



**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»**
Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова
Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»

Препринт 2024–13

А.В. Максимов, С.В. Авраменко, Н.Е. Воронков, Л.И. Копылов,
М.П. Овсиенко, В.Д. Рудько

Разработка магнитооптических режимов и обеспечение вывода протонного пучка для радиографического комплекса ПРГК-100

Протвино 2024

Аннотация

Максимов А.В. и др. Разработка магнитооптических режимов и обеспечение вывода протонного пучка для радиографического комплекса ПРГК-100: Препринт НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ 2024–13. – Протвино, 2024. – 9 с., 7 рис., 1 табл., библиогр.: 4.

Представлены результаты разработки магнитооптических режимов и обеспечения вывода протонного пучка для радиографического комплекса ПРГК-100. Магнитная оптика канала транспортировки обеспечивает размеры протонного пучка от 30 до 240 мм в точках регистрации радиографических изображений, что расширяет функциональные возможности комплекса ПРГК-100 и спектр проводимых исследований. Обеспечен вывод протонного пучка в диапазоне энергий 30÷60 ГэВ.

Abstract

Maximov A.V. et al. The development of magnetic optic modes and proton extraction for the radiographic facility PRGK-100: NRC «Kurchatov Institute» – IHEP Preprint 2024–13. – Protvino, 2024. – p. 9, fig. 7, tables 1, refs.: 4.

The results of development of magnetic optic modes and proton extraction for the operational radiographic facility PRGK-100 are presented. The beam transport channel allows proton beam sizes from 30 to 240 mm, which provides expansion of functional capabilities of the PRGK-100 complex and the range of conducted research. Proton beam extraction in the energy range of 30÷60 GeV is provided.

Введение

Импульсная протонная радиография является мощным инструментом для изучения широкого спектра быстропротекающих явлений и структуры объектов большой плотности. На базе ускорительного комплекса У-70 создан протонный радиографический комплекс ПРГК-100 для систематических исследований быстропротекающих процессов [1,2]. В данной работе представлены результаты по повышению функциональных возможностей комплекса ПРГК-100, в частности, по разработке магнитооптических режимов, используемых для получения пучка требуемых размеров, и обеспечению вывода протонного пучка в диапазоне энергий 30÷60 ГэВ для широкого спектра исследований.

Канал транспортировки протонного пучка

В 2014 г. в НИЦ «КИ» - ИФВЭ введена в эксплуатацию протонографическая установка ПРГК-100 [1]. Магнитооптическая структура комплекса ПРГК-100 включает канал транспортировки пучка (канал инъекции - КИ) от протонного синхротрона У-70 и собственно элементы ПРГК-100, состоящие из трех квартетов квадрупольных линз. Каждый квартет обеспечивает минус единичное преобразование координат частиц пучка в радиальной и вертикальной плоскостях движения. Исследуемый объект располагается после первого квартета линз.

Схема быстрого вывода пучка подробно описана в [1,2]. Пучок выводится за пределы вакуумной камеры ускорителя в 66 прямолинейном промежутке синхротрона У-70 (рисунок 1). Регулярная часть канала инъекции начинается с 68 прямолинейного промежутка.

