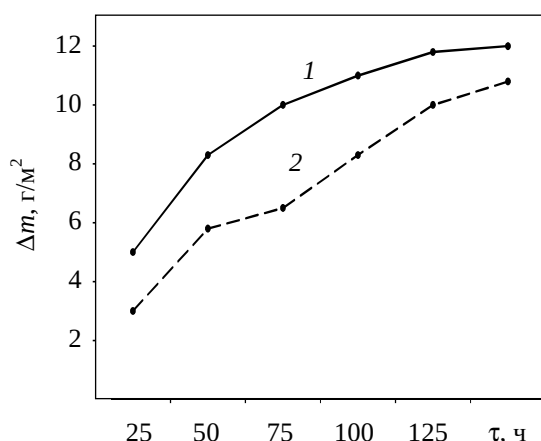




Р и с. 2. Коррозионная активность сплава ЭП-797 (1) и ЭП-797-ВИ (2)

коррозионная стойкость сплава ЭП-797 и монель-металла (НМЖМц28-2,5-1,5) при температуре 600 °С и эксплуатации 100 ч выше в 1,5—1,7 раза. По-видимому, сплав ЭП-797-ВИ будет превосходить стойкость монель-металла примерно в 2 раза.

Использование сплава ЭП-796 в рассматриваемом процессе нецелесообразно ввиду относительно слабой коррозионной стойкости по сравнению даже с монель-металлом, более высокой стоимости и ограниченной распространенности. Использование монель-металла в процессе фторирования оксидов урана безводным фторидом водорода является проблематичным ввиду относительно низкого температурно-

го предела применения ~500 °С, а также с учетом опыта его эксплуатации на зарубежных конверсионных заводах [4].

Таким образом, наиболее перспективным конструкционным материалом для работы в среде газообразного фторида водорода и паров воды при 350—600 °С является сплав ЭП-797 или его улучшенный аналог ЭП-797-ВИ.

Исходя из опыта эксплуатации конверсионной установки W-ЭХЗ, при выборе оптимального материала для изготовления реактора фторирования необходимо учитывать вероятность загрязнения тетрафторида урана легирующими компонентами сплавов (Mo, W, Cr), количество которых регламентировано требованиями, предъявляемыми к качеству производимого из тетрафторида урана гексафторида урана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Громов Б.В. Введение в химическую технологию урана. М.: Атомиздат, 1978.
2. Schillmoler C. Corrosion Resistance of Nickel-Containing Alloys in Hydrofluoric Acid, Hydrogen Fluoride and Fluorine. NIDI Techn. Ser. № 10074, 1993.
3. Стали высоколегированные и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки. ГОСТ 5632—72. М.: Изд-во стандартов, 1972.
4. Osborne P. Hydrofluoric Acid Corrosion Study of High-Alloy Materials. ORNL, 2002.

Поступила в Редакцию 24.09.12

УДК 539.1.074

ПРОТОННАЯ РАДИОГРАФИЯ — НОВЫЙ МЕТОД И ЕГО РЕАЛИЗАЦИЯ

Антипов Ю.М., Афонин А.Г., Гусев И.А., Демянчук В.И., Зятьков О.В., Игнашин Н.А., Ларионов А.В., Максимов А.В., Матюшин А.А., Минченко А.В., Михеев М.С., Миргородский В.А., Пелешко В.Н., Рудько В.Д., Терехов В.И., Тюрин Н.Е., Федотов Ю.С. (ГНЦ РФ — ИФВЭ, Протвино, Московская обл.)

Настоящая статья посвящена протонной радиографии — новому методу исследования быстропротекающих процессов в средах с высокой оптической плотностью.

