

# ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ АНАЛИЗИРУЮЩЕГО МАГНИТА ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ ЛУ-10М

*И.С. Гук, С.Г. Кононенко, В.Н. Лященко, А.О. Мыцыков*

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

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

Рассмотрены проблемы создания магнита с постоянным полем для измерения энергии и спектра электронов на технологическом ускорителе электронов с энергией около 10 МэВ. Исследовано влияние параметров пучка электронов на распределение плотности частиц на выходе анализирующей системы. Проведено моделирование различных вариантов схемы и конструкции магнита.

## ВВЕДЕНИЕ

подавляющая часть технологических ускорителей электронов для радиационной обработки материалов и изделий не оснащается системами измерения энергии. Это связано как с достаточно большой стоимостью электромагнитного оборудования, необходимого для проведения таких исследований, так и достаточно малым временем использования этого оборудования в ходе обычных облучательных программ. Однако получение сертификата качества на ряд технологических процессов с использованием ускорителей может потребовать измерения средней энергии ускоренных электронов, а также контроля энергетического разброса электронов в пучке. С этой целью часто используются различные косвенные методы определения энергии (см., например, [1]). Однако информативность и точность определения параметров пучка этими методами значительно ниже, чем с помощью магнитных систем. Появление магнитных материалов с высокими магнитными свойствами позволяет создавать компактные магнитные устройства [2, 3], которые могут быть использованы для анализа параметров пучка. Использование этих материалов при разработке анализирующего магнита для энергии около 10 МэВ позволяет создать достаточно простое устройство с минимальной стоимостью и не требующее источника питания.

## 1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПУЧКА ЧЕРЕЗ МАГНИТ

Линейный ускоритель ЛУ-10 [4] в ННЦ ХФТИ много лет используется для технологической радиационной обработки материалов и изделий электронным пучком с энергией около 10 МэВ. Предполагаемые параметры пучка этого ускорителя [5] после модернизации систем представлены в Таблице.

С учетом этих параметров были рассмотрены варианты вывода пучка из ускорителя на различные физические программы [6]. На всех каналах конечным элементом является сканирующий магнит, предназначенный для развёртки пучка по вертикали. Как следует из размещения оборудования на прямом канале [6], анализирующий магнит может быть размещён перед фланцем сканатора. Минимальное расстояние от центра магнита до устройств, фиксирующих положение и профиль пучка, равно 0,8 м. Как следует из результатов работы [6], вертикальный

зазор магнита в месте установки может быть равным 25 мм, поскольку размеры пучка на выходе прямого канала не превышают 2 см. Наличие на выходе ускорителя дублета квадрупольных линз позволяет существенно уменьшить размер пучка в месте расположения анализирующего магнита.

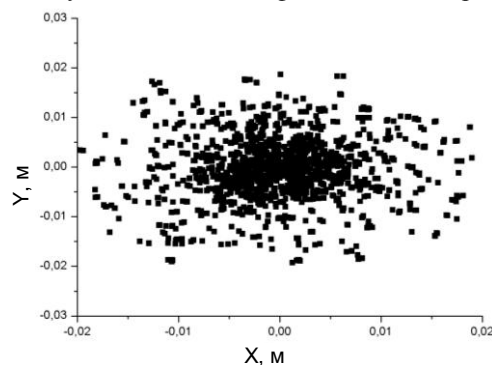
*Основные параметры пучка ускорителя ЛУ-10*

Ток пучка, А	0,389
Энергия в максимуме, МэВ	9,44
Энергетический спектр (99 % част.), %	51
Энергетический спектр на половине высоты, %	0,48
Диаметр (99 % част.), мм	6,8
Среднеквадратичный радиус, мм	1,5
Среднеквадратичный нормализованный эмиттанс, мм·мрад	13

Для оценки величины поля, которое может быть получено в магните, были использованы образцы постоянных магнитов, изготовленных из  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ -сплава. Размеры образцов – 30×24×12 мм. Магниты располагались в пространстве на расстоянии 25 мм. Максимальное значение поля, измеренное в медианной плоскости такого магнита, было близким к величине 0,3 Тл. Эта величина поля использовалась при моделировании движения пучка.

Рассмотренные выше параметры были взяты за основу при моделировании движения пучка электронов через анализирующий магнит. Моделирование движения пучка проводилось методом трекинга электронов с помощью программы MAD X [7].

На Рис. 1 представлено распределение плотности прямого пучка за выходной фольгой сканатора.



*Рис. 1. Плотность прямого пучка, выведенного через фольгу*

На Рис. 2 представлено распределение плотности пучка для магнита с эффективной длиной 2,4 см без вывала поля. Энергия в максимуме в расчётах равна 10 МэВ. На Рис. 3 приведено распределения пучка для магнита с более реалистичным распределением поля: параметр FINT равен 0,5 (см. [7]).

