

## ВЫБОР ОПТИКИ ВТОРЫХ КАНАЛОВ ВЫВОДА ПУЧКА НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСКОРИТЕЛЯХ ННЦ ХФТИ

*И.С. Гук, А.Н. Довбня, С.Г. Кононенко*

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,  
Харьков, Украина*

*E-mail: guk@kipt.kharkov.ua*

Технологические ускорители электронов ННЦ ХФТИ ЛУ-10 и «ЭПОС» активно используются для решения многих задач в области радиационных технологий. Для расширения круга задач и улучшения условий облучения на этих установках в связи с модернизацией ускорителей предполагается создание вторых каналов вывода пучка. В работе обсуждаются проблемы, возникающие при проектировании этих каналов. Проведен анализ по различным критериям и выбраны наиболее эффективные варианты с учётом требований возможных заказчиков пучка.

### ВВЕДЕНИЕ

Технологические ускорители, используемые для радиационной обработки различных изделий и материалов, обычно имеют большой энергетический разброс. Для формирования пучков на выходе таких ускорителей обычно используются развертка пучка в пространстве с помощью импульсных магнитов и других устройств. Для ускорителей электронов с энергией до 5 МэВ и при близком расположении облучаемых изделий поворот и транспортировка пучков разработаны для многих вариантов устройств (см., например, [1, 2]). Для некоторых задач понадобился поворот частиц на 90 градусов [3, 4].

В случае больших энергий пучка задача несколько усложняется, поскольку для поворота пучка необходимы магниты с большими полями. Разброс частиц в ускорителях довольно большой, поэтому ускорители обычно имеют один выход, на котором для увеличения размера в одном направлении используется сканирующий магнит [5].

В ННЦ ХФТИ для проведения работ по исследованию радиационной стойкости различных материалов, разработке новых радиационных технологий и проведению радиационной обработки больших партий изделий активно используются ускорители ЛУ-10, «ЭПОС» [6, 7]. В связи с проводимой модернизацией этих ускорителей, связанной с заменой ускоряющей структуры на частоту 2856 МГц с использованием клистронов VKS-8262F в качестве источников высокочастотной мощности и тиратронов CX1525a в модуляторах, ожидается улучшение стабильности параметров пучка и существенное увеличение мощности на выходе ускорителей. Рассматривается увеличение круга задач по радиационной обработке. Для этих работ предполагается создать на каждом из ускорителей дополнительный канал вывода пучка.

Рассмотрим особенности оптических систем этих каналов.

### 1. ДИНАМИКА ПОВЕРНУТОГО ПУЧКА НА УСКОРИТЕЛЕ ЛУ-10

Поскольку между параметрами существующего ускорителя [7] и оценками энергетического разброса пучка в ускорителе после модернизации [8] имеется

существенная разница, в оценках параметров пучка в будущем канале были использованы и те, и другие значения разброса.

В работе [9] был проведен детальный анализ геометрии возможных каналов вывода пучка на модернизируемом ускорителе. Существующий прямой канал вывода пучка останется основным каналом для работ по стерилизации и подвергнется незначительным изменениям, не связанным со смещением оси пучка. Для программ, аналогичных проведенному изучению поведения материалов для новых типов реакторов [10], необходимо разработать канал, на конце которого могла бы стационарно располагаться достаточно большая установка. Работа на этой установке должна выполняться на протяжении длительных сеансов в промежутках между сеансами на прямом канале. Второй выход должен располагаться на расстоянии не менее 1 м от прямого выхода, исходя из технологии сборки и обслуживания оборудования.

Были рассмотрены [9] различные варианты магнитооптических систем этого канала. В результате было показано, что простейшая схема, состоящая из поворотного магнита и квадрупольной линзы, давала возможность передавать без потерь пучок при энергетическом разбросе не более  $\pm 2\%$ . Апертура канала при этом составляла 50 мм.