В течение более чем полувека основным инструментом для исследования быстропротекающих процессов являлась импульсная рентгеновская радиография. Ее преимуществами являются простота метода и относительная дешевизна установок, основным элементом которых является ускоритель электронов. В основном

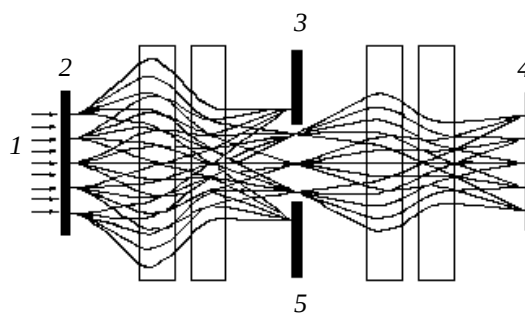
этим достоинствами и обусловлено широкое распространение рентгенографии. Но γ -кванты с высокой проникающей способностью (около 4 МэВ) при прохождении через вещество объекта порождают квантовые ливни, приводящие к фоновым шумам в регистрируемом изображении. В толстых объектах фоновые шумы могут почти полностью скрыть полезное изображение. Увеличение просвечивающей способности рентгенографических установок требует роста их мощности. При этом все труднее становится

обеспечить приемлемые размеры мишени, что является ограничением наращивания мощности рентгеновских установок.

В протонной радиографии таких проблем нет. По проникающим способностям протоны существенно превосходят рентгеновское излучение. Средняя длина пробега высокоэнергичных протонов составляет примерно 185 г/см^2 . При оптической толщине 300 г/см^2 сквозь объект проходит 20% протонов (против 10^{-6} γ -квантов), поэтому для формирования радиографического изображения необходимо в миллионы раз меньше протонов, чем γ -квантов. Протонное излучение можно уверенно применять для изучения структуры толстых объектов, например, содержащих 400 г/см^2 стали или вольфрама (урана), что почти невыполнимо при γ -облучении. γ -Излучение ослабляется в 10 раз при прохождении 50 г/см^2 стали. Высокоэнергичные протоны ослабляются в 10 раз при прохождении 300 г/см^2 стали. Кроме того, наличие заряда позволяет управлять потоками протонов для получения многокадровой и многолучевой съемки на базе одного ускорителя.

Главным требованием для протонной радиографии является наличие высокоэнергичных протонов энергией 50—70 ГэВ. Такая высокая энергия требуется не столько для обеспечения глубины просвечивания оптически толстого объекта, сколько для получения высокой четкости изображения, так как с увеличением энергии протонов уменьшается размытие изображения за счет хроматических aberrаций и многократного кулоновского рассеяния. Использование специальной магнитной оптики позволяет существенно уменьшить влияние кулоновского рассеяния и получить разрешение менее 1 мм для объектов с оптической толщиной более 300 г/см^2 [1] (рис. 1).

Мощный ускоритель протонов является наиболее дорогостоящей и технически сложной частью при создании протонного радиографического комплекса. Наличие ускорителя протонов энергией 70 ГэВ и развитой системы вывода позволило в 2004—2006 гг. создать на У-70 установку для исследования объектов почти любой представляющей интерес толщины методом протонной радиографии [2—5]. В пучках протонов У-70 были выполнены статические и динамические эксперименты с использованием



Р и с. 1. Освещение объекта пучком протонов и формирование изображения с использованием квартета квадрупольных магнитных линз Л1—Л4, имеющего матрицу -1 : 1 — протонный пучок; 2 — объект; 3 — коллиматор; 4 — изображение; 5 — Фурье-плоскость

объектов разной сложности, экспериментально доказаны преимущества метода протонной радиографии, подготовлена основа для его широкого внедрения и развития.

Протонная радиография на статических объектах при одном импульсе и энергии до 24 ГэВ была проверена в Брукхейвенской лаборатории (США) [6]. Протонная радиография систематически применяется для динамических экспериментов на установке LANSCE (США) при энергии протонов 800 МэВ, что существенно ограничивает возможности метода [7]. При такой же энергии были выполнены эксперименты с помощью установки ускорительно-накопительного комплекса ТВН [8].

