



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2015–3

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 комплекса ПРГК
на ускорителе У-70 ГНЦ ИФВЭ**

Направлено в *ПТЭ*

Протвино 2015

Аннотация

Андрянов А.И. и др. Ввод в эксплуатацию комплекса ПРГК на ускорителе У-70 ГНЦ ИФВЭ: Препринт ИФВЭ 2015–3. – Протвино, 2015. – 13 с., 16 рис., библиогр.: 6.

Представлены первые результаты работы протонной радиографической установки ИФВЭ на выведенном пучке из синхротрона У-70 с энергией 50-70 ГэВ. Установка позволяет получать протонное радиографическое изображение объектов с оптической толщиной до 450 г/см^2 и полем обзора диаметром не менее 220 мм.

Abstract

Andrianov A.I. et al. Start up of the Proton radiographic Facility on U-70 IHEP accelerator: IHEP Preprint 2015–3. – Protvino, 2015. – p. 13, figs. 16, refs.: 6.

The first results of Proton Radiographic Facility on U-70 IHEP accelerator commissioning are presented. The facility is capable to get proton radiographic images for objects up to 450 g/cm^2 optical length and with field-of-view not less then 220 mm.

Введение

В ГНЦ ИФВЭ НИЦ “Курчатовский институт” в мае 2014 года осуществлён физический пуск протонного радиографического комплекса (ПРГК) [1], а в ноябре того же года проведен первый сеанс на пучке протонов У-70 по получению изображений статических тест-объектов. Данный комплекс позволяет наблюдать тест-объекты оптической толщины до 450 г/см² с полем обзора не менее 200 мм при энергии 50-70 ГэВ. История создания комплекса относится к 2005 году, когда в ИФВЭ была создана на основе имеющейся инфраструктуры – канала инжекции (КИ) Ускорительно-Накопительного Комплекса [2] – пилотная установка, позволившая наблюдать объекты толщиной до 300 г/см² с полем обзора до 60 мм при энергии 50 ГэВ [3,4]. На этой установке с 2005 по 2011 год были получены результаты, позволившие существенно преувозйти качество изображений, получаемых с помощью рентгенографии [5].

Структура ПРГК

Магнитооптическая структура ПРГК состоит из канала транспортировки пучка от протонного синхротрона У-70, системы согласования облучающего пучка с ПРГК и трех квартетов, имеющих матрицу $-I$ в радиальной и вертикальной плоскостях движения. Структура ПРГК показана на рис. 1 [1]. Канал транспортировки протонов состоит из участка от прямолинейного промежутка 66 (66 ПП) магнитной структуры У-70 до линзы Q90, состоящего из квадрупольных линз 10ЛКИ100-13 [2] (см. рис. 2). Система согласования состоит из квадрупольных линз 10ЛКИ100-13 (Q91 – Q92А-В – Q93А-В-С) и пары квадрупольных линз 30К180-6,7 (Q1а,б), стоящих рядом и разделённых промежутком 0.70 м. Квартеты ПРГК состоят из линз 30К180-6,7 (Q4f,d). Согласование облучающего объект пучка с аксептансом квартета состоит в том,

чтобы размер облучающего пучка сделать равным размеру аксептанса, а наклон эмиттанса облучающего пучка сделать равным наклону аксептанса квартета (рис. 3). Для наблюдения за пучком в структуре ПРГК (рис. 2) имеются 8 однокоординатных (Р66G, Р66V, ПГ1-3, ПВ1-3), 4 двухкоординатных профилометров (ПВГ1-4), 7 телевизионных станций TV1-7. Три двухкоординатных профилометра размещены в прямолинейном промежутке между магнитом МДГ4 и линзой Q1a,b. Измерения 3-х размеров пучка в этих точках позволяют вычислить структурные функции и определить наклоны горизонтального и вертикального эмиттансов на входе в квартет. Одна из телевизионных станций (TV-6) расположена в Фурье-плоскости между линзами Q4d2b и Q4f3a. Изменения токов в линзах квартета дает возможность получить минимум изображения пучка в Фурье-плоскости, и, таким образом, в первом приближении настроить квартет на $-I$. В Фурье-плоскостях двух последующих квартетов размещены устройства для автоматической смены коллиматоров. После третьего квартета стоит линза Q5d13, фокусирующая протонный пучок на поглотитель.

