup>2</sup>.

In 2004–2008 years the experiments with multiframe registration of fast processes were fulfilled. Several types of compact explosion protect chambers were used. This chambers are possible to localize energy allocation up to  $\sim$ 2.5 kg TE. The condition chambers and environmental monitoring also take place.

#### Введение

В течение более чем полувека импульсная рентгеновская радиография являлась основным инструментом для исследования быстропротекающих процессов. Рентгенография обладает рядом преимуществ, таких как простота метода и относительная дешевизна установок, основным элементом которых является ускоритель электронов. В основном этими достоинствами и обусловлено широкое распространение рентгенографии.

Многие из проблем, присущих импульсной рентгенографии, отсутствуют в протонной радиографии. Средняя длина пробега высокоэнергичных протонов составляет примерно  $185 \, \text{г/см}^2$ . При оптической толщине порядка  $300 \, \text{г/см}^2$  сквозь объект проходит около 20% протонов (против  $10^{-6}$  для гамма-квантов). Поэтому для формирования радиографического изображения необходимо в миллионы раз меньше протонов, чем гамма-квантов.

В отличие от источников гамма-излучения в источниках протонов отсутствуют мишени и связанные с ними проблемы. Наличие заряда у протонов позволяет управлять направленными потоками излучения для получения многокадровой и многолучевой съемки на базе единственного ускорителя. Использование двух наборов детекторов дает уникальную возможность определять вещества Z или A в каждой точке исследуемого объекта. При этом можно определить даже массовые концентрации веществ.

Главным условием для осуществления протонной радиографии является наличие высокоэнергичных протонов с энергией 50–70 ГэВ. Причем такие высокие энергии требуются не столько для обеспечения глубины просвечивания оптически толстого объекта, сколько для получения высокой чёткости изображения, так как с увеличением энергии протонов уменьшается размытие изображения за счёт хроматических аберраций и многократного кулоновского рассеяния. Использование специальной магнитной оптики позволяет существенно уменьшить влияние кулоновского рассеяния и получить оптическое разрешение менее 1 мм для объектов с оптической толщиной более 300 г/см<sup>2</sup>.

Наличие в ГНЦ ИФВЭ ускорителя протонов с энергией 70 ГэВ (У-70) и развитой системы вывода пучка позволяет использовать его для исследования методом протонной радиографии объектов практически любой, представляющей интерес, толщины.

В 2004-2008 годах в ГНЦ ИФВЭ усилиями сотрудничества двух научных центров ИФВЭ и ВНИИЭФ эта задача была практически реализована. В пучках протонов от У-70 были выполнены статические и динамические эксперименты с использованием тест-объектов различной сложности и экспериментально доказаны преимущества метода протонной радиографии.

В настоящей статье рассматриваются решения в части оптики и оборудования, обеспечившие этот результат.

# 1. Характеристики протонного синхротрона ИФВЭ

Ускорительный комплекс ГНЦ ИФВЭ У-70 [1] включает в себя линейный ускоритель с ВЧК-фокусировкой УРАЛ-30 на энергию 30 МэВ, быстроциклирующий бустер на энергию 1,5 ГэВ и протонный синхротрон на энергию 70 ГэВ. Максимальная интенсивность 70 ГэВ протонного пучка составляет  $\sim 1.7 \cdot 10^{13}$  частиц в импульсе. Полная длительность магнитного цикла при ускорении до 70 ГэВ составляет около 10 с при длительности плато магнитного поля при максимальной энергии 2 с. Кратность ВЧ-ускоряющего поля равна 30. Из бустера на орбиту У-70 может инжектироваться от 3 до 29 сгустков (банчей) протонов. Минимальная интенсивность в банче для устойчивой работы системы обратной связи составляет  $3 \cdot 10^{11}$  частиц. Система быстрого вывода [2] может выводить от одного до 29 банчей один раз в цикл.