Поскольку реальный энергетический разброс [7] в ускорителе может быть больше этой величины, было проведено дополнительное моделирование движения частиц в этом канале. Моделирование движения пучка проводилось методом трекинга электронов с помощью программы MAD X [11].

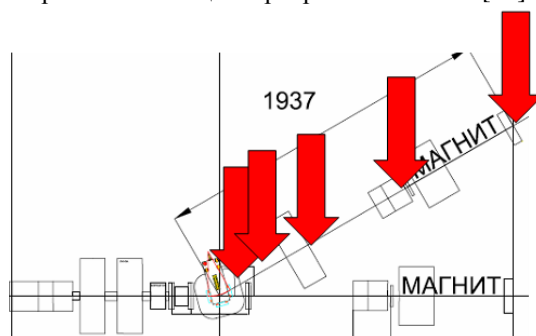


Рис. 1. Схема размещения оборудования на выходных каналах

На Рис. 1 показано расположение оборудования на каналах вывода пучка на ускорителе ЛУ-10. На выходе каналов предполагается разместить блок датчиков положения пучка и сканирующий магнит. На рисунке стрелками указаны места на тракте транспортировки пучка, для которых вычислялось сечение плотности пучка. Это: выход поворотного магнита, середина промежутка между магнитом и квадрупольной линзой, выход квадрупольной линзы, середина расстояния между линзой и выходом канала и на выходной фольге канала.

На Рис. 2 приведено сечение пучка на выходе ускорителя (начало канала,  $L=0$ ).

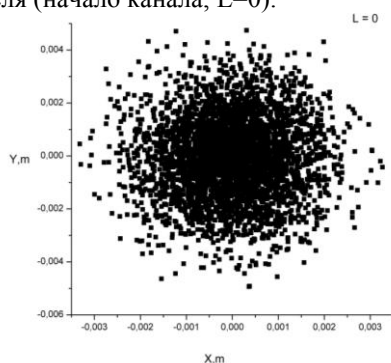
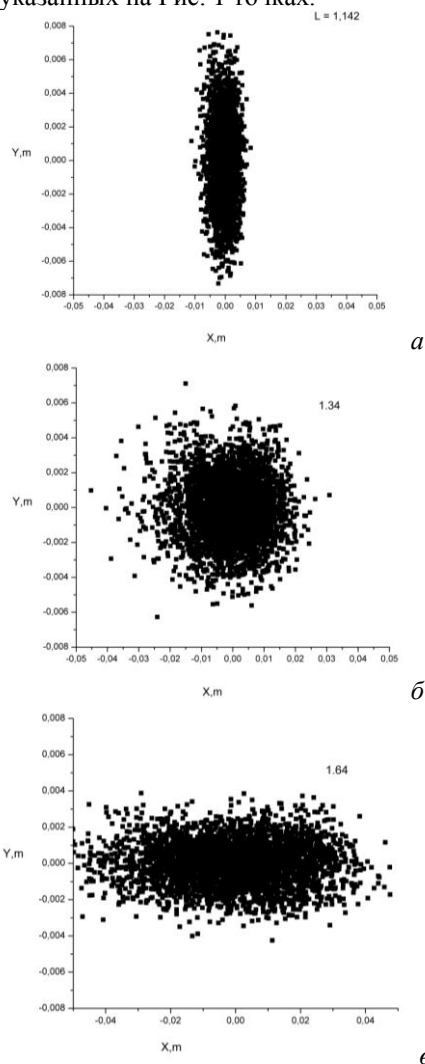


Рис. 2. Пучок на входе в канал

На Рис. 3 приведено распределение плотности пучка в указанных на Рис. 1 точках.



