

ВЫБОР ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ФИЛЬТРА ДЛЯ УСКОРИТЕЛЯ «ЭПОС»

И.С. Гук, С.Г. Кононенко, А.С. Тарасенко

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

E-mail: guk@kipt.kharkov.ua

Обосновывается выбор оптической схемы и геометрии энергетического фильтра для ускорителя «ЭПОС», позволяющего исключить попадание электронов с энергией ниже 17 МэВ на облучаемую мишень. Магнитная система фильтра включает дипольный магнит с постоянным полем и магнит-сканатор. Последний используется как для развёртки пучка на мишени, так и для компенсации угла поворота пучка в первом магните. Система обладает достаточной для работы с пучком ахроматичностью: положение пучка на мишени изменяется менее чем на 2,5 мм при изменении энергии пучка электронов от 20 до 35 МэВ.

ВВЕДЕНИЕ

Линейный ускоритель «ЭПОС» [1] интенсивно используется для проведения работ с применением радиационных технологий. Основные параметры пучка в этом режиме работы ускорителя: энергия электронов – от 20 до 35 МэВ, средний ток – до 700 мА. Работа ускорителя на радиационные программы составляет около 6000 часов в год. Сеансы облучения имеют непрерывную длительность до 360 часов, что требует от систем ускорителя сохранения длительной и стабильной работы весь этот период. К сожалению, в результате нестабильной работы импульсных модуляторов и отсутствия новых поставок клистронов из-за прекращения их производства заводом-изготовителем, возникают проблемы в связи с большим изменением энергии электронов в отдельных посылках, что недопустимо для ряда радиационных технологий. Проведенные исследования показали, что качество облучения для основной массы мишеней существенно изменяется при энергиях электронов ниже 17 МэВ.

Целью нашей работы является расчет и разработка системы энергетического фильтра, предназначенного для предотвращения попадания электронов с энергией, меньшей 17 МэВ, на мишень.

1. ВЫХОДНЫЕ УСТРОЙСТВА УСКОРИТЕЛЯ «ЭПОС»

Схема размещения оборудования на выходе ускорителя приведена на Рис. 1.

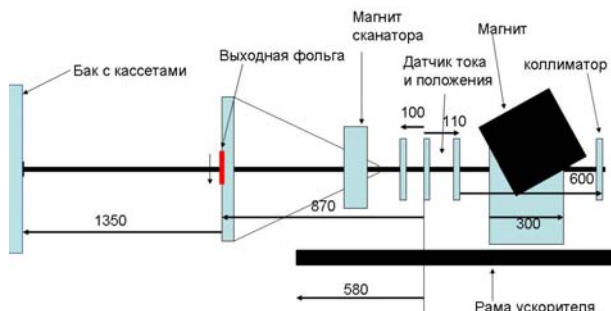


Рис. 1. Существующие системы на выходе ускорителя

Датчик тока и положения пучка позволяет с помощью системы корректоров на ускорителе вывести пучок в центр импульсного магнита, предназначенного для развёртки пучка в вертикальной плоскости

с целью создания равномерного по интенсивности поля облучения на входном окне бака с кассетами, где размещается облучаемый материал. Пучок в атмосферу выводится через титановую фольгу на камере сканатора, которая для охлаждения обдувается потоком воздуха. Охлаждаемый водой коллиматор с отверстием 27 мм за второй секцией поглощает часть пучка, рассеянного в ускорителе. Стоящий далее по пучку магнит использовался для эпизодических измерений энергии пучка.

Поскольку геометрия облучения и параметры сканирующего магнита между собой связаны, при выборе схемы фильтра необходимо было исходить из условия размещения его без существенного изменения размера и положения выходных устройств, что усложнило задачу. Практически это условие потребовало размещения фильтра и всех необходимых устройств в промежутке между выходом ускорителя и входным фланцем камеры сканатора.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В ФИЛЬТРЕ

Для выбора схемы фильтра было проведено исследование движения электронов для нескольких вариантов магнитной системы с помощью программы MAD-X [2] методом моделирования движения частиц по траекториям. Рассматривалось движение 1600 частиц, начальный приведенный эмиттанс которых на выходе второй секции ускорителя составлял 400 мм²мрад.

Всю систему необходимо было разместить в промежутке длиной 940 мм на раме ускорителя. К дополнительным условиям необходимо отнести требование размещения в рассматриваемом промежутке датчика положения пучка длиной 110 мм.

После фильтра частицы должны попасть в магнит сканатора [3]. Диаметр входного отверстия фланца камеры сканатора составляет 40 мм.