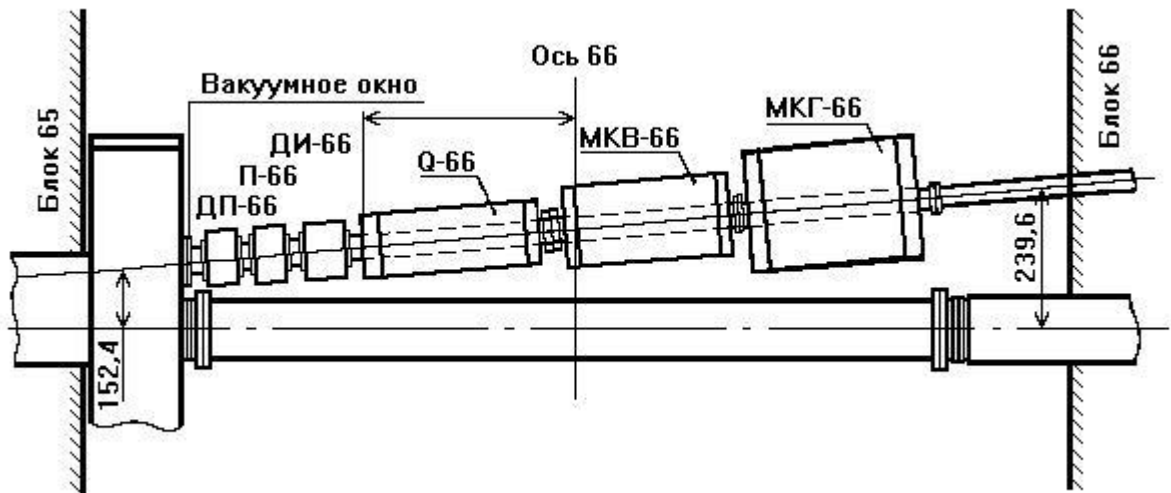


Рис. 1. Расположение оборудования вывода в ПП66

Расположение магнитооптических элементов схематически представлено на рисунке 2.

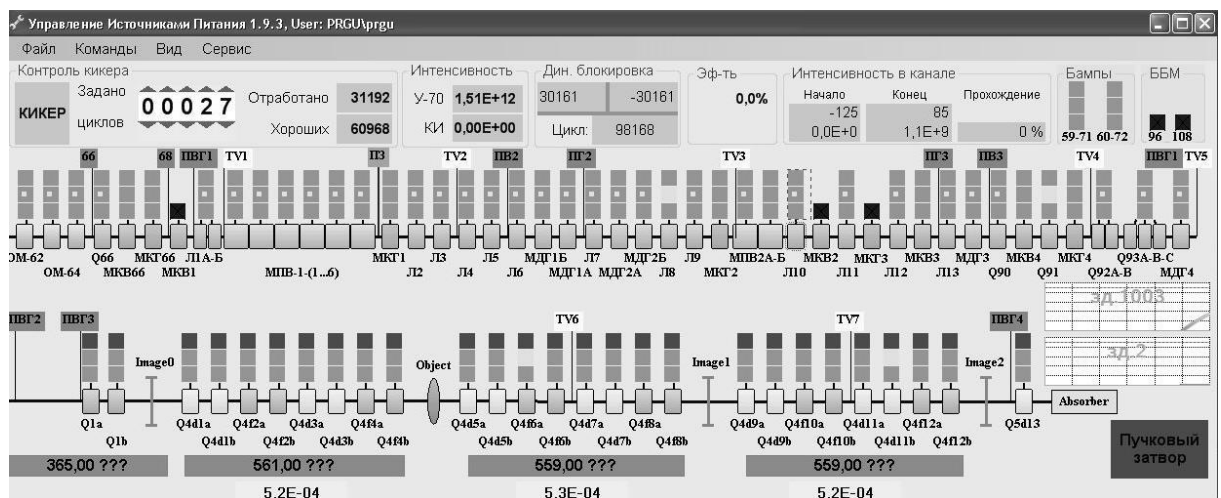


Рис. 2. Скриншот программы управления источниками питания магнитооптических элементов комплекса ПРГК

Магнитооптическое оборудование КИ состоит из 76 элементов, набор диагностического оборудование состоит из 10 профилометров и 7 телевизионных камер. На рисунке 3 приведен пример изображений пучка на профилометрах КИ и на входе ПРГК-100