а

б

в

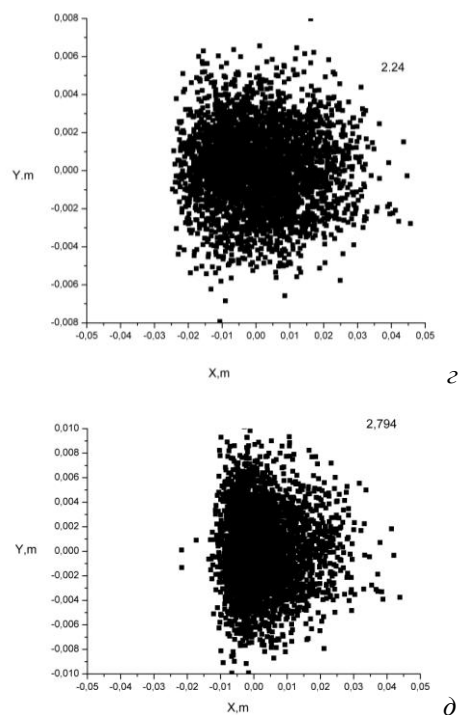


Рис. 3. Сечение пучка

На рисунках также приведено значение расстояния сечения пучка от выхода ускорителя ( $L, м$ ).

Параметры пучка на входе в систему [8]: среднеквадратичное значение вертикального и горизонтального размеров 1,5 мм, среднеквадратичное значение нормализованного эмиттанта 13 мм·мрад, энергия пучка 9,4 МэВ. Энергетический разброс, согласно работе [7], равен  $\pm 6\%$ .

Наибольший размер пучка достигается на выходе квадрупольной линзы (см. Рис. 3,в). Для транспортировки пучка через систему без потерь апертура линзы и канала должна быть больше 10 см. Горизонтальный размер пучка на выходной фольге ускорителя (см. Рис. 2,д) соответствует поперечным размерам камеры, использованной в работе [10], для размещения образцов. Для изменения размера пучка в другом направлении может быть использован сканатор, установленный на конце канала.

## 2. КАНАЛ НА УСКОРИТЕЛЕ «ЭПОС»

Несколько лет назад существующий прямой канал вывода пучка на ускорителе «ЭПОС» был модернизирован [12]. Система энергетического фильтра, установленная на канале, позволила улучшить стабильность параметров пучка на прямом выходе во всём диапазоне энергий.

На ускорителе появились новые задачи по радиационной обработке материалов электронным пучком с энергией 23 МэВ с потреблением пучка около 4000 часов в год с длительностью сеансов облучения до 360 часов. Необходимым условием для решения этих задач является изменение горизонтального направления движения пучка на выходе ускорителя на вертикальное. Это условие предполагается выполнить заменой существующего магнита энергетического фильтра [12] на магнит, позволяющий повернуть пучок вниз на 90 градусов [13]. При переходе на существующую программу облучения

магнит удаляется, а система фильтра устанавливается на прежнее место.

В работе [13] проанализированы проблемы, возникающие при создании этого канала. Их несколько.

Для поворота пучка на 90 градусов необходимо создать компактный магнит с полем около 0,5 Тл. Технология облучения должна претерпеть изменения в связи с большим энергетическим разбросом в пучке ускорителя при больших токах. Размер пучка на мишени, расположенной на уровне пола бункера, при существующем разбросе [12] равен 40 см вдоль дисперсии магнита и 1 см в поперечном направлении (по оценкам работы [13]). Равномерное облучение протяженных изделий возможно за счет механического перемещения в двух направлениях со смещением изделий в пространстве при изменении направления движения [13].

Магнит с необходимыми параметрами был разработан и изготовлен [14]. Общий вид магнита представлен на Рис. 4.

