

На правах рукописи

Максимов Александр Васильевич

**Разработка, создание и ввод в эксплуатацию
магнитооптической структуры и системы
многооборотного быстрого вывода протонного
радиографического комплекса на энергию 50÷70 ГэВ
на базе синхротрона У-70**

01.04.20 – физика пучков заряженных частиц
и ускорительная техника

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Протвино 2017

УДК 539.1.07

Работа выполнена в ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт» (г. Протвино).

Научный руководитель – д. ф.-м. н., Ю.С. Федотов (ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт», г. Протвино).

Официальные оппоненты – д. ф.-м. н., Н. В. Завьялов, (РФЯЦ ВНИИЭФ, г. Саров), к. т. н, В. А. Михайлов (ОИЯИ ЛФВЭ, г. Дубна).

Ведущая организация – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (г. Москва).

Защита диссертации состоится “_____” _____ 2017 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета

Д 201.004.01 при ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт» по адресу: 142281, Московская область, город Протвино, площадь Науки, дом 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте

http://www.ihep.ru/files/maksimov_dis.pdf ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт».

Автореферат разослан “_____” _____ 2017 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета Д 201.004.01

Ю.Г. Рябов

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Импульсная просвечивающая протонная радиография сложных объектов с применением пучков протонов высокой энергии является эффективным методом экспериментального исследования физики экстремального состояния вещества и быстротекущих процессов в плотных средах. Этот метод востребован в современном высокотехнологичном секторе отечественной промышленности (Государственная корпорация по использованию атомной энергии «Росатом»).

Актуальность темы диссертации обусловлена тем, что в ней решаются вопросы разработки, создания и ввода в эксплуатацию технологических систем протонной радиографической установки (магнитная оптика) и первичного ускорителя протонов (система многооборотного быстрого вывода), реализующих на практике ключевые преимущества метода протонной радиографии.

Практическая значимость работы

В диссертацию вошли результаты работ, выполненных в ходе реализации программы основной деятельности и НИОКР ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ “Курчатовский институт” в период с 2009 года по настоящее время.

Эти работы проводились на крупнейшем в России действующем ускорителе заряженных частиц — Ускорительном комплексе У-70 совместными усилиями сотрудников ГНЦ ИФВЭ НИЦ КИ (г. Протвино) и РФЯЦ–ВНИИЭФ (г. Саров). Использовалась имеющаяся инфраструктура канала инжекции пучка (сокращенно КИ) не реализованного проекта Ускорительно-накопительного комплекса (УНК) протонов. Работы можно разбить на **два больших блока**:

На **первом этапе** в 2005–2011 годах была создана и эксплуатировалась пилотная протонная радиографическая установка с энергией пучка 50 ГэВ.

На **втором этапе** в 2011 году было начато строительство полномасштабного протонного радиографического комплекса ПРГК-100 с энергией пучка 50–70 ГэВ. Его оптика состоит из трех квартетов квадрупольных линз с увеличенной апертурой. Предусмотрены отдельные плоскости регистрации облучаемого пучка, размещения объекта и две плоскости регистрации протонных изображений. В июне 2014 года осуществлён физический пуск ПРГК-100, а в ноябре 2014 года был проведён первый сеанс по получению изображений статических объектов.



Рис.1 Участок установки ПРГК-100 с квадрупольными линзами и блоками радиационной защиты

Результаты диссертации получены и использовались на практике в ходе выполнения каждого из указанных выше этапов работ.

Цель диссертационной работы

1. Обобщить результаты разработки, настройки и штатной эксплуатации (в 2005–2011 годах) магнитооптической системы пилотной установки для протонной радиографии на пучке У-70.

2. Представить результаты разработки и создания схемы магнитной оптики для действующего (с 2014 года) протонного радиографического комплекса ПРГК-100 с энергией пучка 50–70 ГэВ и полем обзора не менее $\varnothing 200$ мм.

3. Представить результаты анализа влияния параметров пучка и характеристик установки на качество изображения объекта с получением количественных оценок пространственного разрешения в протонных радиографических изображениях объектов.

4. Представить физическое обоснование и данные по экспериментальной проверке многооборотного быстрого вывода пучка из У-70 (так называемый метод “бритье”). Для синхротрона У-70 указанный метод является средством получения длительности вывода в несколько десятков микросекунд (от 4 до 10 оборотов пучка по орбите).

5. Представить первые экспериментальные результаты физического запуска и настройки ПРГК-100 (2014 год), подтверждающие достоверность результатов диссертации и достижение проектных параметров систем и установок.

Результаты, выносимые на защиту

1. Изложенная в работе методика построения и расчетов магнитооптической системы была использована при построении экспериментальной установки, а также лежит в основе создания полномасштабного протонного радиографического комплекса.

2. Выполнены расчеты по оценке влияния параметров установки и исследуемых объектов на качество изображения. Сформулированы допуски на точность поддержания параметров магнитооптической системы. Приведены оценки контрастной частотной ха-

рактеристики магнитооптической системы и системы регистрации изображений.

3. Изложен принцип и приведены расчеты по обеспечению режима многооборотного быстрого вывода пучка длительностью до 20-50 мкс.

4. Представлены результаты первых экспериментов на полномасштабном протонном радиографическом комплексе ПРГК-100 в части верификации и подтверждения достоверности результатов диссертации.

Апробация диссертации и публикации

Диссертация выполнена в Институте физике высоких энергий. Апробация диссертации прошла на семинаре отделения ускорительного комплекса. Результаты диссертации опубликованы в препринте ФГБУ ГНЦ ИФВЭ [1], в статьях в рецензируемых журналах из списка ВАК — журнал «Приборы и техника эксперимента» [2,5,6], журнал «Атомная энергия» [3], журнал «Журнал технической физики» [4].

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации 96 страниц, включая 61 рисунок и 16 таблиц. Список литературы включает 24 наименования на 3 страницах.

Содержание работы

Во Введении приведена краткая история создания протонных радиографических систем, обосновывается актуальность создания протонной радиографической установки на базе ускорителя ГНЦ ИФВЭ У-70. Показана практическая ценность полученных результатов, представлены результаты, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации обсуждаются принципы и физические основы протонной радиографии, современное состояние дел в этой области и изложены принципы построения магнитооптических систем для установок протонной радиографии.

Протонная радиография с применением высокоэнергетичных (сотни МэВ) протонов обладает большей просвечивающей способностью по отношению к рентгеновскому излучению (средняя длина свободного пробега протонов для мишени из тяжелых металлов $\sim 200 \text{ г/см}^2$, что в восемь раз больше чем для рентгеновский лучей с энергией $\sim 3\div 4 \text{ МэВ}$). Существующие протонные радиографические установки наглядно показали преимущества метода протонной радиографии по сравнению с традиционными рентгенографическими методами. Между тем, существующие протонные радиографические установки вследствие низкой энергии протонов принципиально не могут работать с

объектами толщиной в сотни г/см², а именно в этой области толщин протонная радиография вне конкуренции.