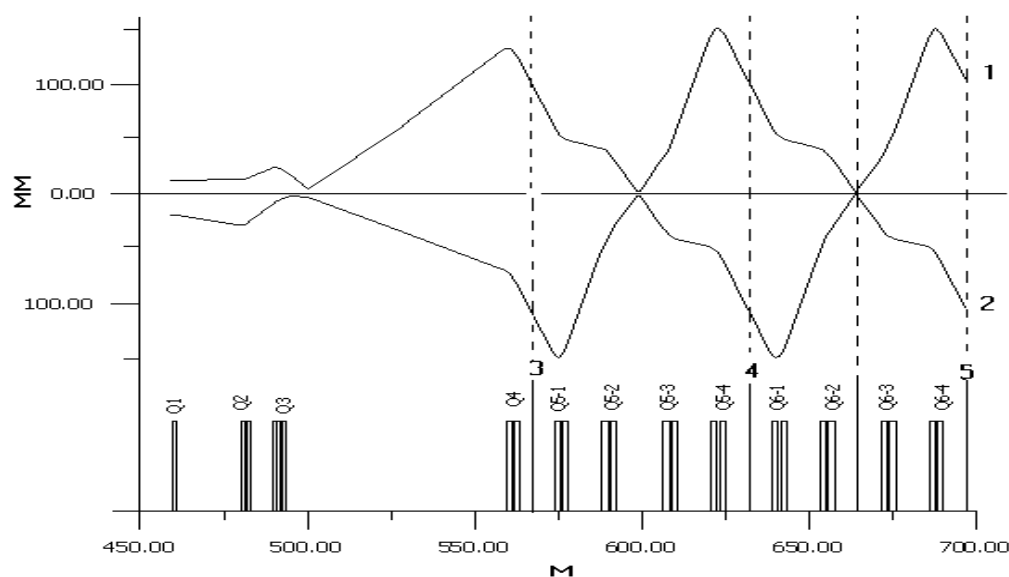


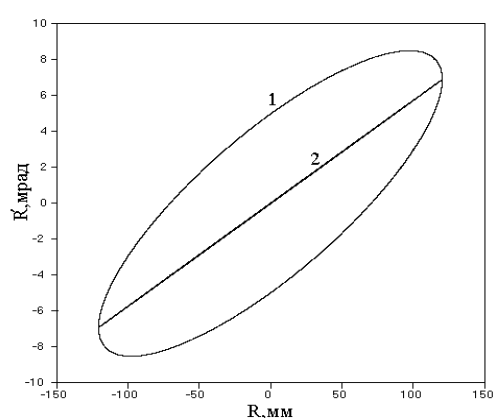
Рис. 1. Магнитооптическая схема ПРГК: 1 - огибающая пучка в горизонтальной плоскости; 2 - огибающая пучка в вертикальной плоскости; 3 - плоскость системы регистрации параметров пучка; 4 - плоскость расположения объекта; 5 - плоскость системы регистрации изображения объекта; Q1–Q4 линзы, согласующие пучок протонов с аксептансом квартета; Q5–Q8 линзы первого квартета; Q9–Q12 линзы второго квартета.

Третий квартет на рисунке не показан.

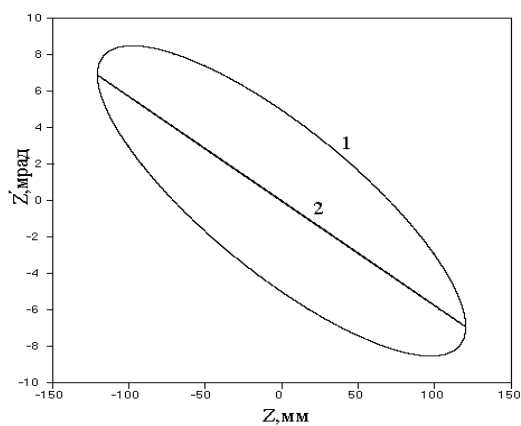
В местах, обозначенных как Image0,1,2, расположены помещения регистрации протонных изображений (ПРПИ).



Рис. 2. Копия экрана программы управления источниками питания магнитооптических элементов комплекса.



а)



б)

Рис. 3. Фазовые эллипсы горизонтального а) и вертикального б) аксептансов (1) и облучающего пучка (2) на входе в квартет.

Система вывода протонов на комплекс ПРГК

Используются два режима вывода ускоренного пучка на ПРГК: однооборотный, длительностью не более 5 мкс [6], и многооборотный, длительностью 20-50 мкс. Начальным элементом системы однооборотного вывода является быстрый кикер-магнит КМ-16, расположенный в 16 ПП. Он забрасывает протонный пучок в отклоняющий септум-магнит ОМ-62, который, в свою очередь, забрасывает пучок в отклоняющий септум-магнит ОМ-64. Этот магнит выводит пучок в 66 ПП начало канала транспортировки протонов ПРГК. Начальным элементом системы многооборотного вывода являются два быстрых бамп-магнита, расположенных в 96 и 108 ПП, смещающих протонный пучок к тонкой перегородке электростатического дефлектора ЭД-106. Дефлектор забрасывает пучок в отклоняющий септум-магнит ОМ-24, который, в свою очередь, забрасывает пучок в магнит ОМ-62 и далее в ОМ-64 и 66 ПП.

Вывод пучка системой однооборотного вывода

Система однооборотного вывода позволяет выводить от одного до 29 сгустков. Длительность вывода одного сгустка составляет 10-20 нс, а 29 сгустков около 5 мкс, то есть время одного полного оборота пучка в У-70.