Таким образом, минимальная интенсивность в импульсе вывода составляет  $3\cdot10^{11}$  протонов, максимальная — до  $1,5\cdot10^{13}$  протонов. Эмиттанс ускоренного пучка при максимальной интенсивности равен 2 мм·мрад, при меньшей интенсивности он может составлять около 1 мм·мрад. В канал инжекции может осуществляться быстрый вывод длительностью от 5 мкс — выводятся все банчи, и до 40 нс — выводится один банч. Длительность банча при большой интенсивности составляет 20–30 нс (95%). Специальной ВЧ-гимнастикой она может быть укорочена до 5 нс.

# 2. Расположение экспериментальной установки

Основой протонографической установки, созданной на базе имеющейся инфраструктуры — канала инжекции (КИ) [3], — является оптическая система, состоящая из четырёх квадрупольных линз (квартет) и имеющая матрицу передачи  $-\hat{1}$  для горизонтальной и вертикальной плоскостей поперечного движения [4]. Сооружение одного магнитооптического квартета с матрицей  $-\hat{1}$  возможно на прямолинейной начальной части КИ (см. рис. 1).

В качестве линз квартета использовались квадруполи канала инжекции с диаметром 100 мм, длиной 1 м, с максимальным градиентом магнитного поля 1,3 к $\Gamma$ с/см.

Сила квадруполя для пучка с энергией 70 ГэВ равна

$$K \Pi_{(70)} = \frac{G \pi \cdot I \pi}{B_0 R_0} = \frac{1.3^{\kappa \Gamma C} / c_M}{12 \kappa \Gamma c \cdot 194.125 M} = 5.58 \cdot 10^{-2} \text{ 1/ M},$$

а для пучка с энергией 50 ГэВ -

$$K\pi_{(50)} = \frac{G\pi \cdot I\pi}{B_0 R_0} = \frac{1.3^{\kappa \Gamma c} c / 100cm}{8.59 \kappa \Gamma c \cdot 194.125 m} = 7.79 \cdot 10^{-2} \text{ 1/ m}.$$

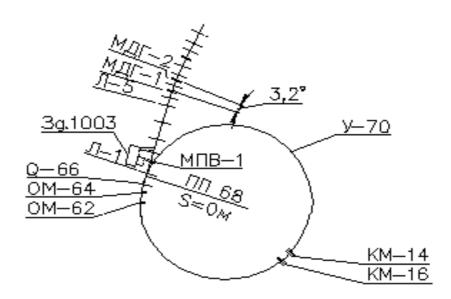


Рис. 1. Схема кольца ускорителя У-70 и начальной части КИ.

В приближении тонкой линзы длины квартетов для двух энергий соответственно равны

$$L_{(70)} = \frac{4\sqrt{2}}{K\eta_{(70)}} = 101.4$$
 M  $L_{(50)} = \frac{4\sqrt{2}}{K\eta_{(50)}} = 72.6$  M .

Длина прямолинейной части КИ от прямолинейного промежутка 68 (ПП68) до поворотного магнита МДГ-1 равна  $\sim$ 210 м, длина формирующего участка равна  $\sim$ 110 м, и в прямолинейной части КИ был размещён квартет квадруполей только для энергии 50 ГэВ (см. рис. 2).

Оптическая схема установки выглядит следующим образом: линзы Q2f и Q3d заменяют линзы Л-3 и Л-4 на участке формирования протонного пучка на объект, линзы Q4f–Q4d–Q4f–Q4d образуют квартет с матрицей передачи  $=\hat{1}$  для двух плоскостей движения.

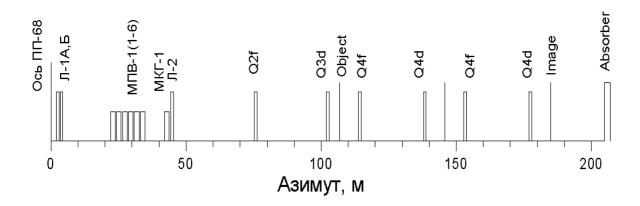


Рис. 2. Оптическая схема облучательной установки.