Были рассмотрены две схемы фильтра. Первая содержала змейку из трёх магнитов, которые не изменяли положения и направления движения пучка на выходе, а коллиматор наиболее выгодно было располагать внутри среднего магнита, где дисперсия была максимальной. Вторая представляла собой одиночный магнит с коллиматором, расположенным перед фланцем сканатора.

Для моделирования была выбрана модель магнита с прямоугольной формой срезов, как наиболее простая и дешёвая в изготовлении, с шириной полюсов 10 см и зазором 25 мм между полюсами.

В расчётах учитывался спад поля на краю магнита по одной из моделей, заложенных в программе MAD-X [2].

Функции фокусировки и дисперсионные функции для первой схемы, рассчитанные для полей 0,166 и 0,5 Тл, представлены на Рис.2 и 3.

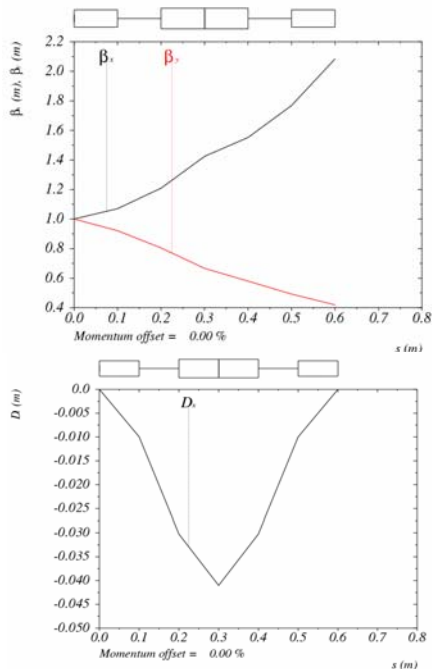


Рис.2. Функции фокусировки β_x , β_y и дисперсионная функция D для поля 0,166 Тл

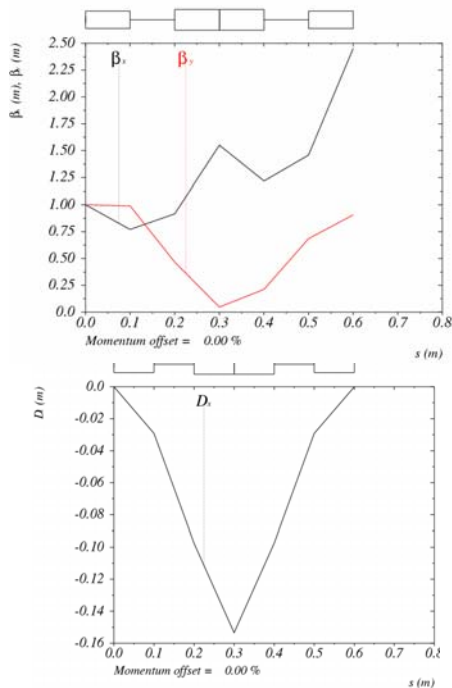


Рис.3. Функции фокусировки β_x , β_y и дисперсионная функция D для поля 0,5 Тл

Средний магнит змейки имеет длину 20 см.

Функции фокусировки и дисперсионная функция для второй схемы, рассчитанные для поля 0,0333 Тл, представлены на Рис.4.

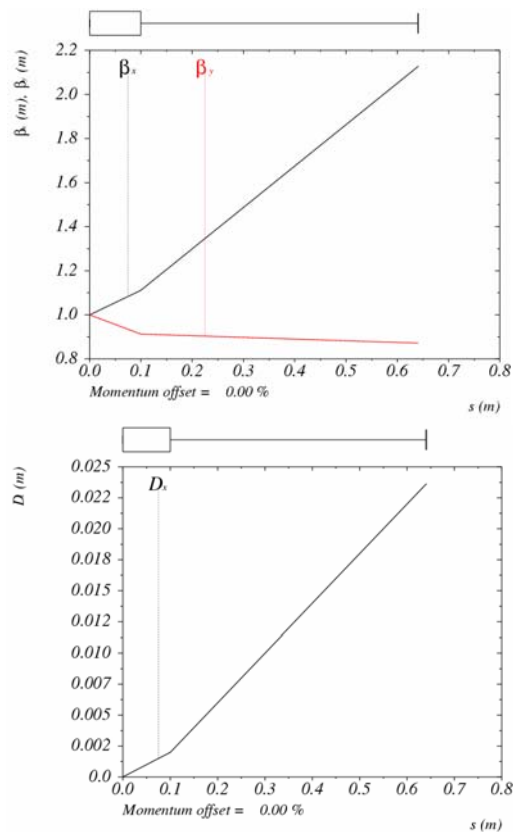


Рис.4. Функции фокусировки β_x , β_y и дисперсионная функция D для поля 0,0333 Тл

Через выбранные структуры транспортировался пучок, фазовые размеры которого приведены на Рис.5. Поперечные размеры пучка электронов при этом моделировании выбирались близкими к экспериментально измеренным на выходе ускорителя, а распределения по координатам и импульсам предполагались гауссовскими.