За фольгой центр распределения плотности пучка (см. Рис. 2 и 3) сместится относительно прямого пучка на 16,6 см.

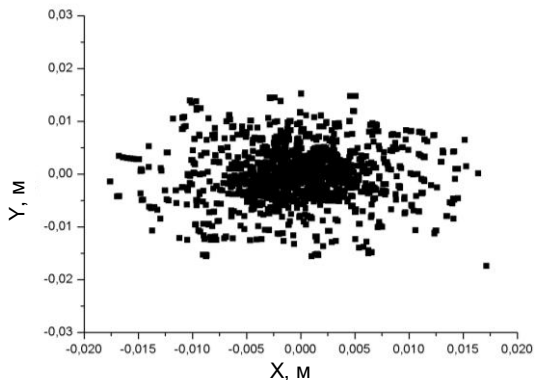


Рис. 2. Повёрнутый пучок для «идеального» поля

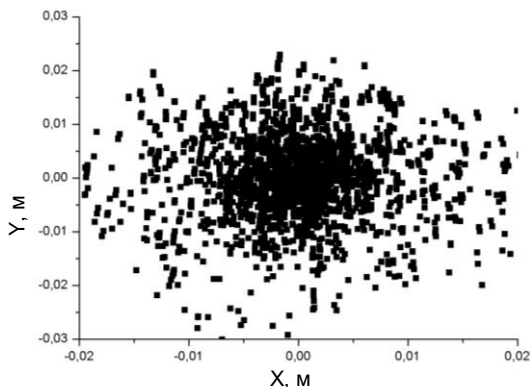


Рис. 3. Распределение плотности пучка для варианта распределения поля с  $FINT=0,5$

Существенное увеличение горизонтального размера пучка вызвано изменением фокусирующих свойств магнита.

На Рис. 4 представлено распределение пучка с теми же параметрами магнита, но с энергетическим разбросом в пучке, равным 0.

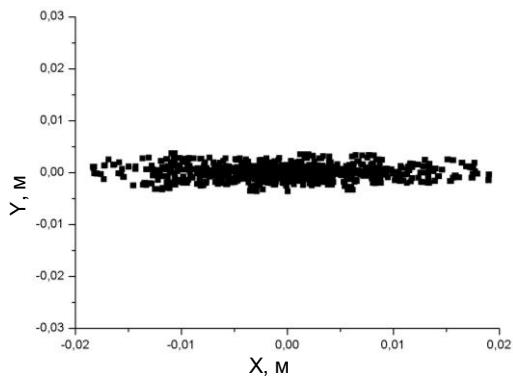


Рис. 4. Распределение плотности пучка при нулевом энергетическом разбросе

Распределение пучка для магнита с эффективной длиной 4,8 см представлено на Рис. 5.

Распределение для того же магнита со значением  $FINT = 0,5$ , представлено на Рис. 6.

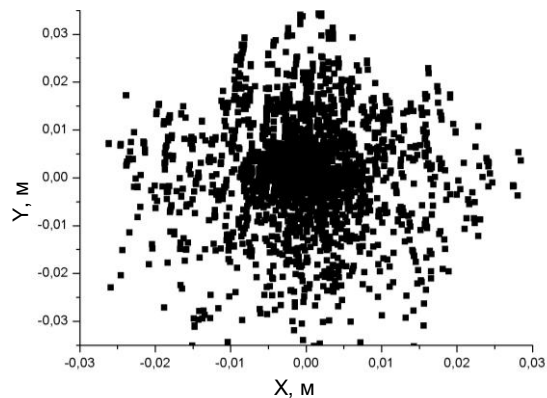


Рис. 5. Распределение плотности пучка для «идеального» магнита с эффективной длиной, равной 4,8 см

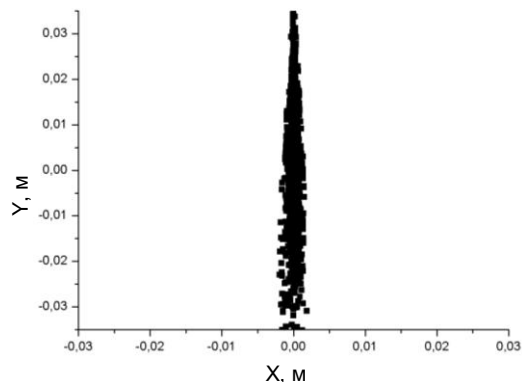


Рис. 6. Распределение плотности пучка,  $FINT=0,5$

На Рис. 7 представлено распределение пучка при энергетическом разбросе, равном 0.

Смещение центра пучка (см. Рис. 5 и 6) относительно прямого пучка составляет для такого магнита 32,44 см. Эта величина больше полуширины выходной фольги. Поэтому при дальнейшем моделировании мы ограничились использованием магнитов с размерами полюса  $30 \times 24$  мм.