# 3. Вывод протонного пучка на установку

Вывод ускоренного протонного пучка в КИ производится системой быстрого вывода, первым элементом которой является быстрый магнит-толкатель (КМ-16). Пучок, получивший отклонение в КМ-16, забрасывается в выводные магниты ОМ-62 и ОМ-64 (см. рис. 1). Предварительное смещение пучка в направлении выводных магнитов осуществляется локальным искажением замкнутой орбиты (бампом, траектория 1, рис.3). С помощью этих магнитов пучок выводится за пределы вакуумной камеры ускорителя в 66-м прямолинейном промежутке (ПП66, траектория 2, рис 3). В этом промежутке находятся: линза предварительной фокусировки Q-66; магнит-корректор вертикальной плоскости движения МКВ-66; магнит-корректор радиальной плоскости движения МКГ-66; датчик положения пучка в радиальной плоскости движения ДП-66; профилометр, измеряющий профили поперечного сечения выведенного пучка в радиальной и вертикальной плоскостях П-66; измеритель интенсивности выведенного пучка ДИ-66 (см. рис. 4).

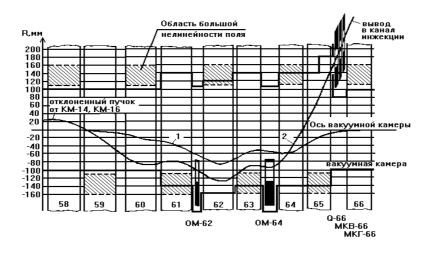


Рис. 3. Схема вывода протонного пучка в канал инжекции.

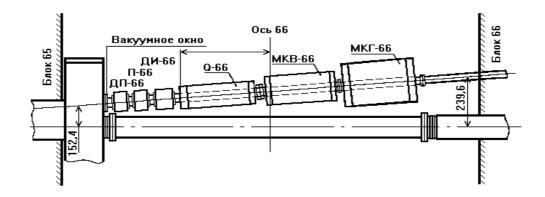


Рис. 4. Расположение оборудования вывода в ПП66.

## 4. Облучение объекта и формирование его изображения

В точке фокуса матрица дублета, определяющая структурные функции квартета, равна

$$M_{\partial y\delta} = \begin{pmatrix} \alpha_0 & \beta_0 \\ -\gamma_0 & -\alpha_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1.82177 & 31.66147 \\ -0.13641 & 1.82177 \end{pmatrix}$$

где  $\ \alpha_0$  ,  $\ \beta_0$  ,  $\ \gamma_0$  — параметры Твиса.

Наклон эллипса – аксептанса квартета – равен  $W = \frac{\alpha_0}{\beta_0} = 0.057539$ 

Эмиттанс облучающего пучка равен  $\varepsilon_{r,z} = 2 \cdot 10^{-6} \, \text{м} \cdot \text{рад}$ . Радиус облучающего пучка (см. ниже рис. 5) выбираем равным  $A_{r,z} = 30 \, \text{MM}$ . Тогда для пучка имеем

$$\beta_{r,z_{nyq}} = \frac{A_{r,z}^2}{\varepsilon_{r,z}} = 450 \text{M}, \qquad \alpha_{r,z_{nyq}} = \mp \beta_{r,z_{nyq}} W = \mp 25.892559$$

Именно такие величины надо получить с выведенным пучком на объекте.

Допустимое увеличение пучка, проходящего без потерь через квартет линз, определяется его аксептансом. Величина рассеяния облучающего пучка зависит от радиационной длины вещества объекта и его толщины. Максимальный поперечный размер объекта, наблюдаемый в изображении без потерь пучка, называется полем обзора. Для получения максимальной величины поля обзора эмиттанс облучающего пучка необходимо на входе в квартет согласовать с его аксептансом. Согласование достигается получением наклона фазового эллипса облучающего пучка равным наклону аксептанса квартета

$$W_0 = -\frac{\alpha_0}{\beta_0} = \frac{X_m'}{X_{\text{MAKC}}},$$

где угол  $\mathcal{X}_m'$  соответствует частице, имеющей максимальное отклонение  $\mathcal{X}_{\mathit{макс}}$  .