В режиме однооборотного вывода решались следующие задачи:

- Настройка согласующей магнитной оптики для получения расчетных параметров облучающего пучка.
- Настройка магнитной оптики квартетов для получения минус единичной оптики.
- Настройка оптической системы регистрации протонных изображений.
- Измерение частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) оптической системы.
- Настройка многокадровой системы регистрации протонных изображений во всех трех ПРПИ.
- Измерение разрешения (размытия) при протонной радиографии различных объектов.

На рис. 4 и 5 приведены изображение и профиль пучка одного сгустка. Для исследований протонного пучка использовались различные тест-объекты. На рис. 5 приведена фотография миры, которая применялась для получения КЧХ радиографической системы. На рис. 7 приведено протонное радиографическое изображение (протонограмма) миры. На рис. 8 приведен чертёж тест-объекта «Решетка», а на рис. 9 – его протонограмма. При использовании однооборотного вывода исследовано несколько различных тест-объектов и многокадровая система регистрации изображений объектов.

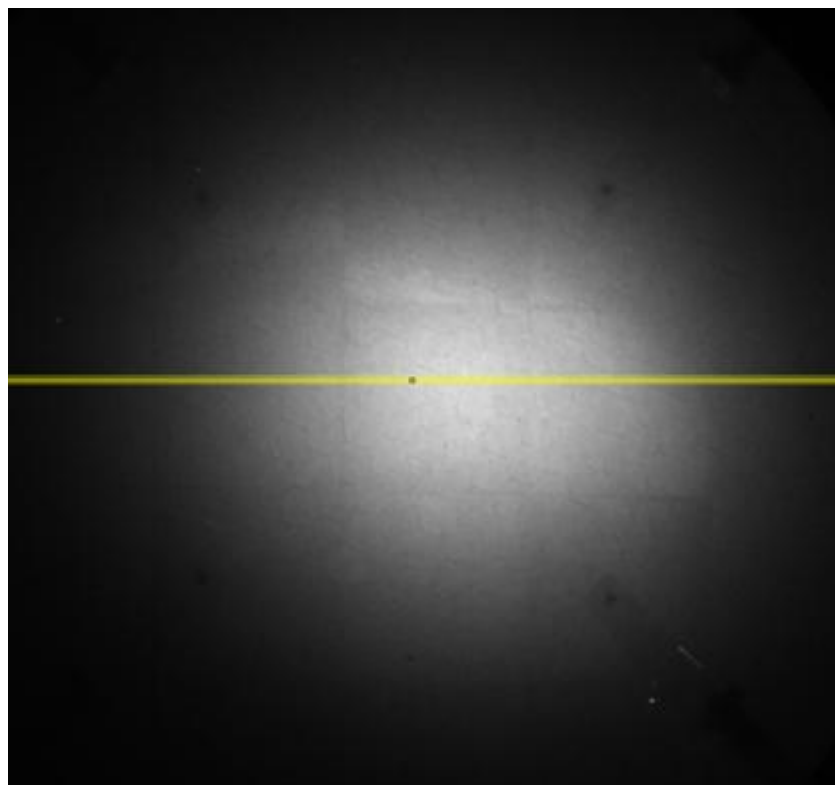


Рис. 4. Протонное радиографическое изображение (протонограмма) протонного пучка.