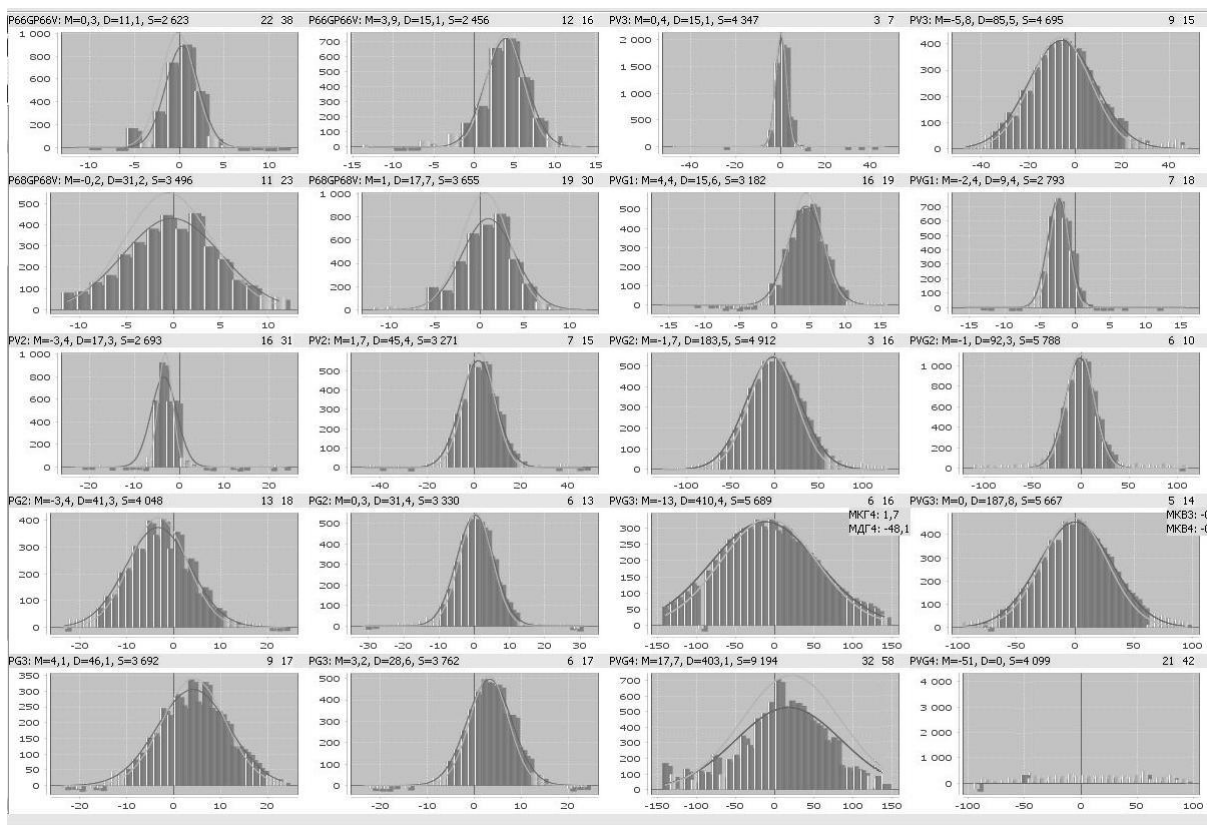


Рис. 3. Пример профилей пучка на профилометрах КИ

Для исследований на радиографическом комплексе ПРГК-100 с использованием различных объектов требуются размеры пучка в широком диапазоне от 30мм до 240мм. Для выполнения этих условий требуется разработка соответствующих магнитооптических режимов, а также знание поперечных фазовых характеристик пучка на входе в канал.

Определение поперечных фазовых характеристик пучка на входе в канал

В процессе вывода, протонный пучок проходит зону нелинейных полей блоков № 65, 66 и 67. По этой причине, расчет параметров поперечных фазовых характеристик (эмиттанс, функции β , α) при трэкинге массива частиц на этом участке может быть не вполне точен.

Развитая система диагностики в канале позволяет уточнить (определить) поперечные фазовые характеристики пучка на входе в канал инжекции в б8 промежутке. Здесь расположен первый профилометр ПП68.

Расчеты исходных параметров пучка выполним методом наименьших квадратов с использованием профилометра ПП68 и N следующих профилометров канала ($N \geq 2$). Тогда: $\beta_i = T_{i,1}^2 \beta_0 - 2T_{i,1} T_{i,2} \alpha_0 + T_{i,2}^2 \gamma_0$, где $i=1..N$ (индекс 0 относится к ПП68), β_i – горизонтальная или вертикальная β -функция пучка в месте расположения i-го профилометра, $T_{i,1} T_{i,2}$ – члены горизонтальной или вертикальной i-той матрицы передачи от ПП68 до i-го профилометра, $\beta_0 \alpha_0 \gamma_0$ – Twiss – функции исходного пучка.

Или в переменных: $\mathbf{V} = \varepsilon \boldsymbol{\beta}$, $\mathbf{A} = \varepsilon \boldsymbol{\alpha}$, $\mathbf{G} = \varepsilon \boldsymbol{\gamma}$, где ε – эмиттанс пучка, имеем:

$B_0 = R_0^2$, $D_i = R_i^2 - T_{i,1}^2 R_0^2 = -2T_{i,1} T_{i,2} A_0 + T_{i,2}^2 G_0$ где R_i – полуразмеры пучка по горизонтали или по вертикали на i-том профилометре. Вводя новую матрицу \mathbf{M} размером $2*N$ имеем: $M_{i,1} = -2*T_{i,1}*T_{i,2}$ $M_{i,2} = T_{i,2}$ В соответствии с МНК, решение относительно переменных A_0 и G_0 имеет вид:

$$\begin{pmatrix} A_0 \\ G_0 \end{pmatrix} = (\mathbf{M}^T \mathbf{M})^{-1} \mathbf{M}^T * \mathbf{D}$$

Эмиттанс определяется как $\varepsilon = \sqrt{B_0 G_0 - A_0^2}$.