Описываемая в настоящей работе установка по своим параметрам заметно превосходит перечисленные. Исследования, развитие и модернизация системы вывода и других систем ускорительного комплекса У-70, планируемое повышение интенсивности протонного пучка открывают новые возможности для увеличения многокадровости и экспозиции и тем самым существенно расширяют область применения протонной радиографии при исследовании быстротекущих процессов. В настоящей работе рассматривается только организация протонного пучка. Регистрации изображения объектов и проведению экспериментов посвящена работа [9].

Некоторые характеристики протонного синхротрона ИФВЭ. Ускорительный комплекс протонов У-70 включает в себя линейный ускоритель с высокочастотной квадрупольной фокусировкой УРАЛ-30 на энергию 30 МэВ, быстроциклирующий (16,6 Гц) бустер на энергию 1,5 ГэВ и протонный синхротрон на энергию

70 ГэВ. Максимальная интенсивность протонного пучка составляет $1,7 \cdot 10^{13}$ частиц в импульсе. Кратность ВЧ-ускоряющего поля равна 30.

В больших протонных ускорителях частицы сгруппированы в виде компактных сгустков. Из бустера на орбиту У-70 для последующего ускорения может инжектироваться до 29 сгустков протонов. Их минимальная интенсивность для устойчивой работы системы обратной связи составляет $3 \cdot 10^{11}$ частиц. Система быстрого вывода может выводить от одного до 29 сгустков один раз в цикл. Таким образом, минимальная интенсивность в импульсе вывода составляет $3 \cdot 10^{11}$, максимальная — до $1,5 \cdot 10^{13}$ протонов.

Длительность однооборотного вывода всех сгустков составляет ~5 мкс. За это время можно снять 29 кадров и получить информацию о быстропротекающих процессах, для изучения которых требуется реализовать многокадровую съемку объектов в микросекундном интервале времени. Длительность одного сгустка протонов специальной ВЧ-гимнастикой может быть укорочена до 5—15 нс. Интервал между кадрами составляет ~167 нс.

Сформированный в ускорителе пакет последовательных протонных сгустков направляется на объект для его просвечивания и синхронизированного с ним фотографирования изображения. Эмиттанс ускоренного пучка при максимальной интенсивности равен 2 мм·мрад, при меньшей интенсивности ($\sim 3 \cdot 10^{12}$) он может составлять около 1 мм·мрад. При скорости линейного перемещения объекта $\sim 10^4$ м/с за время прохождения сгустка, которое составляет около 10^{-8} с, объект сдвигается лишь на 100 мкм. Таким образом, с помощью протонной радиографии можно снимать до 29 кадров очень быстрых процессов с размытием ~100 мкм.

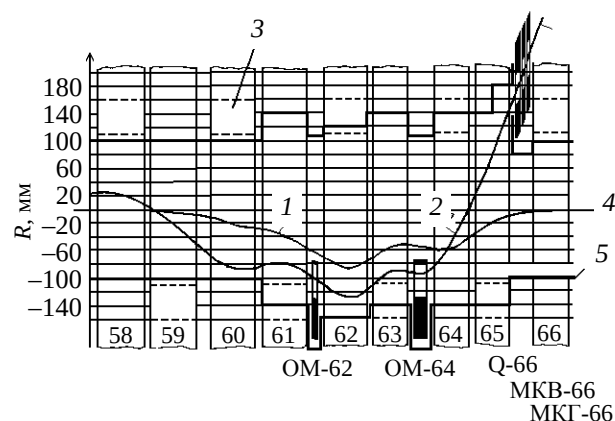
Система формирования протонного пучка. Основой протонной радиографической установки, созданной на базе имеющейся инфраструктуры — канала инжекции, является оптическая система, состоящая из четырех квадрупольных магнитных линз (квартет) с матрицей передачи –1 для горизонтальной и вертикальной плоскостей поперечного движения [10] (см. рис. 1). В качестве линз квартета использовались квадруполь диаметром 100 мм, длиной 1 м с максимальным градиентом магнитного поля 13 Тл/м. Длина прямолинейной части канала инжекции от прямолинейного промежутка

№ 68 до поворотного магнита МДГ-1 равна ~210 м, длина формирующего участка ~110 м. В прямолинейной части канала инжекции была размещена облучательная установка только для энергии 50 ГэВ.