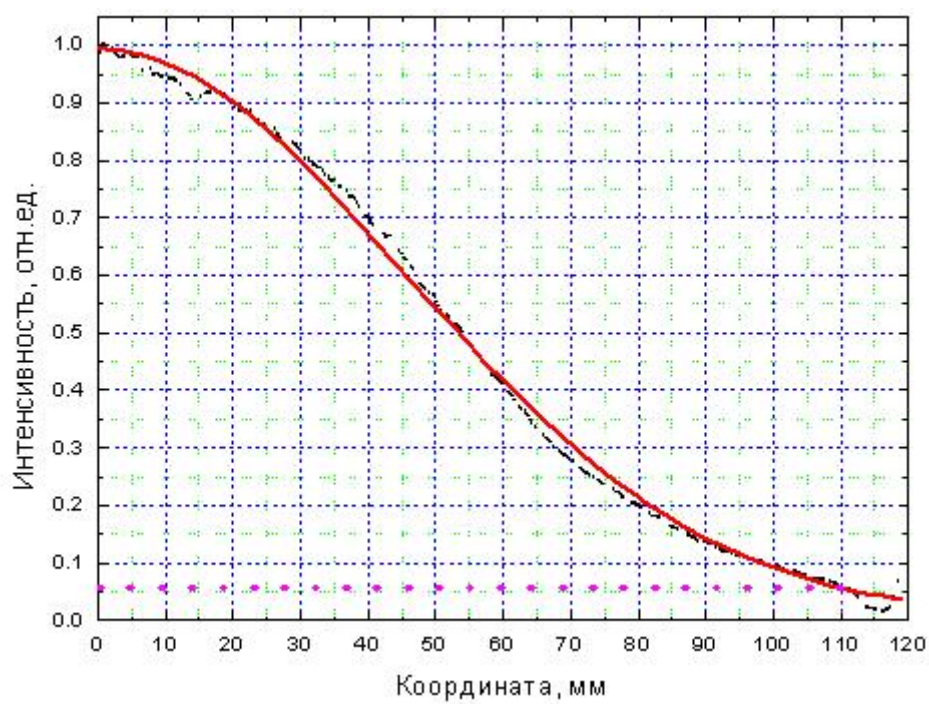


Рис. 5. Профиль протонного пучка.

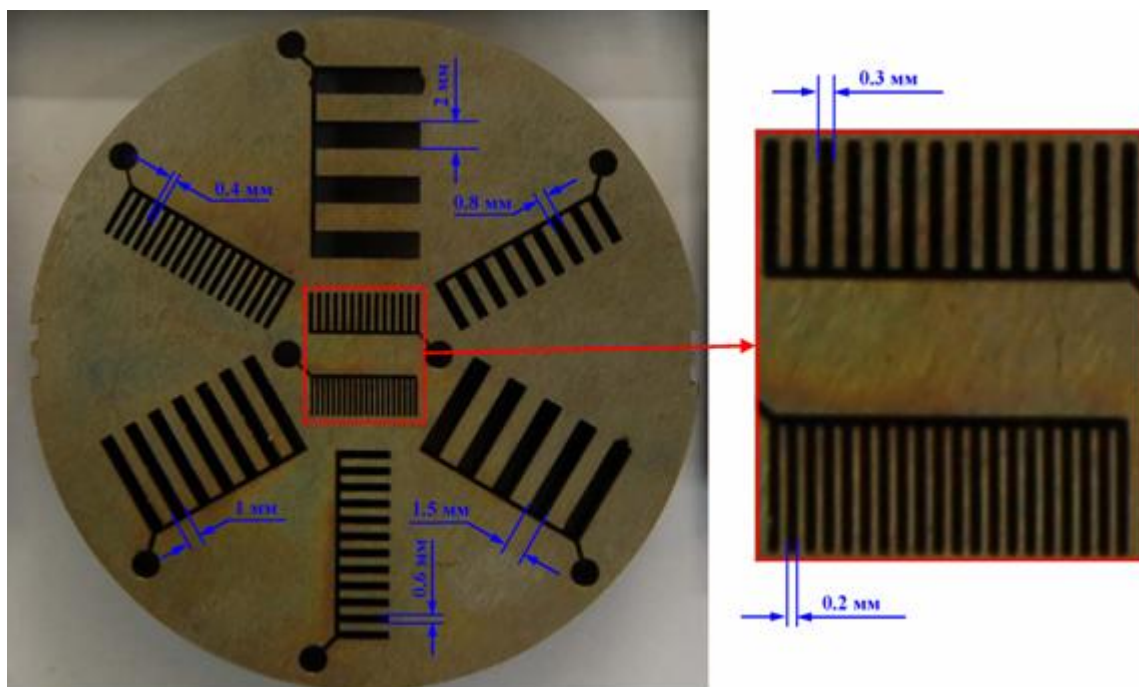


Рис. 6. Мира для измерения ЧКХ радиографической системы (7.8 г/см^2 , восемь полей).