В работе подробно рассмотрен вариант построения магнитооптической системы для протонной радиографии на основе симметричного дублета [1-4] (рис.2).

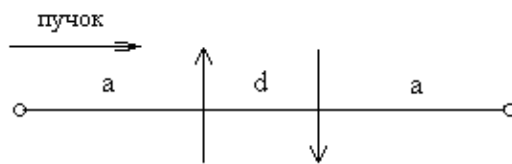


Рис.2 Оптическая схема симметричного дублета квадрупольных линз

Квартет линз, образованный переносной симметрией из двух дублетов, обеспечивает преобразование координат исходного пучка из “точки в точку” с общей матрицей преобразования:

$$\hat{R} = \hat{M}^2 = -\hat{I} + Sp(\hat{M})\hat{M}$$

где \hat{I} – единичная матрица, \hat{M} – матрица дублета, $Sp(\hat{M}) = m_{11} + m_{22}$ – след матрицы \hat{M} . Если след матрицы \hat{M} равен нулю, то имеет место преобразование $\hat{R} = -\hat{I}$. В этом случае связь между параметрами дублета и структурными функциями Твисса выражается соотношением:

$$\hat{M} = \begin{pmatrix} -kd & a+d \\ -k^2d & kd \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_0 & \beta_0 \\ -\gamma_0 & -\alpha_0 \end{pmatrix}$$

где сила линзы равна $k = \frac{G_q l_q}{B_0 R_0}$, G_q – градиент магнитного поля

квадруполя, l_q – его эффективная длина, $B_0 R_0$ – магнитная жесткость протонного пучка, $\alpha_0, \beta_0, \gamma_0$ – структурные функции в начале дублета. Величина наклона фазового эллипса квартета равна

$$W = -\frac{\alpha_0}{\beta_0} = \frac{2}{3}k.$$

Согласование входного (просвечивающего) пучка на объекте (в начале квартета) увязано с минимизацией последствий хроматической аберрации. Аберрационные коэффициенты определяют ошибку в конечном положении для частиц просвечивающего пучка с отличным от проектного значением импульса. Показано, что для этого наклон фазового эллипса пучка w должен быть равен наклону фазового эллипса квартета W , т.е.

$$w = -\frac{\alpha_0}{\beta_0} = -\frac{\alpha}{\beta} = \frac{x'_{\max}}{x_{\max}} \quad [4], \text{ где угол } x'_{\max} \text{ соответствует частице,}$$

имеющей максимальное отклонение x_{\max} (рис.3)

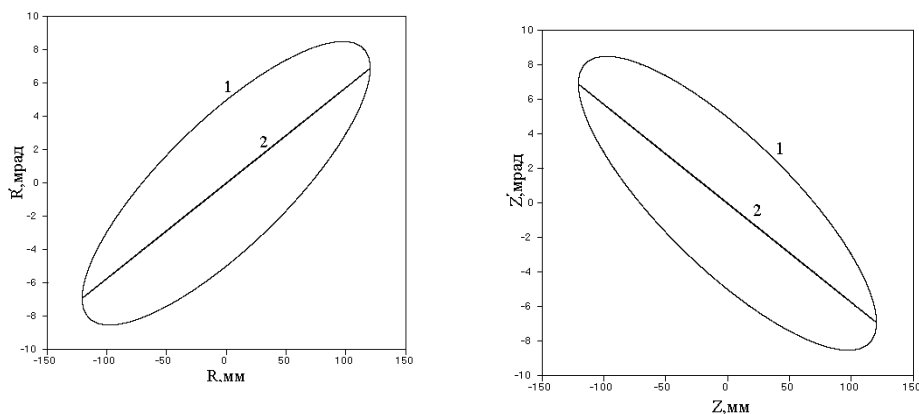


Рис. 3 Фазовые эллипсы горизонтального (слева) и вертикального (справа) направлений квартета (1) и просвечивающего пучка (2) на входе в квартет.

Характеристики просвечивающего пучка на поперечной фазовой плоскости формируются системой предварительной фокусировки. Она формирует пучок с необходимыми параметрами, чтобы осветить весь объект, и согласовывает пучок с аксептансом квартета. Максимально возможный линейный размер просвечиваемого объекта, допускающий получение его изображения без потерь информации, называется полем обзора. Поле обзора определяется аксептансом квартета и зависит от среднеквадратичного угла многократного кулоновского рассеяния в веществе объекта $\Theta_{рас}$.

Предельно допустимый фазовый портрет пучка, пропускаемого без потерь, в кольцевой магнитной структуре синхро-

трона со знакопеременной фокусировкой, находящейся вдали от магнитооптических резонансов, имеет вид эллипса с площадью πA . Для коротких систем, состоящих из нескольких квадрупольей, аксептанс представляет собой область, ограниченную двумя парами параллельных прямых, полученных путем обратного линейного преобразования в начало системы апертурных ограничений, вносимых фокусирующими квадрупольными линзами. Наложив эти ограничения на коррелированный (по предположению $\theta = \omega x$) просвечивающий пучок, учтя многократное кулоновское рассеяние на уровне $\Theta_{рас} = 2\theta_{рас}$ и использовав матрицы участков от начала квартета до фокусирующих линз, получим выражения для двух прямых, ограничивающих поле обзора [4]:

$$X_{н.о.} = 0.68R_{кам} - \frac{0.48}{k}\Theta_{рас} \quad X_{н.о.} = 3R_{кам} - \frac{10.22}{k}\Theta_{рас}$$

здесь $R_{кам}$ – размер вакуумной камеры, вписанной в апертуру квадруполья (он может превышать радиус апертуры линзы, что позволяет получить большие величины поля обзора). Характерной точкой в картине зависимости поля обзора от угла рассеяния является точка пересечения этих прямых, имеющая координаты [4]:

$$X^* = 0.5656R_{кам} \quad \Theta^* = 0.2382R_{кам}k$$

На рис. 4 приведен пример поля обзора для квадрупольных линз с радиусом вписанной окружности 150 мм и модулем силы

$$k = \frac{G_q l_q}{B_0 R_0} = 0.048 \text{ (1/м)}$$

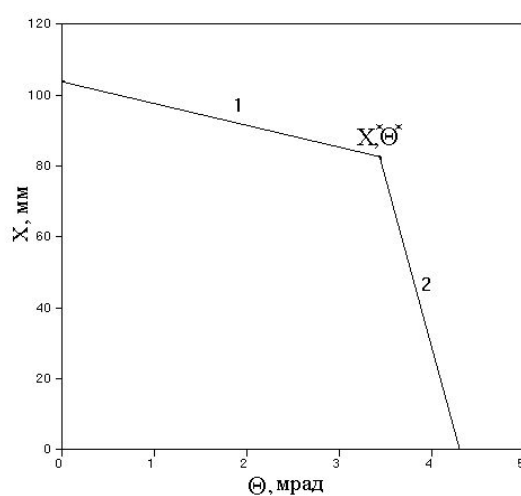


Рис. 4 Поле обзора в квартете с радиусом апертуры квадрупольа 150 мм и модулем силы $k = 0.048(1/м)$