Проектная 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 –1 для двух плоскостей движения.

Вывод протонного пучка на установку.

Важнейшая роль в проведении и постановке динамических экспериментов с использованием метода протонной радиографии отводится системе вывода протонов из ускорителя. Ускоренный протонный пучок в канал инжекции выводится 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 (рис. 2). Предварительное смещение пучка в направлении выводных магнитов осуществляется локальным искажением замкнутой орбиты (траектория 1 на рис. 2). С помощью этих магнитов пучок выводится за пределы вакуумной камеры ускорителя в 66-м прямолинейном промежутке (траектория 2). 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 ради-



Р и с. 2. Схема вывода протонного пучка в канал инжекции: 1 — локальное искажение замкнутой орбиты; 2 — трасса пучка, выводимого в канал инжекции; 3 — область большой нелинейности магнитного поля; 4 — ось вакуумной камеры; 5 — вакуумная камера (58—66 — номер блока ускорителя У-70)

альной плоскости движения ДП-66, профилометр П-66, измеряющий профили поперечного сечения выведенного пучка в радиальной и вертикальной плоскостях, измеритель интенсивности выведенного пучка ДИ-66.

Облучение объекта и формирование его изображения. В плоскости фокуса (плоскость в середине квартета, где пучок рассеянных частиц имеет минимальный размер — Фурье-плоскость) матрица дублета, определяющая структурные функции квартета ($\alpha_0, \beta_0, \gamma_0$), с градиентами линз $G_L = 13$ Тл/м и длиной $l_L = 1$ м

$$M_{\text{дуб}} = \begin{pmatrix} \alpha_0 & \beta_0 \\ -\gamma_0 & -\alpha_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1,82177 & 31,66147 \\ -0,13641 & 1,82177 \end{pmatrix}.$$

Наклон эллипса-аксептанса квартета $W = -\alpha_0/\beta_0 = 0,057539$ 1/м. Эмиттанс облучающего пучка равен $\epsilon_{r,z} = 2 \cdot 10^{-6}$ м·рад. Радиус облучающего пучка выбираем равным $A_{r,z} = 30$ мм (рис. 3). Тогда для облучающего пучка имеем $\beta_{r,z} = A_{r,z}^2/\epsilon_{r,z} = 450$ м, $\alpha_{r,z} = \mp \beta_{r,z} W = \mp 25,892559$. Именно такие значения надо получить, чтобы согласовать эмиттанс выведенного пучка с аксептансом квартета.

Допустимое увеличение пучка, проходящего без потерь через квартет линз, определяется его аксептансом. Угол рассеяния облучающего пучка в объекте $\Theta_{\text{рас}}$ зависит от радиационной длины вещества объекта и его толщины. Максимальный поперечный размер объекта, наблюдаемый в изображении без потерь пучка, назы-

вается полем обзора. Для получения максимального поля обзора эмиттанс облучающего пучка необходимо на входе в квартет согласовать с аксептансом квартета. Согласование достигается получением наклона фазового эллипса-эмиттанса облучающего пучка равным наклону эллипса-аксептанса квартета $W_0 = -\alpha_0/\beta_0 = -\chi'_{\text{макс}}/\chi_{\text{макс}}$, где угол $\chi'_{\text{макс}}$ соответствует частице с максимальным отклонением $\chi_{\text{макс}}$. Используя матрицы участков от начала квартета до фокусирующих линз, получим выражения для двух прямых, ограничивающих поле обзора (см. рис. 3):

$$\begin{aligned} 1 - X_{\text{п.о}} &= 0,68R_{\text{кам}} - 0,48\Theta_{\text{рас}}/k_L; \\ 2 - X_{\text{п.о}} &= 3R_{\text{кам}} - 10,22\Theta_{\text{рас}}/k_L, \end{aligned}$$