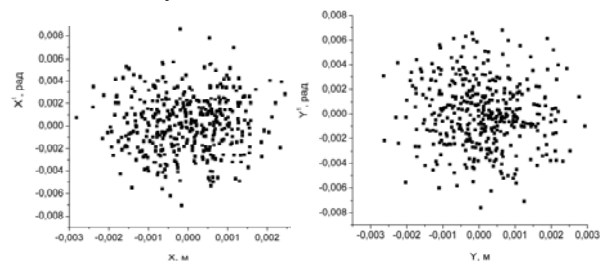


Рис.5. Распределение инжекционных частиц в фазовом пространстве

На Рис.6-9 представлены результаты одновременного трекинга через магнитные структуры частиц с энергиями 17, 20, 25 и 35 МэВ. Траектория пучка с энергией 25 МэВ выбрана опорной.

На Рис.6 и 7 представлены распределения плотности пучка в поперечном сечении для середины и на выходе структур, представленных на Рис.2 и 3.

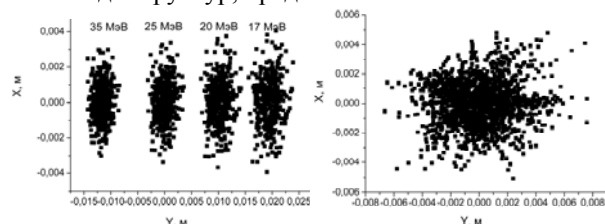


Рис.6. Поперечное сечение пучка по центру и на выходе змейки при поле 0,166 Тл

С увеличением поля в системе растёт дисперсия, но положение пучка на выходе начинает зависеть от энергии частиц.

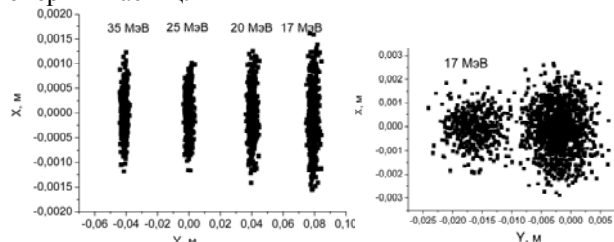


Рис.7. Поперечное сечение пучка по центру и на выходе змейки при поле 0,5 Тл

На Рис.8 представлены результаты более детального моделирования движения пучка в интервале энергий от 17 до 25 МэВ.

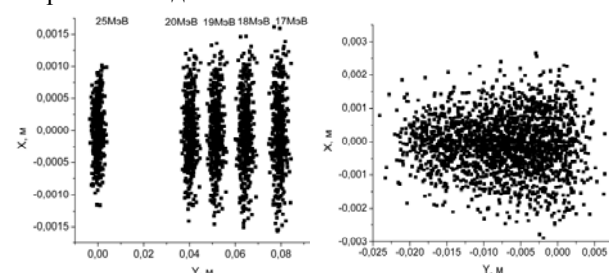


Рис.8. Поперечное сечение пучка по центру и на выходе змейки при поле 0,5 Тл в интервале 17...25 МэВ

Этот рисунок демонстрирует существенный хроматизм системы, приводящий к возрастанию размеров пространства, необходимого для движения пучка во всём рабочем интервале ускорителя.

Проведенные нами дополнительные исследования с целью улучшить ахроматичность системы путём изменения углов срезов магнитов не привели к существенному изменению распределения на выходе.

Распределение плотности пучка на срезе магнита и на входе в сканатор для системы с одним магнитом представлено на Рис.9.