Настройка магнитно-оптической системы для обеспечения требуемых размеров пучка на объекте

Определенные таким образом параметры являются исходными для расчета магнитооптических режимов с использованием программы TRANSPORT. Получение требуемых размеров на объекте достигается изменением режимов квадрупольных линз последнего в КИ (перед магнитооптической структурой ПРГК-100) квартета. В случае, если расчетный режим не удовлетворяет по каким-либо критериям (например, токи линз выходят за ограничения или требуется изменить знак фокусировки линзы) для корректировки размера пучка в расчет добавляются другие линзы КИ.

На рисунках 4 и 5 приведены изображения пучка в точке регистрации с диаметром пучка ≈ 240 мм и 30мм.

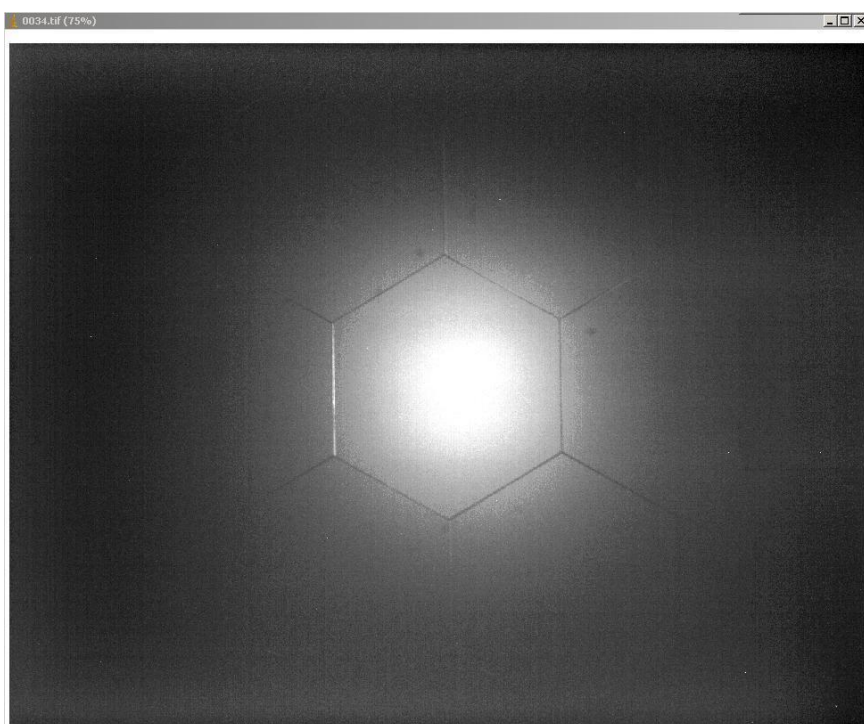


Рис. 4. Протонограмма пучка на объекте. Диаметр пучка 240 мм

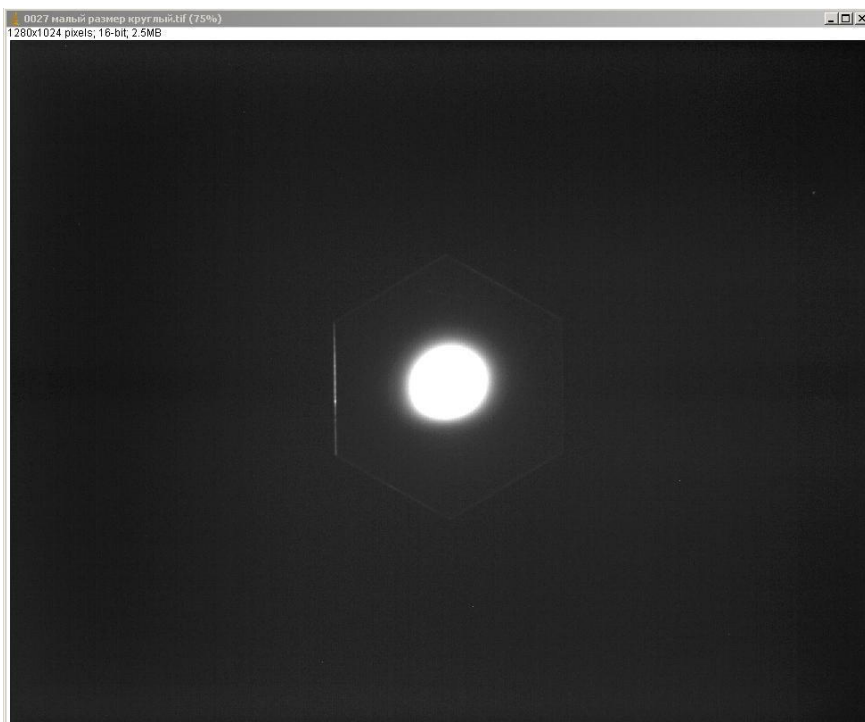


Рис. 5. Протонограмма пучка на объекте. Диаметр пучка 30 мм

Обеспечение вывода протонного пучка в диапазоне энергий от 30 до 60 ГэВ

Основной режим работы радиографического комплекса ПРГК-100 осуществляется на энергии 50 ГэВ. Для выполнения исследования на очень массивных объектах (до $\sim 350 \text{ г/см}^2$) в целях улучшения пространственного разрешения целесообразно увеличить энергию протонов. В этих случаях осуществляется вывод пучка при энергии 60 ГэВ. Параметры магнитооптических элементов системы быстрого вывода, КИ и линз комплекса ПРРГК-100 это позволяют сделать. Единственное ограничение для вывода при энергии 60 ГэВ состоит в том, что малые размеры пучка на объекте ($\sim 30\text{мм}$) не удастся получить в силу ограничений на предельные токи линз КИ.