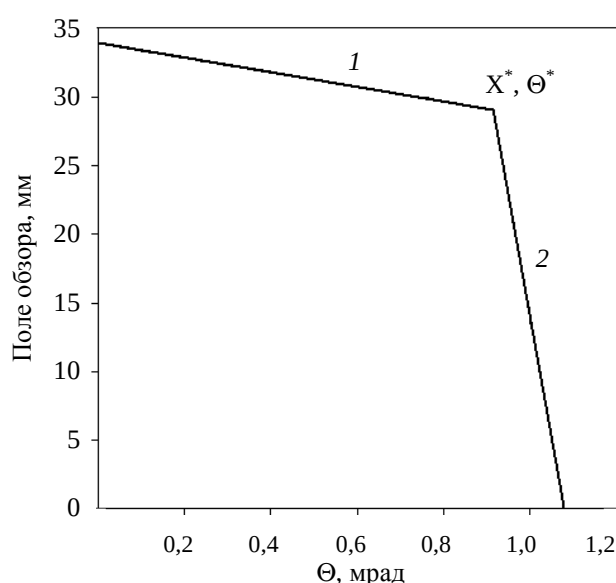
где $R_{\text{кам}}$ — радиус вакуумной камеры; $k_L = G_L l_L / H_0 R_0$ — сила линзы; $H_0 R_0$ — магнитная жесткость. Характерной точкой в зависимости поля обзора от угла рассеяния является точка пересечения этих прямых с координатами $X^* = 0,57R_{\text{кам}}$, $\Theta^* = 0,24R_{\text{кам}}k_L$. На рис. 3 видно, что диаметр изучаемого объекта для получения его изображения на такой установке не может превышать 60 мм.

Предполагаем распределение рассеянного в веществе объекта протонного пучка гауссовским со среднеквадратичным углом рассеяния

$$\sigma_{\text{рас}} = 13,6/p\beta \sqrt{L/L_R},$$

где p — импульс протона, МэВ/с; β — относительная скорость протона; L — толщина облучаемого объекта; L_R — радиационная длина вещества объекта. Тогда для 95%-ного содержания пучка в угле $\Theta_{\text{рас}} = 2\sigma_{\text{рас}}$ получим длину свинцового объекта без потери пучка на стенках вакуумной камеры при облучении ~20 мм. Допуская потери протонного пучка, можно получить изображение объекта длиной до 350 мм. С углом рассеяния связана линейная хроматическая aberrация частиц, прошедших через квартет линз, $\Delta\chi = 4\beta_0\Theta_{\text{рас}}\Delta p/p$. Поэтому для большей энергии пучка искажения за счет хроматической aberrации будут меньше из-за меньшего угла рассеяния и меньшей относительной потери импульса в веществе объекта.

Протонный канал. Для уменьшения радиационного фона в месте получения изображения объекта в канале после него расположены блоки защиты. Изображение объекта передается с помощью зеркала по горизонтали в вертикальную



Р и с. 3. Радиус поля обзора квартета при энергии пучка 50 ГэВ

шахту, сооруженную напротив для размещения регистрирующей аппаратуры. Толщина слоя земли, отделяющего туннель канала инжекции от шахты, составляет 1,2 м. Это, в свою очередь, еще более чем в 10 раз уменьшает влияние радиационного фона. На поверхности шахты в экспериментальном домике размещается аппаратура обработки изображений объектов.

В месте расположения объекта находится устройство для получения изображения облучающего протонного пучка. Изображение пучка с помощью зеркал передается через трубу диаметром 200 мм на поверхность земли, где в специальном помещении находится аппаратура для регистрации изображения пучка. В фокусе квартета есть устройство для автоматической смены коллиматоров. Оно представляет собой барабан диаметром 500 мм с восемью позициями для размещения трех коллиматоров диаметром 30, 20 и 15 мм, трех антиколлиматоров диаметром 30, 20 и 15 мм, одной пустой трубы диаметром 100 мм и прецизионного измерителя положения центра тяжести пучка. Это устройство позволяет быстро без нарушения вакуума в канале ставить нужный коллиматор.