Используя матрицы участков от начала квартета до фокусирующих линз, получаем выражения для двух прямых, ограничивающих поле обзора (см. рис. 5),

$$X_{n.o.} = 0.68R_{\text{KMM}} - \frac{0.48}{k_n}\Theta_{pac}$$

II 
$$X_{n.o.} = 3R_{\text{KBM}} - \frac{10.22}{k_n} \Theta_{\text{pac}}$$
.

Характерной точкой в картине зависимости поля обзора от угла рассеяния является точка пересечения этих прямых, имеющая координаты

$$X^* = 0.56R_{\text{kan}}, \quad \Theta^* = 0.24R_{\text{kan}}k_{\pi}$$

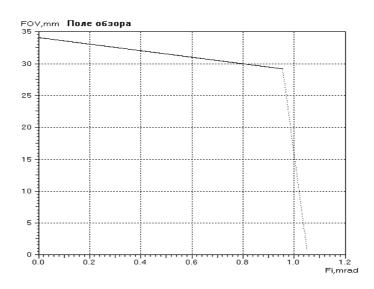


Рис. 5. Поле обзора квартета при энергии пучка 50 ГэВ.

Рис. 5 показывает, что диаметр изучаемого тест-объекта для получения качественного изображения на такой установке не может превышать 60 мм. Предполагаем распределение рассеянного в веществе тест-объекта протонного пучка гауссовским со среднеквадратичным углом рассеяния

$$\sigma_{pac} = \frac{13.6}{p\beta} \sqrt{\frac{L}{L_R}}$$

где p — импульс протона в МэВ/с; L — толщина облучаемого объекта;  $L_R$  — радиационная длина вещества объекта. Тогда для 95% содержания пучка в угле  $\Theta_{pac} = 2\sigma_{pac}$  получим длину объекта из свинца, при облучении которого не происходит потерь пучка на стенках вакуумной камеры,  $\cong 20$  мм. Допуская некоторые потери протонного пучка, можно получить качественное изображение объекта длиной до 350 мм.

# 5. Экспериментальный канал

На фото (рис. 6) показаны КИ и место размещения облучательной установки. Видна защита для уменьшения радиационного фона при получении изображения объекта.

В фокусе квартета находится устройство для автоматической смены коллиматоров. Оно (рис. 7) представляет собой барабан диаметром 500 мм, в котором имеются восемь позиций для размещения коллиматоров различных типов и диаметров, а также прецизионного измерителя положения центра тяжести протонного пучка. Это устройство позволяет быстро, без нарушения вакуума в канале, установить нужный коллиматор.

Для управления установкой создан «дружественный» интерфейс, позволяющий включать и выключать установку, устанавливать нужные токи в магнитооптических элементах канала, измерять токи в отдельных элементах и вакуумных насосах, наблюдать за показаниями приборов диагностики пучка.



Рис. 6. Облучательная установка в канале инжекции.

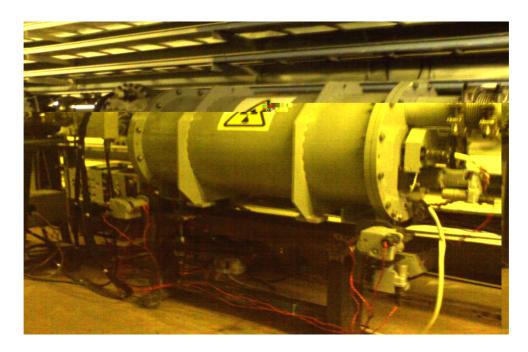


Рис. 7. Устройство для автоматической смены коллиматоров.

В период 2004–2008 гг. в ходе радиографических исследований коллективом специалистов ГНЦ ИФВЭ и РФЯЦ-ВНИИЭФ впервые в России на базе канала инжекции УНК протонного синхротрона У-70 создан экспериментальный протонографический комплекс и на нем проведена многокадровая регистрация быстропротекающих процессов.