Во второй главе приведено физическое обоснование и описание пилотной протонной радиографической установки на пучке У-70 с энергией 50 ГэВ (2005–2011 годы). Перечислены существенные технические характеристики протонного синхротрона У-70. Приведена структура и расположение установки и схема быстрого вывода протонного пучка [1-3].

Протонная радиографическая установка была создана на базе имеющейся инфраструктуры – канала инжекции (КИ) ускорительно-накопительного комплекса УНК. Схема канала представлена на рис.5.

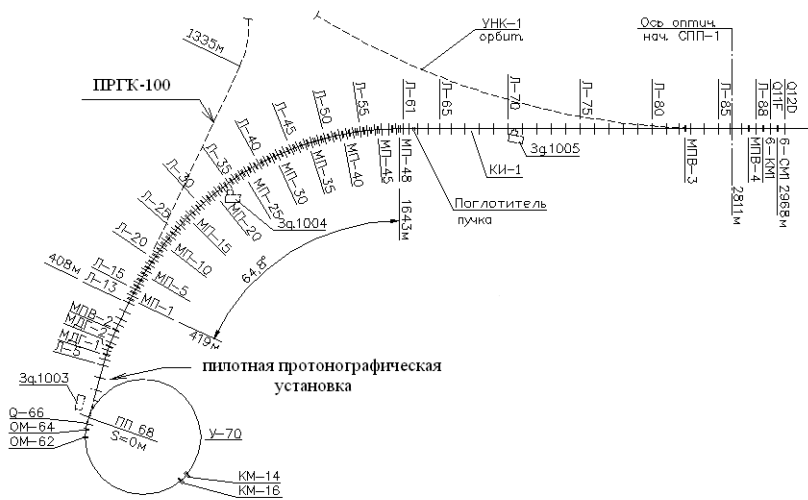


Рис. 5 Схема канала инжекции

В ходе создания пилотной радиографической установки и экспериментов на ней решались следующие задачи:

- разработка методики проведения экспериментов,
- разработка и изготовление двух систем регистрации: протонного изображения объекта и протонного изображения просвечивающего пучка, с дистанционным (сетевым) управлением,

- разработка, изготовление тест-объектов, оснастки для размещения и юстировки изучаемых объектов, испытания коллиматоров,
- исследование возможностей восстановления массовых толщин объектов как одна из основных задач протонной радиографии,
- измерение пространственного разрешения системы.

Магнитооптическая структура пилотной протонной радиографической установки состояла из одного квартета квадрупольных линз [1-2]. Расчетное поле обзора установки составляло 56 мм для объектов с массовой толщиной до $\sim 20 \text{ г/см}^2$. Расчет поля обзора квартета представлен на рисунке 6.

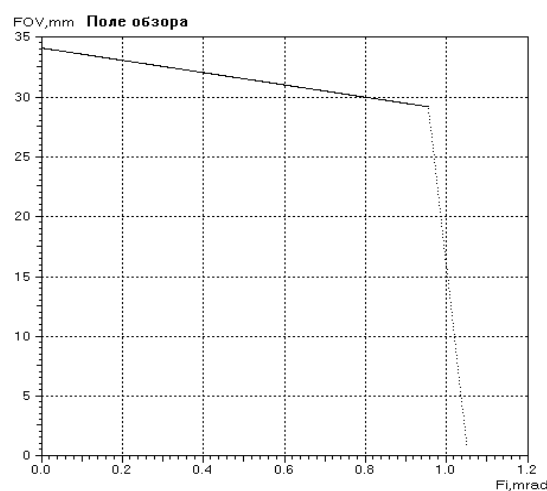


Рис. 6 Поле обзора квартета при энергии пучка 50 ГэВ

На рис. 7 представлено измеренное поле обзора установки. Видно, что измеренная величина поля обзора составляет ~ 50 мм.

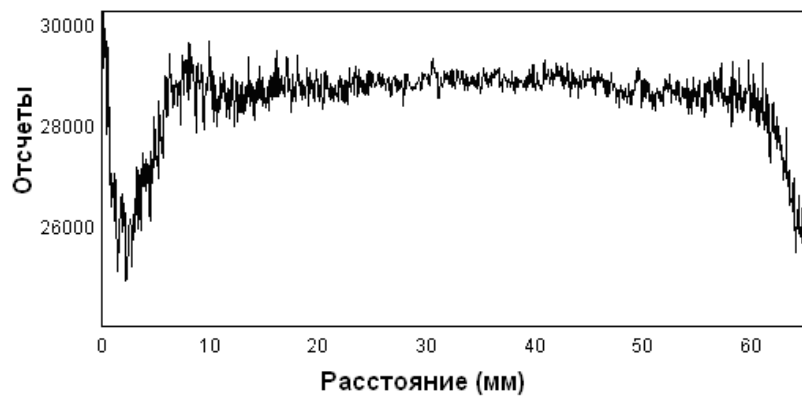


Рис. 7 Измеренное поле обзора

Было выполнено значительное количество экспериментов со статическими объектами. Протонное радиографирование тест-объектов «звезда» с массовыми толщинами $9\div 36 \text{ г/см}^2$ показало высокую пространственную разрешающую способность протонной радиографической установки (рис.8)

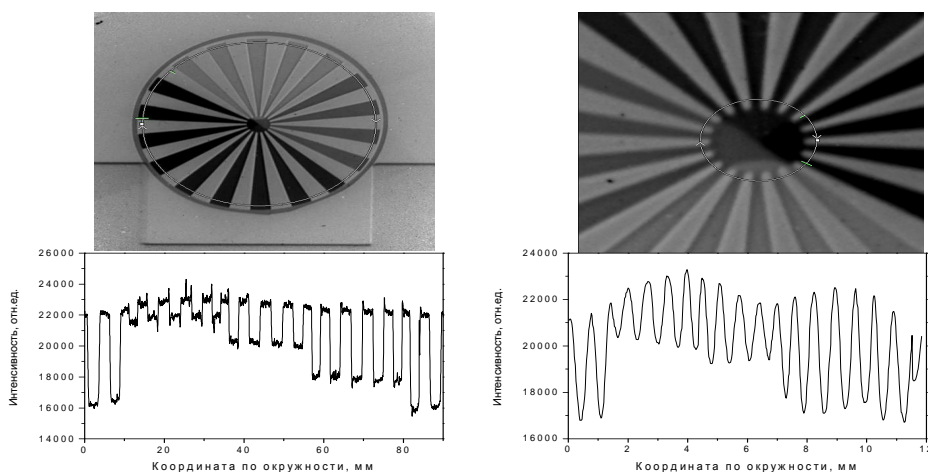


Рис. 8 – Результаты протонной радиографии тест-объекта «звезда» (на нижнем рисунке представлена яркость изображения вдоль выделенных окружностей на верхнем рисунке).