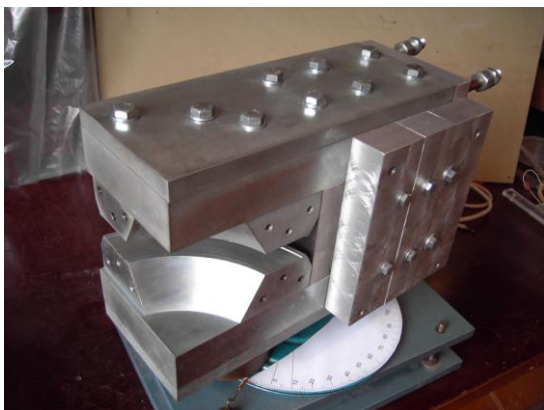


Рис. 4. Магнит поворотный

Магнит построен на основе магнитных элементов с постоянным полем, изготовленных из Nd-Fe-B-сплава. Ширина полюсных наконечников равна 50 мм. Поле посередине магнитной дорожки равно 0,51 Тл [14].

Измеренное распределение поля магнита вдоль траектории движения пучка представлено на Рис. 5.

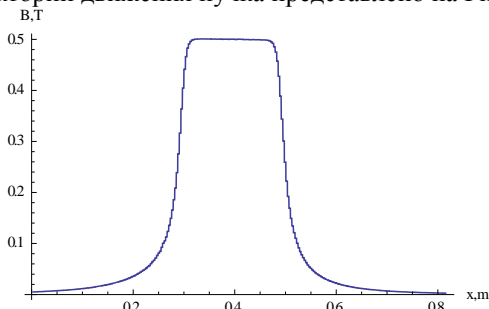


Рис. 5. Измеренное распределение поля вдоль траектории движения электронов

Из измеренных пространственных распределений поля в магните [14] были определены параметры, необходимые для расчёта распределения плотности электронного пучка на мишени с помощью программы MAD X.

Эффективная длина магнита, полученная из измерений (см. Рис. 5), равна  $(242 \pm 1,1)$  мм.

Интеграл от поля, необходимый для оценок вертикальной фокусировки в магните, можно получить,

интегрируя поле вдоль траектории  $s$  движения частиц в магните (см. Рис. 5):

$$FINT = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{B_y(s)(B_0 - B_y(s))}{gB_0^2} ds,$$

где  $g$  – вертикальная полувысота зазора магнита.

Для нашего магнита величина  $FINT$  оказалась равной 1,5.

Угол среза на входе в магнит равен +3 и -4 градуса на выходе магнита.

На Рис. 6 представлено распределение плотности частиц на мишени, рассчитанное с помощью программы MAD X для значения  $FINT=0$  (магнит с равномерным полем длиной, равной эффективной). Углы срезов равны 0.

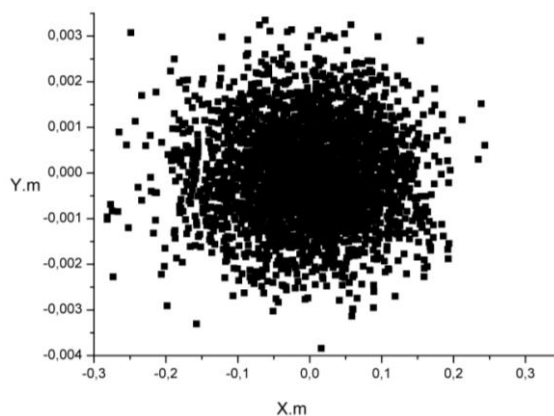


Рис. 6. Размеры пучка на мишени

Если учесть имеющиеся срезы, распределение станет несколько уже и подрастёт в высоту (Рис. 7), однако останется небольшим в этом направлении, не более 6 мм.

Если при моделировании движения частиц учесть полученное из экспериментальных данных значение параметра  $FINT$ , распределение плотности частиц существенно изменится (Рис. 8). Это моделирование подтверждает существенное значение величины этого параметра для вертикального (по отношению к плоскости орбиты) движения пучка в магните.