С другой стороны, вывод пучка при меньших энергиях $\sim 20\div 40$ ГэВ представляет интерес, т.к. при такой энергии возможно обеспечить двукратный вывод пучка. Это позволяет расширить функциональные возможности комплекса ПРГК-100, в частности, увеличить общее время регистрации динамических процессов до $10\div 50$ мкс.

Двукратный вывод пучка на энергии 30 ГэВ

Двукратный вывод основан на том, что 10 секций кикер-магнита КМ16 [3,4] могут быть разделены по времени срабатывания: сначала работают первые 5 модулей и осуществляется вывод первой половины сгустков, вторые 5 модулей срабатывают через время кратное нескольким оборотам и выводится вторая половина сгустков.

В таблице 1 приведены некоторые параметры кикер-магнита КМ16.

Таблица 1

Параметр	Значение
Количество секций	10
Длина одной секции (м)	0.3
Рабочее напряжение (кВ)	50
Значение магнитного поля (Тл)	0.06
Количество выводимых сгустков	1÷29

На рисунке 6 приведены расчетные зависимости возможности вывода пучка 5-ю модулями для разной энергии пучка.

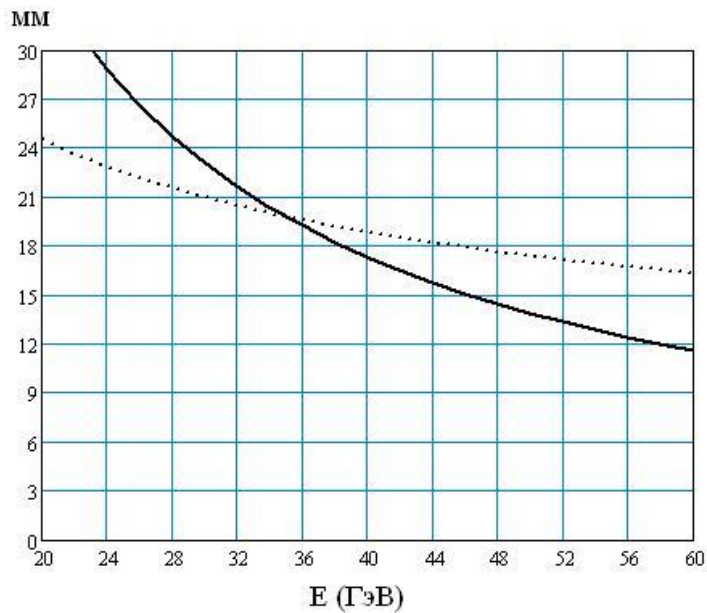


Рис. 6. Сплошная линия – отклонение пучка кикер-магнитом на ОМ62 в зависимости от энергии пучка
Пунктирная линия – размер пучка+ толщина перегородки ОМ62 в зависимости от энергии пучка

Вывод пучка 5-ю модулями возможен при условии, что отклонение пучка кикер-магнитом достаточно для переброса пучка через перегородку ОМ62, т.е. при $E \leq 32 \div 33$ ГэВ.