Предельная величина разрешения по данным объектам составила ~ 140 мкм. Для объектов с массовыми толщинами ~ 400 г/см² разрешение составило ~ 610 мкм.

В третьей главе приведено обоснование оптической схемы и структура построения полномасштабного радиографического комплекса ПРГК-100. Цель создания комплекса - проводить протонную радиографию динамических объектов массовой толщиной до 450 г/см² с полем обзора диаметром не менее $\varnothing 200$ мм при энергии протонного пучка 50-70 ГэВ [4]. В данной главе:

- Приведены расчеты основных характеристик магнитооптической системы для достижения проектных параметров.

- Предложена методика оценки пространственного разрешения при регистрации объектов на ПРГК.
- Приведена оценка влияния некоторых физических процессов, ограничивающих пространственное разрешение протонных радиографических изображений.

Магнитооптическая структура ПРГК-100 состоит из канала транспортировки пучка от протонного синхротрона У-70, системы согласования облучающего пучка с ПРГК-100 и трех квартетов, имеющих матрицу $-\hat{1}$ в радиальной и вертикальной плоскостях движения. Структура квартетов показана на рис.9.

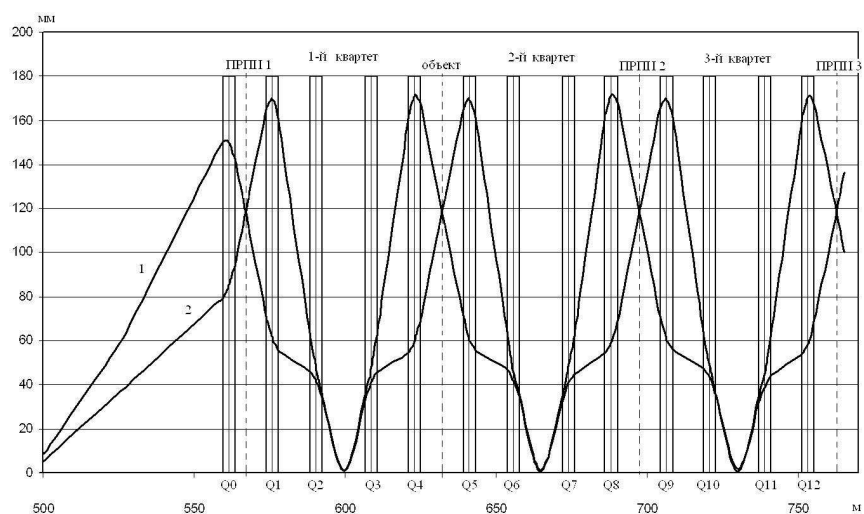


Рис.9 Структура квартетов (показаны огибающие пучка по горизонтали (1) и по вертикали (2), Q1-Q12 линзы квартетов)

В начале первого квартета устанавливается система регистрации параметров просвечивающего протонного пучка (ПРПИ – подсистема регистрации протонного изображения). В начале второго квартета устанавливается просвечиваемый объект. Протонный пучок, прошедший через объект, формируется вторым и третьим квартетами на соответствующие системы регистрации для получения изображения исследуемого объекта (ПРПИ2 и ПРПИ3). Длина каждого квартета составляет 65.2 м. В серединах второго и третьего квартетов (в точках фокуса) расположены устройства коллимации пучка.

Для увеличения поля обзора установки в квадрупольных линзах используется эллиптическая вакуумная камера (рис.10)

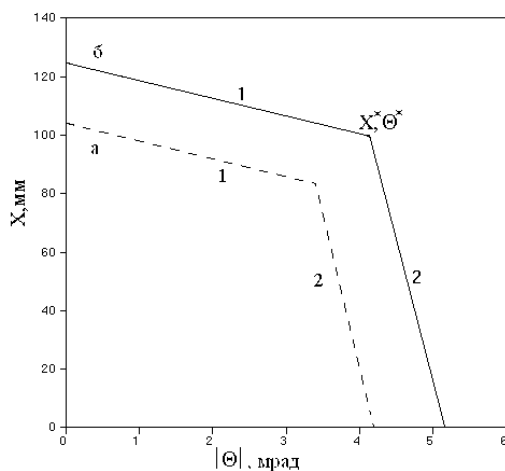


Рис. 10 Поле обзора в квартете с радиусом апертуры квадруполья 150 мм
 а) - с круглой вакуумной камерой диаметром 300мм
 б) - с эллиптической вакуумной камерой 360×250 мм²

В качестве метода регистрации изображения объекта на ПРГК-100 используется метод, основанный на конверсии оставляемой протонами энергии в кванты оптического излучения в сцинтилляционном детекторе. Яркость изображения определяется количеством протонов попавших на данную ячейку сцинтиллятора, которое в итоге трансформируется в световой поток в каждом пикселе ПЗС матрицы регистрирующей TV-камеры. В качестве конвертора используются сцинтилляторы из Lu_2SiO_5 толщиной 5 мм. Дисперсия энерговыделения в процессе конверсии энергии заряженных частиц в оптическое излучение порождает флуктуации потока фотонов, что приводит к ограничению по пространственному разрешению при протонном радиографировании объектов.

На основе измерений уровня флуктуаций, полученных на пилотной установке (рис.7), была произведена оценка ожидаемого уровня флуктуаций при регистрации изображения на ПРГК-100 (таблица 1). Расчеты выполнены для ПЗС матрицы размером 2048×2048 пикселей (0.12 мм / пиксель), диаметр облучающего пучка \varnothing 240 мм (на уровне $(\pm 3\sigma)$).