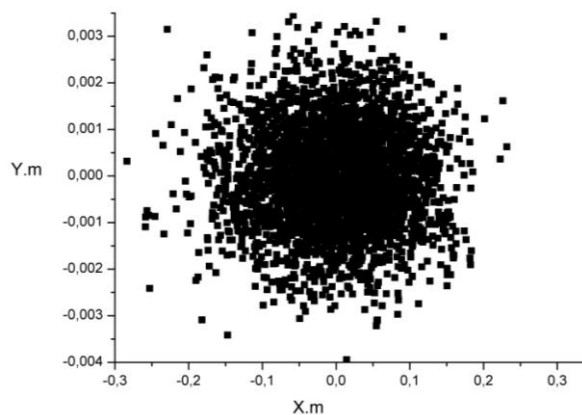


Рис. 7. Распределение плотности пучка

Для предварительных оценок размеров пучка использовалось значение  $FINT$ , равное 0,5 (см. работу [13]).

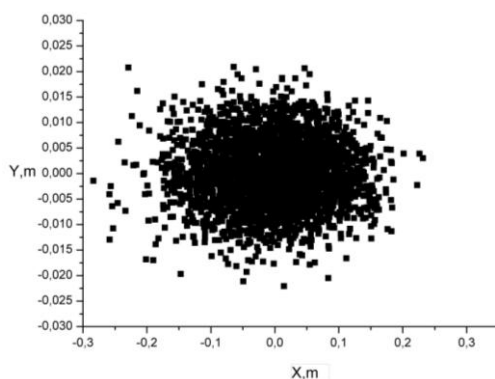


Рис. 8. Распределение плотности пучка при учёте реальных параметров магнита

Сравнение распределения плотности пучка на Рис. 8 с распределением на Рис. 6 и 7 показывает существенный рост размеров в направлении, перпендикулярном плоскости дисперсии.