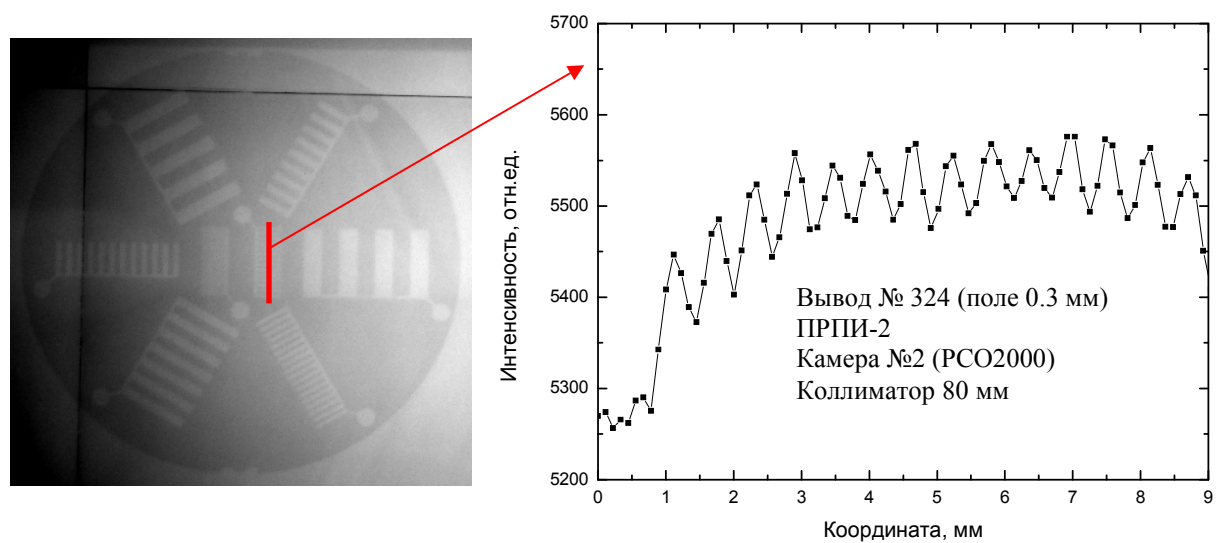


Рис. 7. Протонограмма миры для измерения ЧКХ (7.8 г/см^2)
на фоне свинцовой преграды 170 г/см^2 .

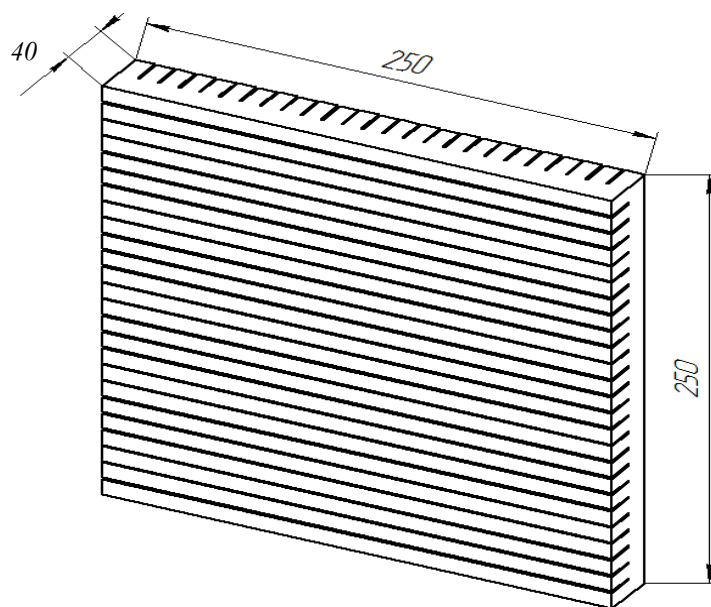


Рис. 8. Тест-объект "Решетка".

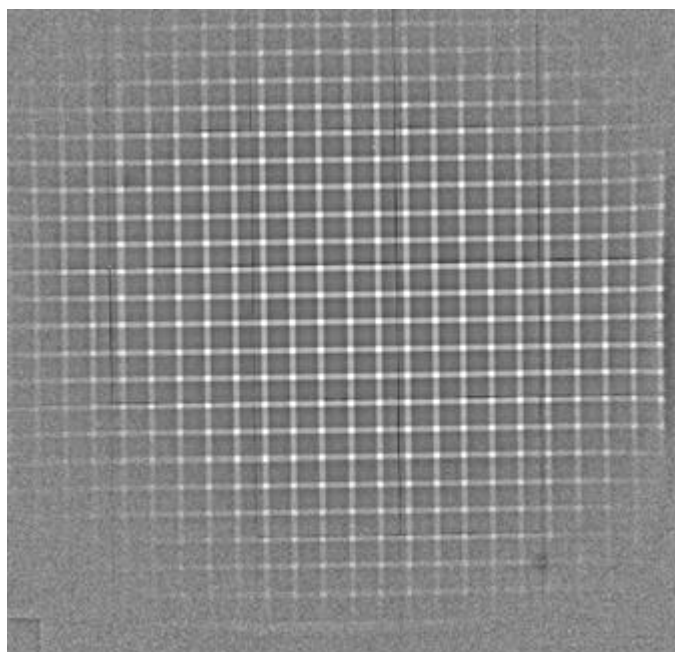


Рис. 9. Протонограмма тест-объекта “Решетка” после обработки частотным фильтром.

Из рис. 9 видно, что диаметр поля обзора составляет не менее 220 мм.

Измерение и настройка передающей матрицы квартетов осуществлялась различными методиками. В результате установлено, что лучшее разрешение при регистрации объектов имеет место при токах линз квартетов 570 А. Была произведена настройка собственно оптического тракта регистрации изображений. По результатам измерений сделан вывод о наличии отрицательной дисторсии изображений. Кривизна линий в центральной части кадра не превышает 0,2 мм, на периферии кадра - 0,5 мм.

Система многокадровой регистрации настроена на резкость с использованием оптической миры, расположенной в плоскости сцинтиллятора (рис. 10). Выполнена оценка частотно-контрастных характеристик (рис. 11). Значение контраста 5% достигается при частоте 2 пары линий на миллиметр.