Таблица 1

Расчетное количество протонов на ячейку и расчетный уровень относительных флуктуаций в зависимости от расстояния до центра пучка

Расстояние от центра пучка (мм)	Число протонов в ячейке 0.12×0.12 мм ($\times 10^5$)	Расчетный уровень флуктуаций (%)
0	3.0	1.5
50	1.8	2.0
100	0.4	4.2

Пространственное разрешение при протонном радиографировании объектов является одним из основных параметров характеризующих качество протонной радиографической установки и определяющее в конечном итоге качество полученного изображения объекта.

Пространственное разрешение системы принято определять, либо как размытие границы объекта (edge source, в этом случае пространственное разрешение – это, например, ширина на полувысоте соответствующей функции размытия), либо как величина размытия и уменьшения амплитуды изображения пространственной решетки, состоящей из черно-белых полос с определенной частотой пар линий на 1 мм. В этом случае пространственное разрешение $\Delta R = \frac{1}{2k}$, где k - число пар линий на опре-

деленном уровне контрастности изображения. Для количественной оценки качества изображения используется контрастно-частотная характеристика (КЧХ).

В работе показано, что при самых общих предположениях относительно процесса размытия выражение для контрастно-частотной характеристики имеет вид:

$$K(k) = K_0 \exp\left(-\frac{1}{2}(2\pi k\sigma)^2\right)$$

где k – число пар линий на миллиметр (1/мм),

$K_0 = \frac{\Delta_0 + \Delta_{колл}}{2 - (\Delta_0 + \Delta_{колл})} = \frac{1 - Tr}{1 + Tr}$ – первичная контрастность после

прохождения объекта и коллиматора, $\Delta_0 - \Delta_0 = 1 - \exp(-\mu)$ – до-

ля потерь первичного пучка на объекте, $\mu = \frac{L_{об}}{L_{яд}}$ $L_{об}$ – длина

объекта $L_{яд}$ – длина ядерного взаимодействия, $\Delta_{колл}$ – доля по-

терь пучка на коллиматоре, Tr (transmission) – коэффициент прохождения (доля пучка, дошедшего до плоскости регистрации).

Расчет потерь на коллиматоре производится по формуле:

$\Delta_{колл} = \exp\left(-\frac{L_{об}}{L_{яд}}\right) \cdot \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{d}{2\sigma x}\right)^2\right)$, здесь $\sigma x = \beta_0 \theta_{рас}$ – средне-

квадратичный размер пучка в точке фокуса, d – диаметр колли-

матора. Соответственно коэффициент прохождения рассчитыва-

ется как:

$$Tr = \exp\left(-\frac{L_{o\bar{o}}}{L_{\bar{o}o}}\right) \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{d}{2\sigma x}\right)^2\right)\right)$$

Наличие статистических флуктуаций яркости изображения ограничивает контрастность, имеем: $K_0 = \frac{(1 - Tr_0) - \sigma_n}{(1 + Tr_0) + \sigma_n}$, здесь

$$\sigma_n = \frac{\sigma_{noise0}}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + Tr}, \quad \sigma_{noise0} - \text{уровень относительных статистических}$$

флуктуаций в нормированном изображении. Для надежной регистрации объекта на фоне флуктуаций должно быть выполнено условие:

$$\frac{\sigma_{noise0}}{\sqrt{2}} \frac{\sqrt{1 + Tr}}{1 - Tr} < 1.$$

Выражение для пространственного разрешения имеет вид:

$$\Delta R \geq \frac{\pi\sigma}{\sqrt{-2 \cdot \ln\left(\frac{\sigma_{noise0}}{\sqrt{2}} \frac{\sqrt{1 + Tr}}{1 - Tr}\right)}},$$

где σ – среднеквадратичное “размытие” координаты частицы в плоскости регистрации. В общем случае дисперсия “размытия” определяется суммой дисперсий для процессов, вносящих свой вклад: $\sigma^2 = \sum \sigma_i^2$.

Для оценки разрешения протонной радиографической системы вычислены дисперсии размытия координат частиц в плоскости регистрации для следующих процессов:

1. Смещение исходной координаты частицы при прохождении объекта конечной длины вследствие многократного кулоновского рассеяния .

Среднеквадратичное смещение координаты частицы на объекте

выражается соотношением: $\sigma = \frac{L_{об} \theta_{рас}}{\sqrt{3}}$, здесь $\theta_{рас}$ – средне-

квадратичный угол рассеяния, $L_{об}$ – длина объекта. На рис. 11

приведен расчет среднеквадратичного смещения в зависимости

от массовой толщины объекта.

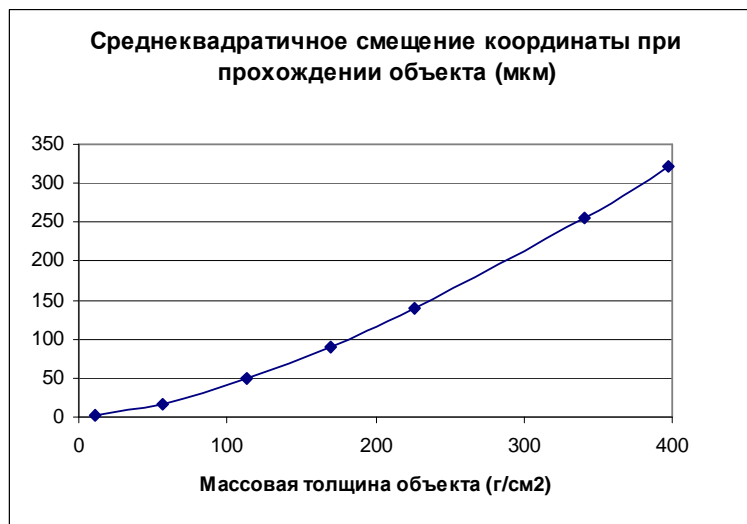


Рис.11 Среднеквадратичное смещение координаты частицы при прохождении объекта в зависимости от массовой толщины объекта (материал свинец, E=70 ГэВ).

2. Влияние хроматической aberrации.

Среднеквадратичное размытие координаты частицы:

$$\sigma = (4\beta_0)\theta_{pac} \sigma_{\frac{\Delta p}{P}}, \text{ здесь } 4\beta_0 = R'_{12}$$

коэффициент хроматической aberrации, $\sigma_{\frac{\Delta p}{P}}$ - среднеквадратичный разброс величины относительного импульса пучка протонов.

3. Точность поддержания токов в квадрупольных линзах квартетов.