### ВЫВОДЫ

Увеличение мощности выводимых пучков на технологических ускорителях после модернизации может существенно повлиять на размеры и расходимость пучка. Для уменьшения потерь частиц на повернутых каналах необходимо провести тщательное изучение динамики пучка в предположении реализации худших сценариев. При моделировании движения электронов необходимо учитывать реальные характеристики магнитного оборудования каналов.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В.Л. Ауслендер, В.В. Безуглов, А.А. Брызгин, Л.А. Воронин, В.А. Горбунов, М.В. Коробейников, В.Е. Нехаев, А.Д. Панфилов, В.С. Подобаев, В.О. Ткаченко, А.А. Тувик, Б.Л. Факторович. Импульсные линейные ускорители электронов серии ИЛУ производства Института ядерной физики им. Будкера // *Вестник НГУ. Серия "Физика"*. 2006, т. 1, в. 2, с. 91-97.
2. V.L. Auslender. ILU-type electron accelerator for industrial technologies // *Nuclear Instruments and Methods in Physical Research*. 1994, № В 89, р. 46-48.
3. В.Л. Ауслендер, Е.А. Бехтенов, А.А. Брызгин и др. Ахроматическая система поворота пучка электронов на 90 градусов в ускорителе ИЛУ-10 // *Сборник докладов Десятого международного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине*. М.: "ЦНИИатоминформ", 2001.
4. V.L. Auslender, A.V. Bulatov, L.A. Voronin, D.S. Kolesnikov, E.N. Kokin, G.S. Krainov, A.N. Lukin, A.M. Molokoedov, V.M. Radchenko, N.D. Romashko. *Technique of design and calculation of extraction devices for electron accelerators*. Budker INP 2004-27, Novosibirsk, 2004.
5. <http://www.corex-spb.ru/html/index.html>
6. Н.И. Айзацкий, В.Н. Борискин, А.Н. Довбня, А.И. Зыков, В.А. Кушнир, В.А. Попенко, В.А. Шендрик, Ю.Д. Тур. Линейные электронные ускорители ННЦ ХФТИ – исследования и развитие // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»*. 2003, № 2, с. 19-24.
7. V.I. Beloglasov, A.I. Zykov, E.S. Zlunitsyn, G.D. Kramskoi, G.L. Fursov. An electron linac producing beam power up to 15 kW // *Proc. of the 1996 EPAC*, 1996, v. 1, p. 798-800.
8. Н.И. Айзацкий, А.Н. Довбня и др. Ускоряющая система технологического ускорителя электронов // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»*. 2012, № 4, с. 45-49.
9. А.Н. Довбня, И.С. Гук, С.Г. Кононенко, А.С. Тарасенко. Выбор системы транспортировки пучка на ускорителе ЛУ-10 // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»*. 2013, № 6, с. 57-61.
10. А.С. Бакай, В.Н. Борискин, М.И. Братченко, Е.З. Биллер, П.А. Бутенко, В.А. Бочаров, В.Н. Верещака, А.Н. Довбня, С.В. Дюльдя, Ю.В. Горенко, Г.Г. Ковалев, В.А. Момот, О.А. Репихов, С.К. Романовский, А.Н. Савченко, В.В. Селезнев, В.И. Солодовников, В.И. Титов, А.В. Торговкин, В.В. Хандак, С.В. Шелепка, Г.Н. Цебенко. Облучение электронами образцов материалов ядерных реакторов нового поколения в сверхкритической водяной конвекционной петле // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»*. 2013, № 6, с. 230-234.
11. MAD – *Methodical Accelerator Design*; <http://mad.home.cern.ch/mad>.
12. В.Н. Борискин, И.С. Гук, А.Н. Довбня, Р.Н. Дронов, Г.Г. Ковалёв, С.Г. Кононенко, Л.К. Мякушко, А.О. Мыцыков, В.А. Попенко, Л.В. Репринцев, В.П. Ромасько, А.С. Тарасенко, В.И. Татанов, В.А. Шендрик, В.Н. Щербинин. Система энергетического фильтра для ускорителя «ЭПОС» // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»*. 2012, № 3, с. 39-43.
13. А.Н. Довбня, И.С. Гук, С.Г. Кононенко, Г.Г. Ковалёв, А.О. Мыцыков. Второй канал вывода пучка на ускорителе «ЭПОС» // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»*. 2014, № 3, с. 8-12.
14. М. Бовда, И.С. Гук, А.Н. Довбня, С.Г. Кононенко, В.Н. Лященко, А.О. Мыцыков. Дипольный магнит с постоянным полем для ускорителя «ЭПОС» // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»*. 2015, № 5, с. 13-17.

Статья поступила в редакцию 14.10.2015

## **OPTICS OF THE SECOND CHANNELS OF PARTICLES EXTRACTION ON TECHNOLOGICAL ACCELERATORS NSC KIPT**

*I.S. Guk, A.N. Dovbnya, S.G. Kononenko*

Technological electron accelerators LU-10 and «EPOS» in NSC KIPT are actively used for the solution of many problems in the field of radiation machining of materials. Modernisation of these accelerators imply making of the second channels of an extraction of particles. It will allow to dilate a circle of solved problems and to refine requirements to radiation processing of materials and products. Problems in designing of these channels are discussed. It was conducted analysis of the variants of the channels on the various criteria. The most effective option with the requirements of potential beam customers is selected.

## **ВИБІР ОПТИКИ ДРУГИХ КАНАЛІВ ВИВОДУ ПУЧКА НА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРИСКОРЮВАЧАХ ННЦ ХФТІ**

*I.S. Guk, A.M. Dovbnya, S.G. Kononenko*

Технологічні прискорювачі електронів ННЦ ХФТІ ЛУ-10 і «ЕПОС» активно використовуються для вирішення багатьох задач в області радіаційних технологій. Для розширення кола задач і поліпшення умов опромінення на цих установках у зв'язку з модернізацією прискорювачів передбачається створення других каналів виводу пучка. У роботі обговорюються проблеми, що виникають при проектуванні цих каналів. Проведено аналіз за різними критеріями й обрані найбільш ефективні варіанти з урахуванням вимог можливих замовників пучка.