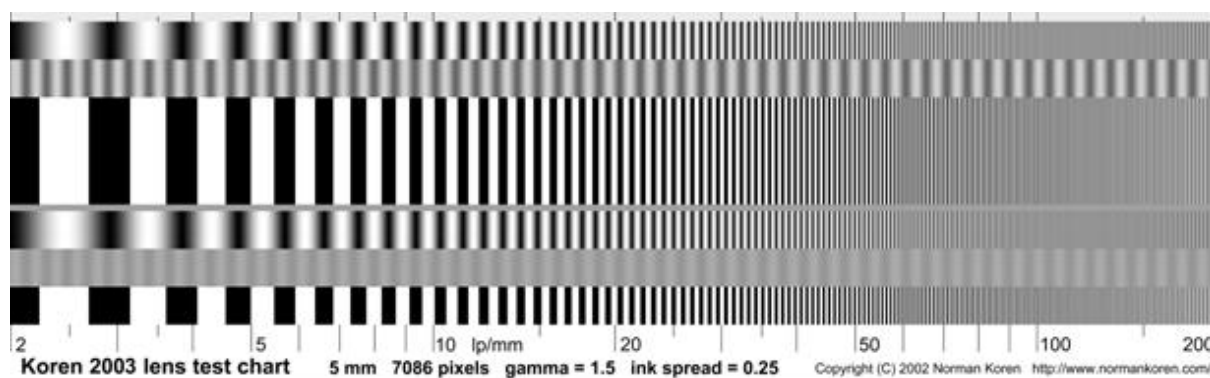


Рис. 10. Изображение оптической миры для настройки на резкость системы многокадровой регистрации.

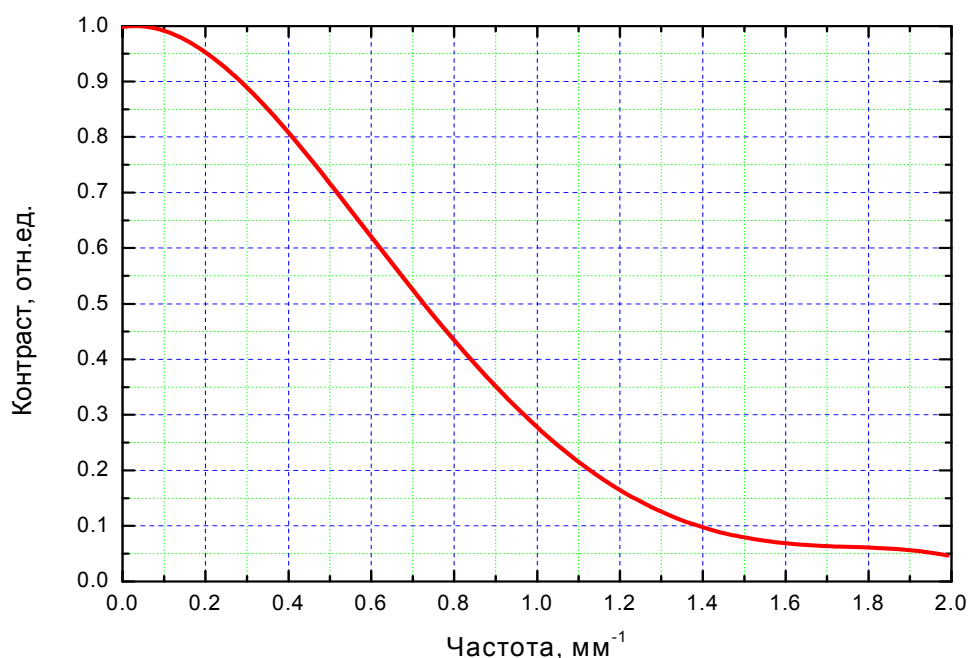


Рис. 11 Контрастнoчастотная характеристика цифрового регистратора.

Вывод пучка системой многооборотного вывода

Многооборотная система вывода позволяет иметь длительность экспозиции в диапазоне 20–50 мкс. На рис. 12 приведена осциллограмма пятиоборотного вывода девяти сгустков. Полная длительность вывода составляет 25 мкс. На рис. 13 приведено изображение протонного пучка, а на рис. 14 – изображение тест-объекта “Решетка” от одного микросгустка.