Для управления создана автоматическая система, позволяющая включать и выключать установку, устанавливая нужные токи в магнитооптических элементах канала, измерять ток в отдельных элементах и вакуумных насосах, наблюдать за показаниями приборов диагностики пучка.

Таким образом, созданная на ускорительном комплексе протонов У-70 уникальная протонная радиографическая облучательная установка позволяет при энергии 50 ГэВ получать изображение объектов диаметром 60 мм с диапазоном толщины до 400 г/см². Достигнутое оптическое разрешение составляет 100 мкм при 20 мм свинца. Впервые в нашей стране при

энергии протонного пучка 50 ГэВ выполнены статические и динамические эксперименты и показаны преимущества импульсной радиографии при изучении быстропротекающих процессов в сверхплотных средах [8].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mottershead C., Zumbro J. Magnetic Optics for Proton Radiography: Preprint 87545 LANL, 1998. 12 p.
2. Адо Ю.М., Журавлев А.А., Логунов А.А. и др. Некоторые итоги комплексной наладки и пуска протонного синхротрона ИФВЭ на энергию 70 ГэВ. — Атомная энергия, 1970, т. 28, вып. 2, с. 132—138.
3. Мызников К.П., Татаренко В.М., Федотов Ю.С. и др. Общая схема вывода пучков протонов из ускорителя ИФВЭ: Препринт ИФВЭ 68-57-К, 1968. 14 с.
4. Антипов Ю.М., Афонин А.Г., Василевский А.В. и др. Протонная радиографическая установка на 70 ГэВ ускорителе ГНЦ ИФВЭ: Препринт ИФВЭ 2009-14, 2009. 16 с.
5. Антипов Ю.М., Афонин А.Г., Василевский А.В. и др. Радиографическая установка ускорителя протонов с энергией 70 ГэВ ГНЦ ИФВЭ. — Приборы и техника эксперимента, 2010, № 3, с. 1—8.
6. Morris S., Alrick K., Aufderheide M. e.a. Flash radiography with 24 GeV/c proton. — J. Appl. Phys., 2011, v. 109, p. 104905—104909.
7. King N., Ables E., Adams K. e.a. An 800-MeV proton radiography facility for dynamic experiment. — Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res., 1999, v. A424, p. 84—88.
8. Голубев А.А., Демидов В.С., Демидова Е.В. и др. Применение пучков ускорительно-накопительного комплекса ТВН ИТЭФ для диагностики быстропротекающих процессов. — Атомная энергия, 2008, т. 104, вып. 3, с. 99—106.
9. Бурцев В.В., Лебедев А.И., Михайлов А.Л. и др. Многокадровая протонография на базе ускорителя У-70 как метод исследования быстропротекающих гидродинамических процессов. — В сб.: 65 лет ВНИИЭФ. Физика и техника высоких плотностей энергии. Вып. 2. Саров, РФЯЦ — ВНИИЭФ, 2011, с. 205—225.
10. Баранов В.Т., Татаренко В.М., Федотов Ю.С. и др. Система инжекции УНК: Препринт ИФВЭ 92-118, 1992. 24 с.

Поступила в Редакцию 28.08.12

УДК 621.384.634

НОВАЯ ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ-ИНЖЕКТОРА ИСТОЧНИКА СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ «СИБИРЬ»

Корчуганов В.Н., Фомин Е.А. (НИЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва)

В настоящее время источник синхротронного излучения в НИЦ «Курчатовский институт» включает в себя два накопителя электронов: малый «Сибирь-1» на 450 МэВ и большой «Си-

бирь-2» на 2,5 ГэВ. Источником электронов для «Сибири-1», одновременно являющегося и бустерным синхротроном для «Сибири-2», служит линейный ускоритель на энергию 80 МэВ.