Оптическая единица оборудования квартета протонного радиографического комплекса состоит из пары квадрупольных линз длиной 1.8 м с расстоянием между ними 0.7 м. Каждая линза запитывается от одного источника питания. Таким образом, для плоскости регистрации в ПРПИ2 на качество изображения пучка влияет точность поддержания тока в восьми квадрупольных линзах, для плоскости регистрации в ПРПИ3 – в шестнадцати линзах. Выражение для конечной координаты частицы в зависимости от относительных отклонений токов в магнитных линзах дается выражением:

$$X_f = -X_0 + X_0 \sum_n (R'_{11} + wR'_{12})_n \delta_n + \varphi \sum_n (R'_{12})_n \delta_n$$

здесь: X_0 – координата точки регистрации, φ – угол рассеяния частицы на объекте, $(R'_{11})_n$ и $(R'_{12})_n$ – производные матричных членов по отношению к относительному отклонению тока в

$$n\text{-й линзе } \delta_n = \frac{\Delta I_n}{I}.$$

4. Эффект размытия, вызванный не параллельностью облучающего пучка.

Просвечивающий пучок на объекте не параллельный (расходится по горизонтали и сходится по вертикали). Это приводит к тому, что на координатах, отличных от нуля, точки объекта расположенные на одной координате X/Y, но находящиеся на разной глубине объекта, проецируются в разные точки на изображении. Среднеквадратичное размытие координаты частицы для данного процесса оценивается как: $\sigma = \frac{1}{4}(L_{об}W_xX_0)$, здесь W_x – наклон фазового эллипса облучающего пучка на объекте.

5. Эффект размытия изображения вызванный оптической системой регистрации изображения.

Здесь имеют место следующие ограничения (без рассмотрения вопросов преобразования сигналов в электронике ПЗС матрицы):

- ограниченное число пикселей ПЗС на 1 мм поля регистрации.
- неопределенность положения резкой границы белого-черного оценивается в ~ 1 пиксель.

Таким образом, среднеквадратичная неопределенность положения границы оценивается как $\sigma = \frac{\Delta X}{N}$ где ΔX – размер поля регистрации (в нашем случае ≈ 250 мм), N – число пикселей регист-

рирующей ПЗС-матрицы. Эти ограничения определяют КЧХ оптической системы (рис. 12).

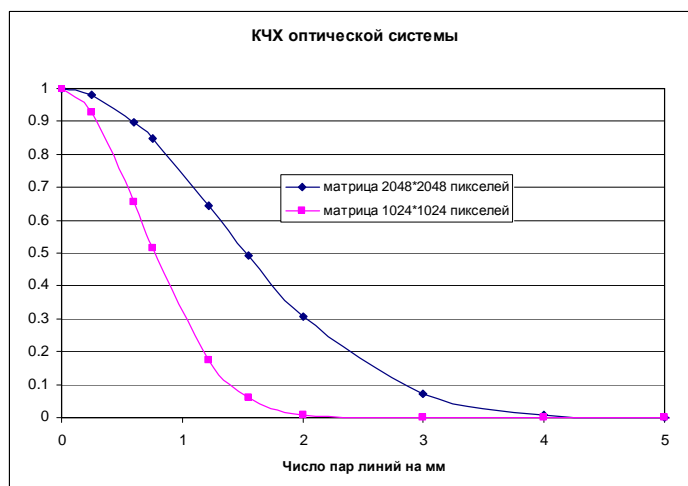


Рис. 12 КЧХ оптической системы (расчеты приведены для ПЗС матриц размерами 2048×2048 и 1014×1024 пикселей).

В табл. 2 и 3 приведены итоговые оценки расчетного пространственного разрешения при протонной радиографии объектов на ПРГК-100 для телевизионных камер с матрицами 2048×2048 и 1024×1024 пикселей.

Таблица 2

Оценка пространственного разрешения при протонной радиографии объектов на ПРГК-100 (матрица 2048×2048 пикселей)

	50 г/см ²	200 г/см ²	400 г/см ²
R (мм)	Пространственное разрешение (мкм)		
0	145	190	436
50	192	278	574
100	284	450	848

Таблица 3

Оценка пространственного разрешения при протонной радиографии объектов на ПРГК-100 (матрица 1024×1024 пикселей)

	50 г/см ²	200 г/см ²	400 г/см ²
R (мм)	Пространственное разрешение (мкм)		
0	261	280	456
50	300	346	572
100	363	475	802

В четвертой главе приводится физическое обоснование и результаты расчетов по многооборотному быстрому выводу пучка из У-70 с длительностью выведенного пучка несколько десятков микросекунд для многокадровой регистрации динамических объектов [5].

Вывод осуществляется быстрым перемещением пучка в радиальной поперечной плоскости в зазор выводного устройства, имеющего очень тонкую перегородку (в нашем случае электростатический дефлектор ЭД-106, расположенный в 106 прямолинейном промежутке). Наведение ускоренного протонного пучка на перегородку электростатического дефлектора осуществляется с помощью быстрого локального искажения замкнутой орбиты, возбуждаемого дипольными магнитами, расположенными в промежутках 96 и 108. Условие, которое обеспечивает приемлемую эффективность вывода выглядит следующим образом: $d_{\text{деф}} \ll \Delta R_{\text{оборот}}$, т.е. толщина перегородки дефлектора должна быть много меньше, чем прирост координаты пучка за один оборот под действием быстрых магнитов наведения БМ96 и БМ108. Источники питания быстрых магнитов обеспечивают линейный закон изменения магнитного поля от времени длительностью до 100 мкс. На рис.13 представлен пучок в фазовой горизонтальной плоскости на ЭД106.

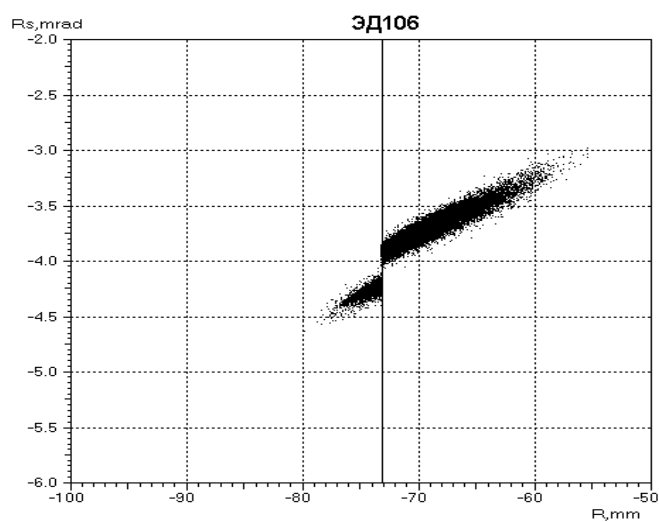


Рис.13 Радиальная фазовая плоскость пучка на ЭД106 Прямая линия показывает положение перегородки дефлектора ЭД106. Справа от прямой линии показан циркулирующий пучок, слева – заброшенный в зазор ЭД106.