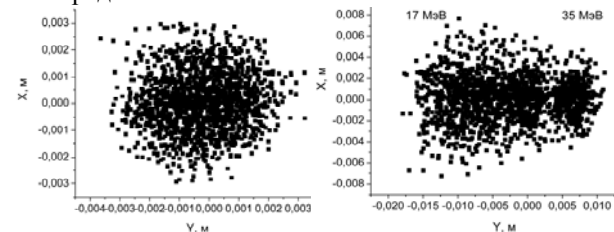


Рис.9. Поперечное сечение пучка на срезе магнита и на коллиматоре при поле 0,0333 Тл

«Отрезать» электроны с энергией ниже 17 МэВ в первой схеме можно с помощью коллиматора, который необходимо размещать внутри среднего магнита змейки. Во втором случае коллиматор можно разместить перед входом в магнит сканатора.

Схема со змейкой с выбранными магнитами не обладает достаточным ахроматизмом при большом поле и приводит к изменению размеров пучка на выходе. Очевидно, что стоимость такой системы в несколько раз больше и потребует более мощного источника питания, чем вторая схема, которая тоже не обладает свойствами ахроматизма.

В связи с этим для реализации фильтра нами была выбрана схема с одним магнитом.

3. ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ВЫБОРУ КОНСТРУКТИВОВ ФИЛЬТРА

Основным ограничивающим фактором для выбранной схемы фильтра оказалась величина диаметра входного фланца магнита сканатора. С одной стороны, необходимо было обеспечить без существенных потерь пропуск в камеру сканатора прямого пучка ускорителя для обеспечения работы с пучком без фильтра. С этой целью мы сместили камеру и магнит сканатора на 14 мм вниз по отношению к существующей оси ускорителя без изменения положения бака с мишенями. Учёт реальных размеров оборудования привёл к окончательному размещению элементов фильтра в промежутке между выходом ускорителя и баком с кассетами, приведенному на Рис.10. В этом варианте пучок должен отклоняться магнитом в вертикальной плоскости.

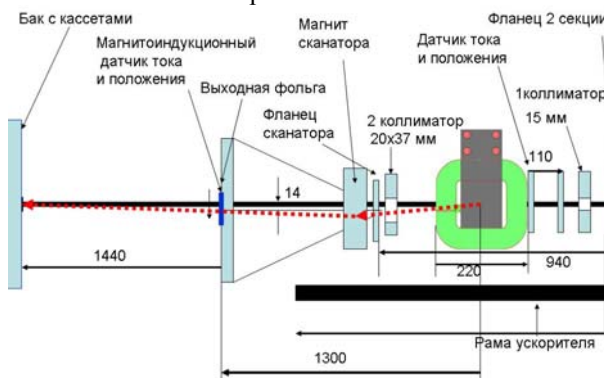


Рис.10. Выходные устройства ускорителя после реконструкции

В результате коллиматор необходимо было разместить на расстоянии 34 мм от оси ускорителя, вблизи от входного фланца сканатора.

Результаты расчёта доли частиц, поглощаемых этим коллиматором для разных энергий в пучке, приведены на Рис.11.

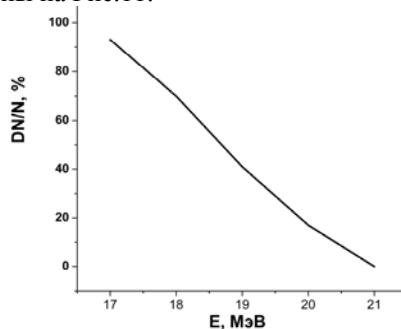


Рис.11. Зависимость доли частиц, поглощаемых в коллиматоре, от энергии электронов

Для поля в магните, равного 0,13339 Тл при эффективной длине магнита 0,13339 м, в коллиматоре должен поглощаться 95 % электронов с энергией 17 МэВ.

Для этого режима величина отклонения оси пучка от оси ускорителя на выходной фольге сканатора и баке с кассетами для разных энергий пучка представлена на Рис.12.

Для компенсации смещения можно использовать магнит сканатора путём создания компенсирующего это смещение поля.

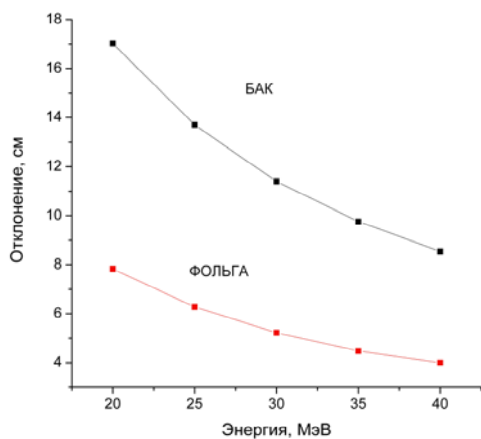


Рис.12. Смещение пучка на выходной фольге и баке

Траектории пучка с энергиями 20, 25, 30 и 35 МэВ приведены на Рис.13 для величины компенсирующего поля 0,0392 Тл.