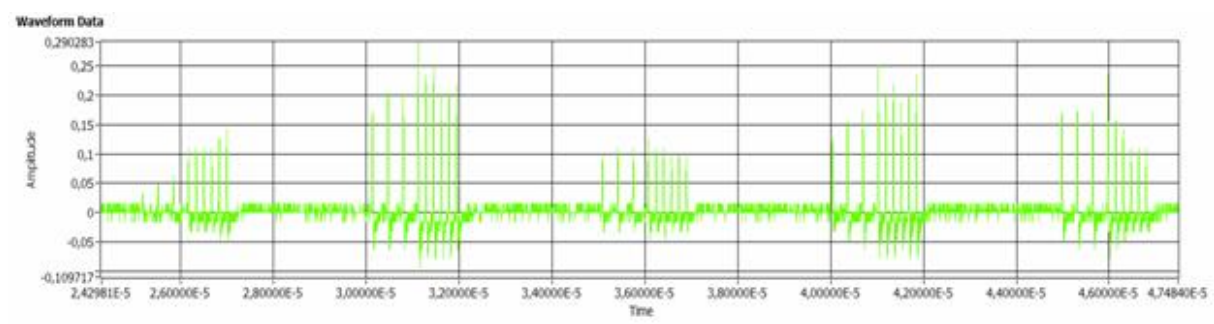


Рис. 12. Осциллограмма сигнала токового детектора системы регистрации протонных изображений при многооборотном выводе.

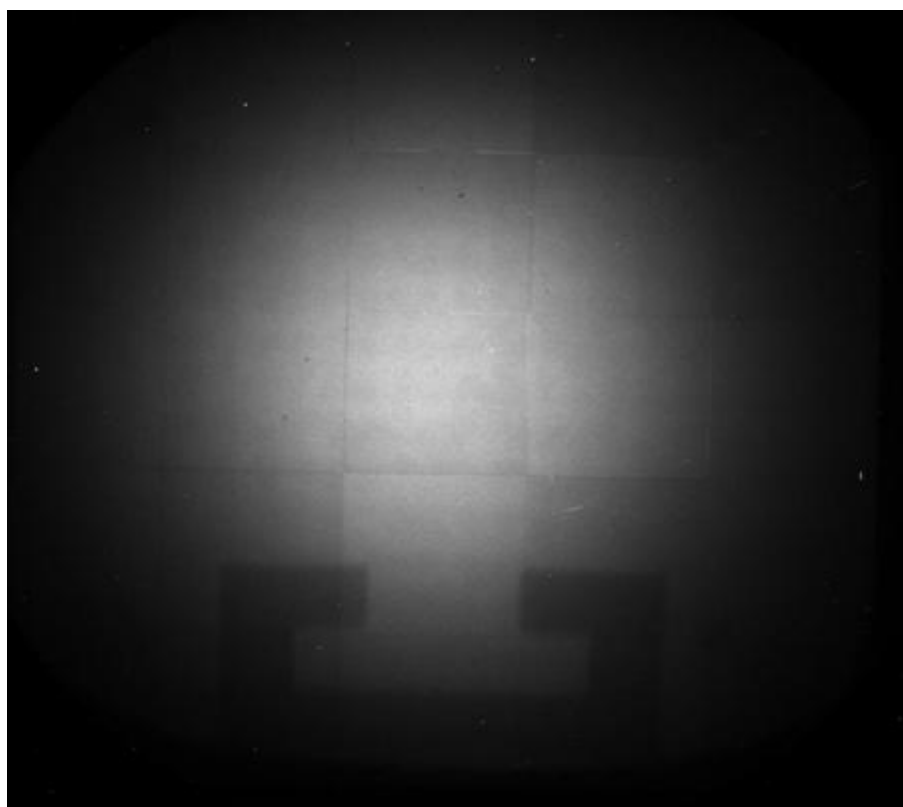


Рис. 13. Изображение протонного пучка одного микросгустка при многооборотном выводе.

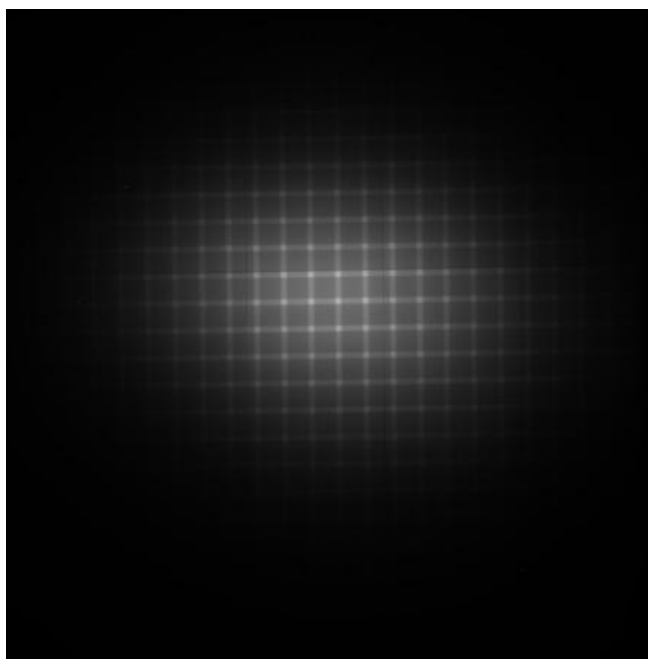


Рис. 14. Изображение тест-объекта “Решетка” от одного микросгустка.