Регистрация протонографических изображений проводилась с помощью модульной многокадровой электронно-оптической системы регистрации на основе ПЗС-матриц, которая позволяет в настоящее время получать до 29 независимых кадров с размером поля изображения до  $\emptyset \sim 60$  мм и временным интервалом радиографирования до  $\sim 5$  мкс (с минимальным временем между кадрами 165 нс и временем экспозиции 10–30 нс) с перспективами увеличения общего времени радиографирования и числа кадров (рис. 8).

При проведении динамических экспериментов в канале инжекции ускорительного комплекса использовались малогабаритные взрывозащитные камеры нескольких типов, локализующие энерговыделение до  $\sim$ 2,5 кг ТЭ, а также измерительная система мониторинга состояния камеры и окружающей среды (рис. 9).

На рис. 10–14 приведены примеры протонографических многокадровых изображений динамических процессов соответственно: формирование кумулятивной струи диаметром ~2 мм (рис. 10); воздействие кумулятивной струи на стальную пластину (рис. 11) и слоеную преграду из двух стальных пластин, между которыми расположен слой из взрывчатого материала (рис. 12); развитие неустойчивости Рэлея-Тейлора при нагружении медного лайнера с заданными начальными возмущениями давлением до ≈55 ГПа (рис. 13) [5]; взаимодействие дето-

национной и ударной волн, распространяющихся в образце из взрывчатого материала (рис. 14) [6]. Отсчет времени на кадрах протонографических снимков ведется от момента инициации.

### Заключение

В ГНЦ ИФВЭ на ускорительном комплексе протонов У-70 с использованием имеющейся инфраструктуры создана уникальная протонная радиографическая облучательная установка, позволяющая при энергии 50 ГэВ получать изображение диаметром 60 мм объектов с оптической (массовой) толщиной свыше  $300 \, \text{г/см}^2$ . Оптическое разрешение установки составляет 0,25 мм. Рассматриваются варианты совершенствования параметров протонного пучка и установки.





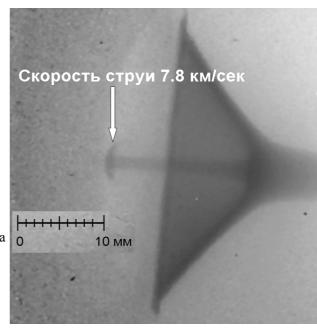


Рис. 8. Система многокадровой регистрации.