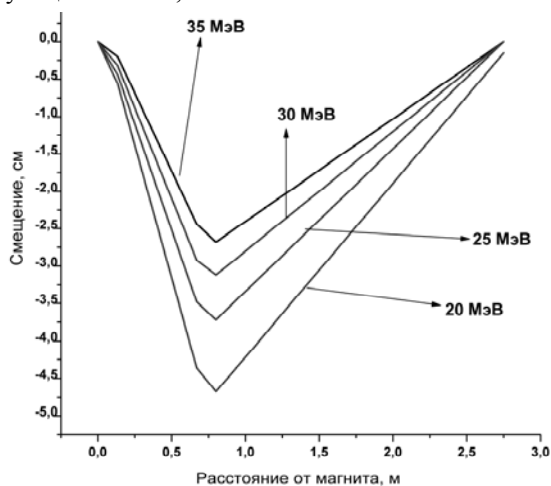


Рис.13. Смещение пучка вдоль оси фильтра

Как видно из рисунка, частицы с энергией во всём рабочем диапазоне ускорителя достаточно хорошо (отклонение от оси не более 2 мм) фокусируются по центру бака с мишенями. Это позволяет с помощью существующего источника пилообразного

тока [3] создать равномерное поле облучения на мишенях в баке.

Поскольку требования к величине границы отрезания фильтра могут изменяться, не существует принципиальных препятствий для перестройки энергии отрезания в выбранной геометрии фильтра.

ВЫВОДЫ

Проведенное моделирование движения частиц в магнитной системе фильтра позволило сделать выбор в пользу более простого и дешёвого варианта фильтра, который потребовал получения значительно меньших значений полей без существенных изменений качества фильтрации электронов по энергии.

Авторы благодарят А.Н. Довбню, В.Н. Митроченко и В.А. Шендрика за плодотворные обсуждения материалов и результатов работы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. M.I. Ayzatskiy, V.N. Boriskin, A.M. Dovbnaya, V.A. Kushnir, V.A. Popenko, V.A. Shendrik, Yu.D. Tur, A.I. Zikov. THE NSC KIPT electron linacs - R&D // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»* (33). 2003, №2, с.19-25.
2. <http://wwwslap.cern.ch/mad/>
3. A.N. Dovbnaya, A.I. Kosoj, A.E. Tolstoj, V.A. Shendrik. The Output Beam Scanning and Forming in the Multipurpose Electron Accelerators of KIPT // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»*. 1997, в.1, с.114-121.
4. В.Н. Борискин, В.А. Гури, Л.В. Репринцев, В.И. Татанов, Г.Н. Цебенко. Разработка и исследование устройств формирования тока в сканирующем магните на выходе ЛУЭ // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»*. 1997, в.2,3, с.168-169.

Статья поступила в редакцию 26.09.2011 г.

CHOICE OF THE OPTICAL SYSTEM OF THE ENERGY FILTER FOR ACCELERATOR "EPOS"

I.S. Guk, S.G. Kononenko, A.S. Tarasenko

The choice of the optical system and the geometry of the energy filter for an accelerator "EPOS", which allows to exclude the ingress of electrons with energies below 17 MeV on the irradiated target is substantiated. The magnetic system of the filter includes dipole magnet with constant field and scanner-magnet. The last is used for scanning the beam on the target and for compensation the angle of the beam deflection by the first magnet. The chromatism of system is sufficient for work: the beam position on the target changes less than 2.5 mm, when the energy of electron beam changes from 20 to 35 MeV.

ВИБІР ОПТИЧНОЇ СХЕМИ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ФІЛЬТРА ДЛЯ ПРИСКОРЮВАЧА «ЭПОС»

I.S. Гук, С.Г. Кононенко, О.С. Тарасенко

Обґрунтовується вибір оптичної схеми та геометрії енергетичного фільтра для прискорювача «ЭПОС», який дозволяє попередити попадання електронів з енергією нижче 17 MeV на опромінювану мішень. Магнітна система фільтра містить у собі дипольний магніт з постійним полем та магніт-сканатор. Останній використовується як для розгортання пучка на мішені, так і для компенсації кута повороту пучка в першому магніті. Система відзначається достатньою для роботи з пучком ахроматичністю: положення пучка на мішені змінюється менш ніж на 2,5 мм при варіації енергії пучка електронів від 20 до 35 MeV.