Пучок, заброшенный в ЭД106, далее проходит последовательно через магниты ОМ24, ОМ62 и ОМ64 и выводится в канал инжекции. На рис. 14 и 15 представлены расчетные гистограммы интенсивности выведенного пучка по оборотам.



Рис. 14 Гистограмма интенсивности выведенного пучка по оборотам (длительность фронта БМ 100 мкс (20 оборотов))



Рис. 15 Гистограмма интенсивности выведенного пучка по оборотам (длительность фронта БМ 50 мкс (10 оборотов)).

В первом случае, реально может быть использовано для протонографирования ~ 10 импульсов, во втором случае 3-4 им-

пульса. В обоих случаях имеет место сильная неравномерность интенсивности в импульсах (до 3-4 раз). Импульсы с низкой интенсивностью не могут быть использованы, таким образом эффективность использования исходного пучка (с учетом эффективности вывода ~ 85%) находится на уровне ~ 60 %.

Временная структура выведенной интенсивности может быть улучшена. Применение источника питания БМ с программируемой скоростью нарастания магнитного поля позволит получить до 10 импульсов примерно равной выведенной интенсивности. На рис. 16 приведен пример расчета гистограммы интенсивности выведенного пучка при наличии возможности программирования силы БМ во времени (в данном случае обеспечивается длительность вывода 10 оборотов).

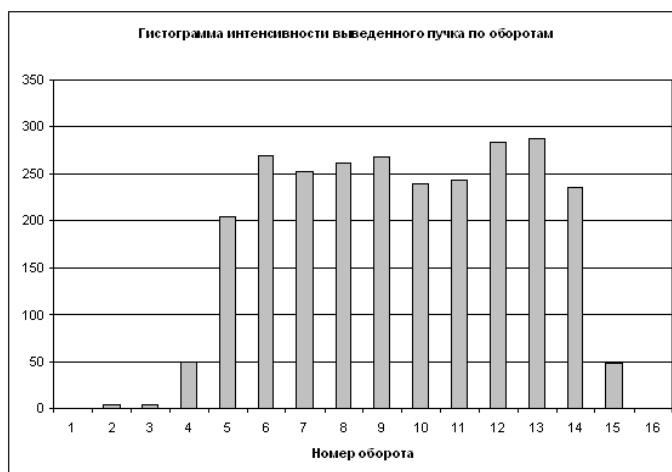


Рис. 16 Гистограмма интенсивности выведенного пучка по оборотам (длительность вывода 10 оборотов).

Как видно, в данном случае неравномерность выведенной интенсивности не превышает 20%.

В пятой главе представлены первые результаты эксплуатации протонного радиографического комплекса ПРГК-100 и предложена их интерпретация в части верификации и подтверждения достоверности результатов диссертации [6].

На базе синхротрона У-70 в июне месяце 2014 года осуществлён физический пуск протонного радиографического комплекса (ПРГК-100) с энергией протонов 50 ГэВ и проведен первый сеанс по получению изображений статических тест-объектов. Решались следующие задачи:

- Настройка предварительной магнитной оптики для получения расчетных параметров облучающего пучка.
- Настройка магнитной оптики квартетов для получения минус единичной оптики.
- Настройка оптической системы регистрации протонных изображений. Измерение КЧХ оптической системы.
- Настройка многокадровой системы регистрации протонных изображений во всех трех ПРПИ.
- Измерение разрешения (размытия) при протонном радиографировании различных объектов.

Пучок выводился в одно и многооборотном режимах. На рис. 17 приведены изображение и профиль просвечивающего пучка (на входе в 1-й квартет).

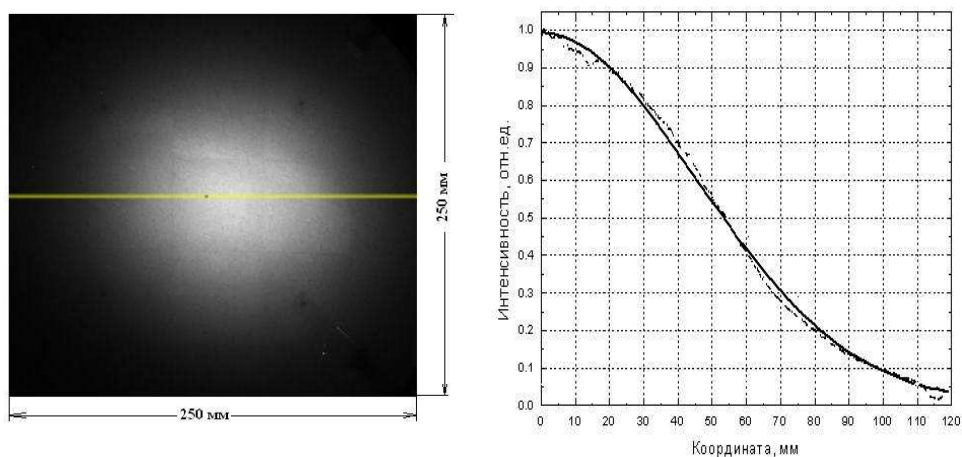


Рис. 17 Изображение и профиль протонного пучка

Для исследования разрешения протонной радиографической системы использовались различные тест-объекты. На рис. 18 приведена фотография миры, которая применялась для получения КЧХ системы, на рис. 19 приведено протонное радиографическое изображение (протонограмма) миры.

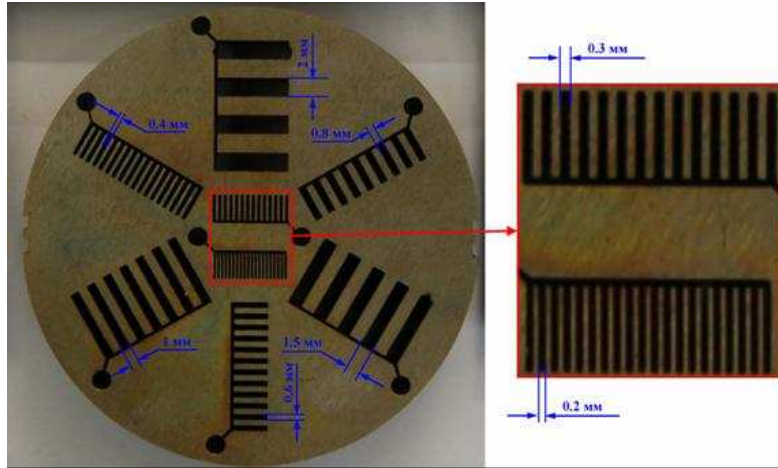


Рис. 18 Мира для измерения КЧХ радиографической системы (7.8 г/см^2 , восемь полей).