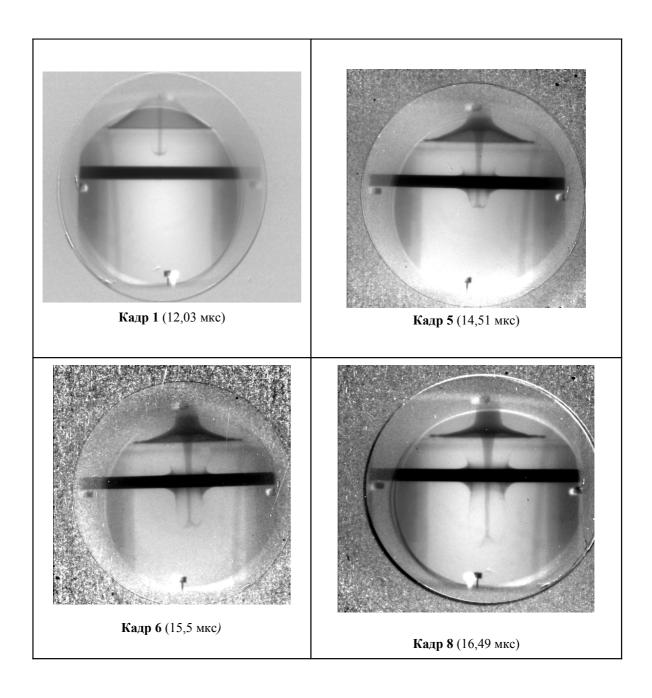




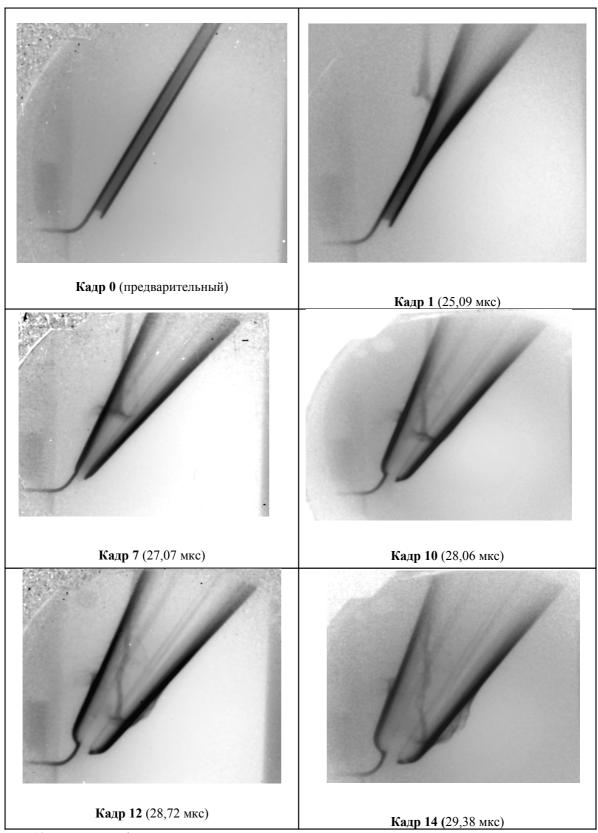
**Рис. 9.** Взрывозащитные камеры в канале инжекции ускорителя У-70.



**Рис. 10.** Протонографический снимок процесса формирования кумулятивной струи.



**Рис. 11.** Протонографические снимки процесса воздействия кумулятивной струи на тонкую пластину.



**Рис. 12.** Протонографические снимки процесса взаимодействия кумулятивной струи со слоеной преградой из двух стальных пластин, разделенных слоем взрывчатого материала.

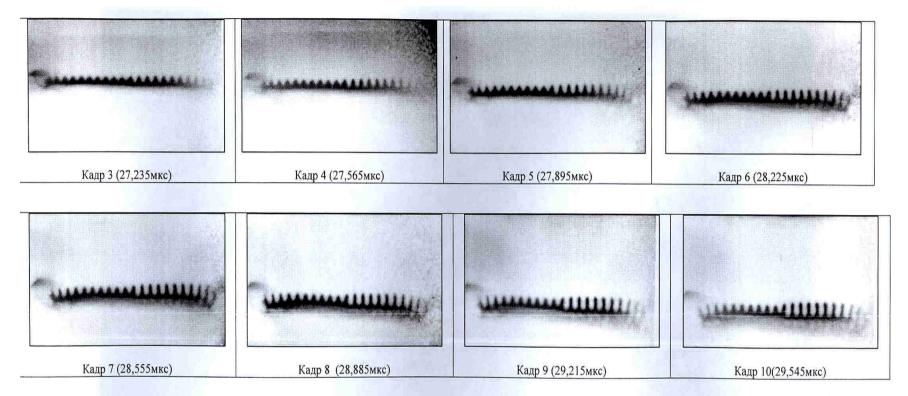


Рисунок 13 - Протонографические снимки процесса развития неустойчивости Рэлея-Тейлора при нагружении медного лайнера давлением до ≈ 55 ГПа, начальное возмущение 4мкм в левой части и 8мкм в правой части лайнера