Двукратный вывод пучка реализован на энергии $E=30$ ГэВ. На рисунке 7 представлена временная структура выведенного пучка при двукратном срабатывании КМ-16. Сгустки **1** и **10** выведены на первом обороте, сгустки **16** и **27** на втором обороте. Полная длительность вывода (от первого до последнего сгустка) составляет ~ 10 мкс.

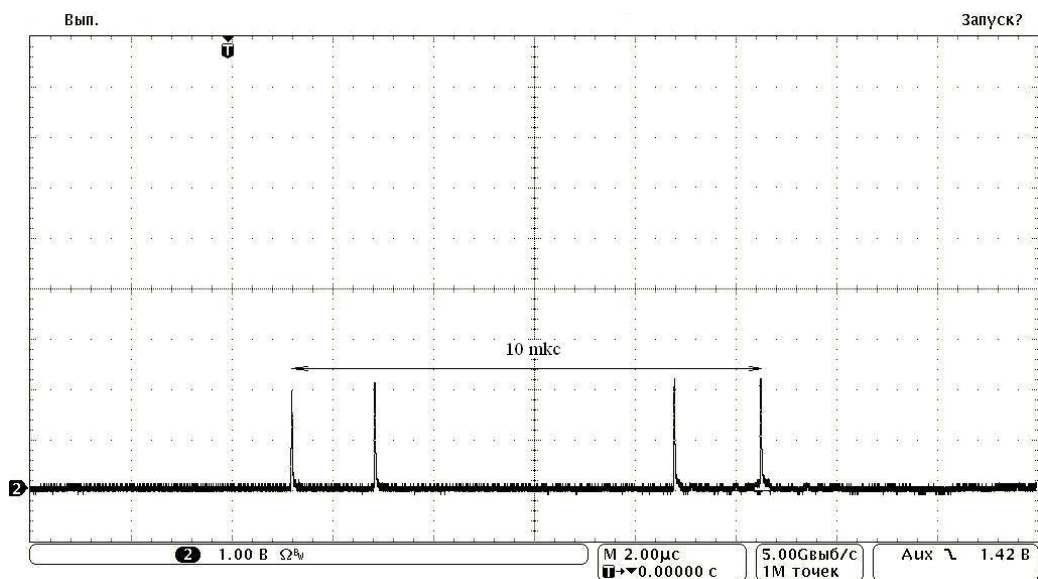


Рис. 7. Вывод пучка при двукратном срабатывании KM16
 нижний луч - сигнал с трансформатора тока в канале инъекции
 заполнение сгустков в У-70 => 1,10,16,27

Заключение

Представлены результаты работ по повышению функциональных возможностей комплекса ПРГК-100 в части разработки магнитооптических режимов для получения размеров пучка в широком диапазоне и обеспечения вывода протонного пучка в интервале энергий 30÷60 ГэВ.

Авторы выражают благодарность Н.Е. Тюрину за поддержку данной работы.

Список литературы

- [1] А.И. Андриянов, А.Г. Афонин и др. «Ввод в эксплуатацию комплекса ПРГК на ускорителе У-70 ГНЦ ИФВЭ», Препринт ИФВЭ 2015-3, Протвино, 2015 г.
- [2] А.В. Максимов, Н.Е. Тюрин, Ю.С. Федотов «Оптическая система протонной облучательной установки на ускорителе У-70 ГНЦ ИФВЭ», ЖТФ, 2014, том 84, выпуск 9, стр. 132 – 138.
- [3] В.Н. Андреев, О.В. Курнаев, В.А. Сычев, Ю.Д. Трофимов, «Развитие системы ударных магнитов на ускорителе ИФВЭ», Препринт ИФВЭ 82-72, Серпухов, 1982.
- [4] А.В. Максимов, М.П. Овсиенко, В.Д. Раев, В.Д. Рудько «Развитие ударной системы кикер-магнита КМ16 ускорителя У-70», Препринт ИФВЭ 2022-12, Протвино, 2022.

Рукопись поступила 22 октября 2024 г.

А.В. Максимов и др.

Разработка магнитооптических режимов и обеспечение вывода протонного пучка для радиографического комплекса ПРГК-100.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

Подписано к печати 28.10.2024 Формат 60 × 84/16. Цифровая печать.
Печ.л. 0,9. Уч.–изд.л. 1. Тираж 60. Заказ 11. Индекс 3649.

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

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

Индекс 3649

ПРЕПРИНТ 2024-13,
НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, 2024