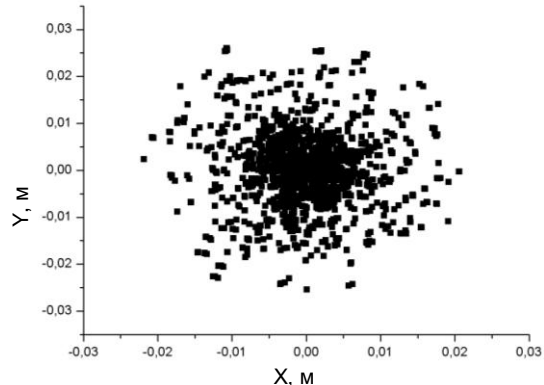


Рис. 7. Распределение плотности пучка при энергетическом разбросе, равном 0

Как видно из полученных распределений плотности пучка, по положению пучка за фольгой можно судить о величине энергии пучка и качественно оценить энергетический разброс в пучке. Энергетический разброс в пучке на выходе ускорителя (см. Таблицу) приводит к существенному изменению плотности пучка за выходной фольгой ускорителя. Вопрос об определении величины энергетического разброса требует дополнительного исследования.

## 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ МАГНИТА

В основу при моделировании была положена конструкция магнита броневого типа (Рис. 8). Постоянные магниты предполагается изготовить из сплава  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ , имеющего достаточно большое значение уровня намагниченности ( $B_r$  при моделировании 1,01 Тл). Этот сплав практически не изменяет магнитных свойств при облучении пучком электронов с энергией 10 МэВ и тормозным излучением такого пучка. Геометрические размеры магнитов –  $30 \times 24 \times 12$  мм. Зазор между полюсами не менее 25 мм. Внешние размеры магнитопровода –  $100 \times 70 \times 24$  мм. Магнитопровод предполагается изготовить из магнитомягкого сплава (СТЗ).

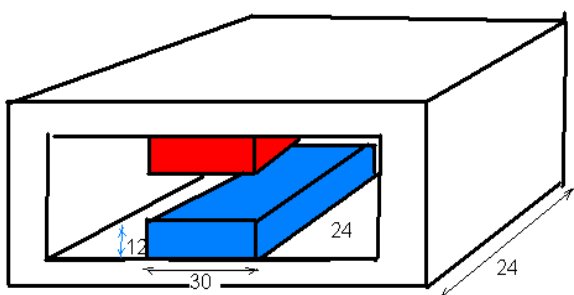


Рис. 8. Модель магнита, использованная для расчёта распределения поля. Красным и синим цветом обозначены магниты из сплава  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$

Результат моделирования распределения магнитного поля в медианной плоскости магнита представлен на Рис. 9.

Прежде всего, необходимо отметить, что рассчитанная величина поля в максимуме близка к величине поля, полученного нами при моделировании магнита без магнитопровода (см. также Рис. 10).

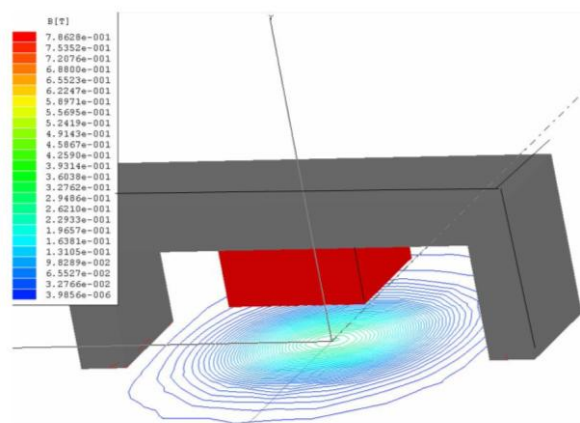


Рис. 9. Распределение поля в медианной плоскости магнита

Распределение поля в магните вдоль оси ускорителя представлено на Рис. 10.

Пространственное распределение поля в медианной плоскости магнита представлено на Рис. 11. Пучок влетает в магнит вдоль оси Y.

Магнит поворачивает 10 МэВ пучок электронов на угол 0,3 рад. Эффективная длина магнита при этом будет равна 33,6 мм.

Полевой интеграл 0,01 Тл·м.