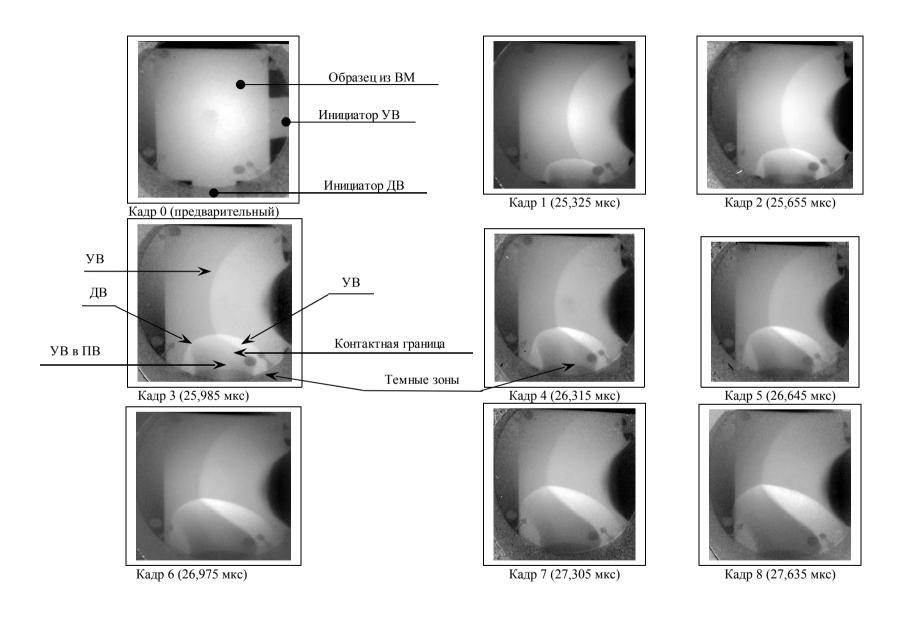


Рис. 14. Протонографические снимки взаимодействия ударной и детонационной волн в образце из взрывчатого материала.

## Литература

- 1. Ado Yu.M. a.o. Status Report on the 76 GeV IHEP Accelerator. Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference, Geneva, CERN, 1971, pp. 20-24.
- 2. Мызников К.П., Федотов Ю.С. и др. Общая схема вывода пучков протонов из ускорителя ИФВЭ. Препринт. ИФВЭ 68-57-К, Серпухов, 1968.
- 3. Баранов В.Т., Федотов Ю.С. и др. Система инжекции в УНК. Препринт ИФВЭ 92-118.
- 4. C.T. Mottershead, J.D. Zumbro. Magnetic Optics for Proton Radiography. Proceed. LANL, Los Alamos, New Mexico 87545, 1998.
- 5. V.V. Igonin, A.I. Lebedev, P.N. Nizovtsev, V.A. Raevsky, V.P. Soloviov «Study of free surfac instability in solids at shock loading» Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Workshop on, The Physics of compressible turbulent mixing, 5-9 July 1999, St-Peterburg, Russia, pp.171-177.
- 6. Морозов В.Г., Карпенко И.И., Ольхов О.В., Соколов С.С., Шамраев В.И, Евстигнеев А.А., Ковтун А.Д., Комрачков В.А., Плаксин И.Е., Герасименко В.Ф., Шуйкин А.Н., Макаров Ю.М., Герасимов В.М., Шутов В.И. Расчетное моделирование с опорой на эксперименты инициирования детонации в ВВ на основе ТАТБ с учетом десенсибилизации при взаимодействии ударной и детонационной волн. Доклад на Международной конференции по горению (Москва). Санкт-Петербург, 1993.

Рукопись поступила 17 августа 2009 г.

Ю.М. Антипов, А.Г. Афонин, А.В. Василевский и др. Протонная радиографическая установка на 70 ГэВ ускорителе ГНЦ ИФВЭ.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы Word.

Редактор Н.В. Ежела.

Подписано к печати 14.10.2009. Формат  $60 \times 84/8$ . Офсетная печать. Печ.л. 2,12. Уч.— изд.л. 1,7. Тираж 80. Заказ 47. Индекс 3649.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, 142284, Протвино Московской обл.

ПРЕПРИНТ 2009-14 ИФВЭ, 2009