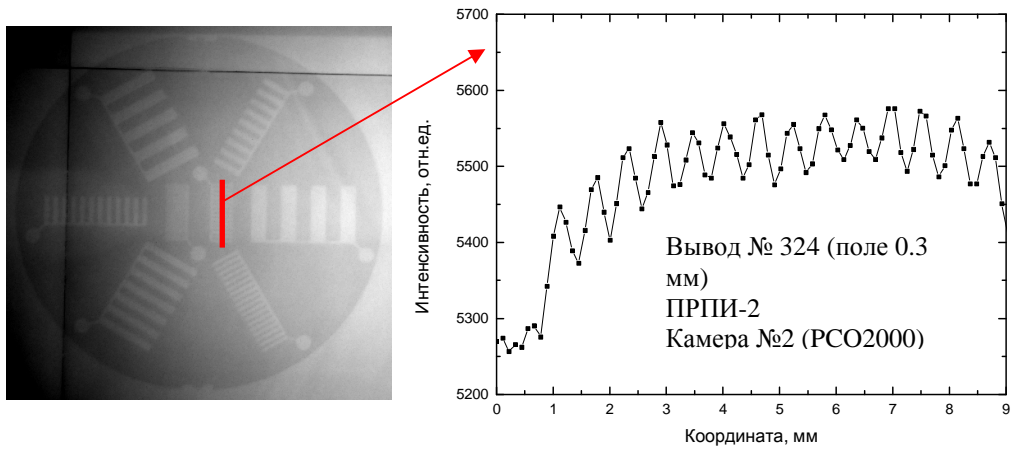


Рис. 19 – Протонограмма миры для измерения КЧХ (7.8 г/см^2) на фоне свинцовой преграды 170 г/см^2

Разрешение в данном случае составляет $\sim 290 \text{ мкм}$.

Выполнено измерение размытия границы на изображениях объекта при перепаде толщин 100 г/см^2 . Величина размытия для подготовленных (механическая обработка фрезерованием) граней составила 480 мкм.

Выполнено измерение размытия границы на изображениях объекта при перепаде толщин 350 г/см^2 . Средняя величина размытия, измеренная по четырем граням тест-объекта, составила 1020 ± 130 мкм.

Величины размытия на границах объектов здесь представлены параметром FWHM (full width at half maximum) измеренных функций размытия.

Был осуществлен многооборотный вывод “бритье”. На рисунке 20 приведена осциллограмма многооборотного вывода пяти сгустков.

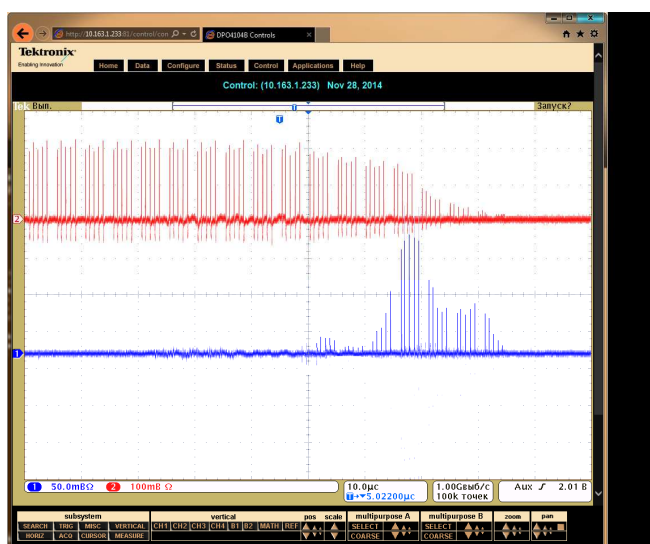


Рис. 20 Осциллограммы сигналов

- 1) сигнал трансформатора тока У-70
- 2) сигнал трансформатора тока системы регистрации протонных изображений при многооборотном выводе «бритье»

В заключении представлены основные результаты диссертационной работы.

Список литературы

- [1] Ю.М. Антипов, А.Г. Афонин, А.В.Василевский, И.А. Гусев, В.И. Демянчук, О.В. Зятков, 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. *Протонная радиографическая установка на 50 ГэВ ускорителя ГНЦ ИФВЭ.* // Препринт ИФВЭ 2009-14, 2009. 16 стр.
- [2] Ю.М. Антипов, А.Г. Афонин, А.В.Василевский, И.А. Гусев, В.И. Демянчук, О.В. Зятков, 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, 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. Спилов, Г.А. Сырунин, М.В. Таценко, И.А. Ткаченко, И.В. Храмов. *Радиографическая установка ускорителя протонов с энергией 70 ГэВ ГНЦ ИФВЭ.* // Приборы и техника эксперимента, 2010, № 3, стр. 1–8.
- [3] Ю.М. Антипов, А.Г. Афонин, И.А. Гусев, В.И. Демянчук, О.В. Зятков, Н.А. Игнашин, 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. *Протонная радиография – новый метод и его*

реализация. // Атомная энергия, т.114, вып.5, май 2013г. стр. 288-291.

[4] **А.В. Максимов**, Н.Е. Тюрин, Ю.С. Федотов. *Оптическая система протонной облучательной установки на ускорителе У-70 ГНЦ ИФВЭ.* // Журнал технической физики, 2014, т. 84., вып.9., стр. 132-138

[5] В.Д. Рудько, С.В. Авраменко, А.А. Логинов, **А.В. Максимов**, М.П.Овсиенко, В.Д. Раев, Ю.С.Федотов. *Многооборотный быстрый вывод протонного пучка из синхротрона У-70.* // Приборы и техника эксперимента, 2016, N3, стр.5-10.

[6] А.И. Андриянов, А.Г. Афонин, И.А. Гусев, О.В. Зятков, Н.А. Игнашин, А.В. Ларионов, Э.А. Людмирский, **А.В. Максимов**, А.А. Матюшин, А.В. Минченко, М.С. Михеев, В.Н. Пелешко, В.Д. Рудько, В.И. Терехов, Н.Е. Тюрин, Ю.С. Федотов. *Ввод в эксплуатацию протонного радиографического комплекса на ускорителе У-70* // Приборы и техника эксперимента, 2016, N3, стр.61-68.

Рукопись поступила

Максимов Александр Васильевич
Разработка, создание и ввод в эксплуатацию магнитооптической
структуры и системы многооборотного быстрого вывода
протонного радиографического комплекса на энергию 50÷70 ГэВ
на базе синхротрона У-70

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного автором.

Подписано к печати 20.11.2000. Формат 60x84/16. Цифровая печать.
Печ.л. 1,17. Уч.-изд.л. 1. Тираж 100. Заказ 236. Индекс 3649.

ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт»
142281, Московская область, город Протвино, площадь Науки, дом 1

www.ihep.ru/
библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т 2017-XX,
ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт», 2017