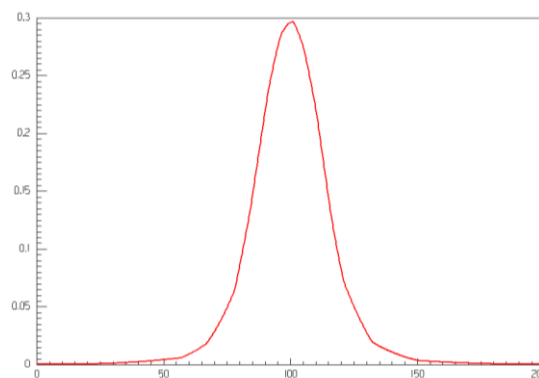


Рис. 10. Распределение поля магнита вдоль оси ускорителя

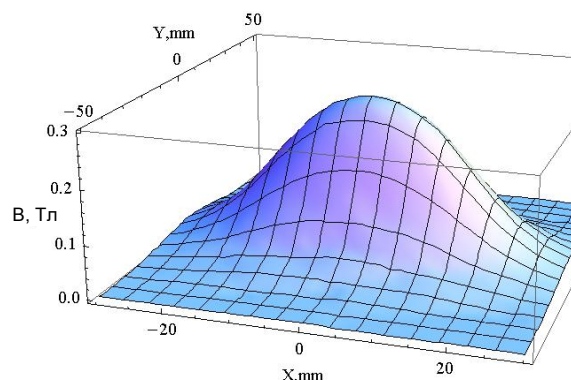


Рис. 11. Распределение величины поля магнита в медианной плоскости

Конструкцию ярма магнита предполагается изготовить разъемной в медианной плоскости магнита. Это позволит легко монтировать и демонтировать магнит на выходном фланце ускорителя при процедуре измерения или подстройки энергии ускорителя.

## ВЫВОДЫ

Полученные в результате моделирования движения пучка электронов в анализирующем магните, установленном на выходе технологического ускорителя ЛУЭ-10М, данные свидетельствуют о возможности получения информации об энергии и энергетическом разбросе в пучке.

Предлагаемые параметры анализирующего магнита с использованием постоянных магнитов из сплава  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ , позволяют реализовать устройство с малыми размерами.

Выбранный материал не меняет магнитных свойств под действием облучения, характеристики поля стабильны во времени.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. V.T. Lazurik, V.M. Lazurik, G.F. Popov, Y.V. Rogov. Integration of computation methods in dosimetry of radiation processing // *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Nuclear Physics Investigations"*. 2008, № 3, p. 201-205.
2. A.M. Bovda I.S. Guk. A.N. Dovbnya, S.U. Kononenko, V.N. Lyashchenko, A.O. Mytsykov. Dipole magnet with a constant field for the accelerator "EPOS" // *Problems of Atomic Sci-*

- ence and Technology. Series "Nuclear Physics Investigations". 2015, № 6, p. 13-17.*
3. David J. McLaughlin, Kenneth R. Hogstrom, Robert L. Carver, John P. Gibbons, Polad M. Shikhaliev, Kenneth L. Matthews II, Taylor Clarke, Alexander Henderson, and Edison P. Liang. Permanent-magnet energy spectrometer for electron beams from radiotherapy accelerators // *Medical Physics*. September 2015, v. 42, № 9, p. 5517-5529.
  4. 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 // *Proceedings of the 1996 EPAC*. 1996, v. 1, p. 798-800.
  5. N.I. Ayzatsky, A.N. Dovbnaya, et al. Accelerating system of the technological electron accelerator // *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Nuclear Physics Investigations"*. 2012, № 4, p. 45-49.
  6. A. Dovbnaya, I. Guk, S. Kononenko, A. Tarasenko. Beam transport system selection on the accelerator LU-10 // *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Nuclear Physics Investigations"*. 2013, № 6, p. 57-61.
  7. MAD – *Methodical Accelerator Design*; <http://mad.home.cern.ch/mad>.

*Статья поступила в редакцию 13.10.2017*

### **CHOICE OF PARAMETERS OF THE ANALYZING MAGNET FOR TECHNOLOGICAL ELECTRON ACCELERATOR LU-10M**

*I.S. Guk, S.G. Kononenko, V.N. Lyashchenko, A.O. Mytsykov*

The problems of creating a magnet with a constant field for measuring the energy and electron spectrum at a technological accelerator of electrons with an energy of about 10 MeV are considered. The effect of the electron beam parameters on the particle density distribution at the output of the analyzing system was studied. Provided modeling of various options for the circuit and the design of the magnet.

### **ВИБІР ПАРАМЕТРІВ МАГНІТА ДЛЯ АНАЛІЗУ ПУЧКА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРИСКОРЮВАЧА ЕЛЕКТРОНІВ ЛП-10М**

*I.S. Guk, S.G. Kononenko, V.M. Lyashchenko, A.O. Mytsykov*

Розглянуто проблеми створення магніта з постійним полем для виміру енергії та спектра електронів на технологічному прискорювачі з енергією біля 10 МеВ. Вивчався вплив параметрів пучка електронів на розподіл щільності часток на виході аналізуючої системи. Проведено моделювання різних варіантів схеми та конструкції магніта.