Изображения профилей на профилометрах ПРГК при многооборотном выводе приведены на рис. 15. На рис. 16 показан участок ПРГК после оконечного бокса.

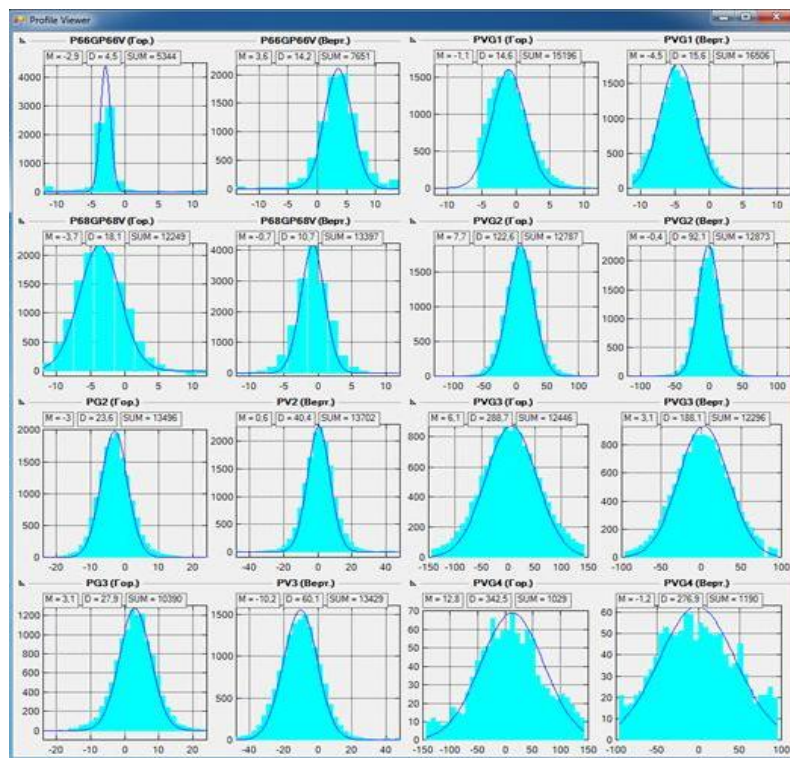


Рис. 15. Профили пучка на профилометрах ПРГК при многооборотном выводе.



Рис. 16. Участок ПРГК после оконечного бокса.

Заключение

Протонный радиографический комплекс на синхротроне У-70 ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ “Курчатовский институт” доказал свою работоспособность при двух режимах быстрого вывода пучка протонов, одно- и много-оборотном. Облучающий тест-объекты пучок успешно согласован с первым квартетом. Матрицы квартетов равны минус единице. Диаметр поля обзора составляет не менее 220 мм. Выполнена регистрация протонных радиографических изображений на системах многокадровой регистрации во всех трех плоскостях регистрации изображений. Выполнено измерение размытия границы на изображениях объекта при перепаде толщин до 350 г/см^2 . Полученные результаты подтверждают соответствие систем формирования и регистрации протонных радиографических изображений исходным требованиям для протонного радиографического комплекса. Новый экспериментальный научно-технический комплекс расширяет возможности использования Ускорительного комплекса У-70 для прикладных исследований.

В заключение авторы приносят благодарность коллегам из РФЯЦ-ВНИИЭФ (г. Саров Нижегородской области) за предоставленные протонные радиографические изображения объектов.

Список литературы

- [1] Максимов А.В., Тюрин Н.Е., Федотов Ю.С. Оптическая система протонной облучательной установки на ускорителе У-70 ГНЦ ИФВЭ. // ЖТФ, 2014, том 84, вып. 9, с. 132-138.
- [2] Баранов В.Т., Татаренко В.М., Федотов Ю.С. и др. – Препринт ИФВЭ 92-118. Протвино, 1992, с. 24.
- [3] Антипов Ю.М., Афонин А.Г., Василевский А.В. и др. Радиографическая установка ускорителя протонов с энергией 70 ГэВ ГНЦ ИФВЭ. // ПТЭ, 2010, №3, с. 1-8.
- [4] Антипов Ю.М., Афонин А.Г., Гусев И.А. и др. Протонная радиография – новый метод и его реализация. // АЭ, т. 114, вып. 5, май 2013, с. 288-292.
- [5] 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.
- [6] 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.

Рукопись поступила 22 января 2015 г.

А.И. Андриянов и др.

Ввод в эксплуатацию комплекса ПРГК на ускорителе У-70 ГНЦ ИФВЭ.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

Подписано к печати	02.02.2015.	Формат	$60 \times 84/16$.	Цифровая печать.
Печ.л.	1.	Уч. – изд.л.	1,44.	Тираж 80.
			Заказ 5.	Индекс 3649.

ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт»
142281, Московская область, г. Протвино, пл. Науки, 1

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

Индекс 3649

ПРЕПРИНТ 2015-3,
ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт», 2015
