

ПАРАМЕТРЫ ПУЧКА НА ВТОРОМ КАНАЛЕ ВЫВОДА НА УСКОРИТЕЛЕ “ЭПОС”

И.С. Гук, А.Н. Довбня, С.Г. Кононенко, А.О. Мыцыков
Национальный научный центр “Харьковский физико-технический институт”,
Харьков, Украина
E-mail: guk@kipt.kharkov.ua

На линейном ускорителе “ЭПОС” предполагается создание канала вывода пучка с энергией 23 МэВ. Новый канал для облучения будет поворачивать пучок в вертикальной плоскости на 90 градусов. Создан магнит для этого канала с полем 0,5 Тл. На основе измеренных характеристик магнита рассчитаны характеристики пучка на выходе канала.

ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] рассмотрены проблемы, связанные с созданием на ускорителе “ЭПОС” [2] второго канала вывода пучка для радиационной обработки изделий электронным пучком.

В настоящее время работы по созданию этого канала существенно продвинулись благодаря созданию компактного поворотного магнита на основе магнитных элементов из Nd-Fe-B-сплава. Описанию этого магнита и результатам исследования его характеристик посвящена первая часть этой работы. Полученные данные позволяют более точно прогнозировать характеристики пучков на выходе ускорителя, необходимых для создания нового облучательного стенда. Результаты моделирования движения пучка электронов приведены во второй части работы.

1. ПОВОРОТНЫЙ МАГНИТ

Для создания канала с поворотом пучка на угол 90 градусов необходимо было разработать и изготовить магнит с приведенным радиусом траектории в этом поле около 0,15 м. Максимальное значение поля в зазоре магнита для этого должно быть близким к 0,51 Тл [1].

На основе предварительных расчетов была разработана конструкция и изготовлен опытный образец магнита, в котором были использованы постоянные магниты из Nd-Fe-B-сплава, изготовленные фирмой “Полус-Н» [3].

К сожалению, получить необходимые параметры поля на этом магните не удалось. Были проведены дополнительные исследования для выяснения причин уменьшения поля и выполнена доработка конструкции магнита.

На Рис. 1 приведен общий вид окончательного варианта конструкции дипольного магнита, параметры поля которого удовлетворяют требованиям работы [1].

Верхняя, нижняя балки магнита и полюсные наконечники изготовлены из стали Ст3. Расстояние между полюсами магнита равно 25 мм. Ширина полюсов равна 50 мм. Шиммы имеют высоту 1 мм. Необходимые размеры и стабильность зазора обеспечивает проставка, изготовленная из титана. Магниты из Nd-Fe-B-сплава размещаются в боксе, изготовленном из алюминиевого сплава.

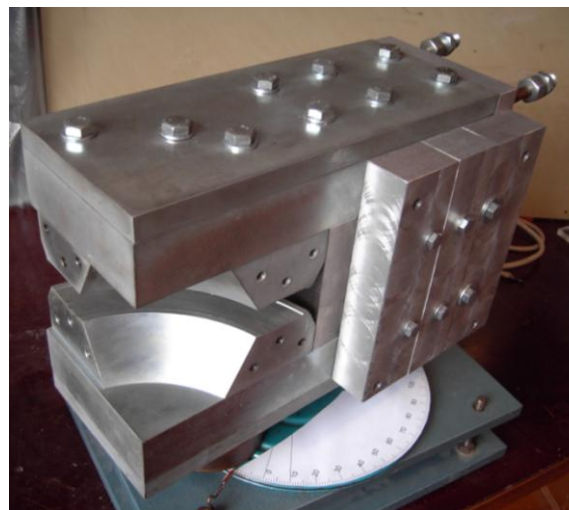


Рис. 1. Дипольный магнит

Термостатирование магнита при определённой температуре осуществляется водой при помощи системы каналов из медной трубки, запрессованной в верхнюю и нижнюю балки магнита (Рис. 2).

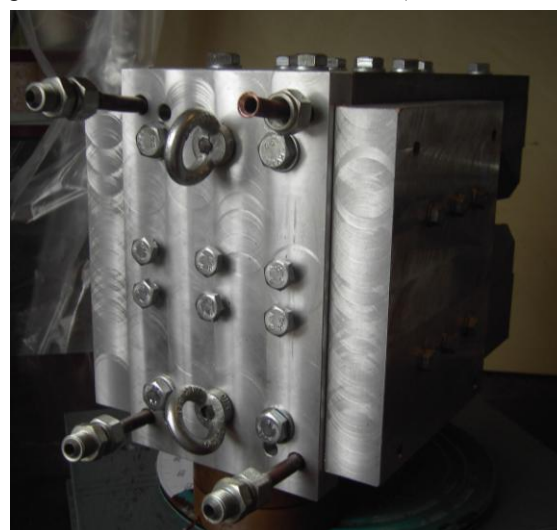


Рис. 2. Магнит, вид сзади

В стенках алюминиевого бокса и балках имеется система болтов, предназначенных для фиксации блоков из магнитных материалов.

Габаритные размеры магнита 233×170×435 мм.

Измерения величины поля в магните выполнены по методике, описанной в работе [4] с помощью матрицы из датчиков Холла при двукратном пере-

мещении её вдоль идеальной траектории движения частиц, состоящей из прямолинейных отрезков вне полюсов и движения по радиусу внутри полюсных наконечников.

На Рис. 3 представлено распределение поля вдоль траектории движения пучка в магните, полученное в результате измерений.

Для максимального учёта влияния рассеянных полей на движение частиц магнитные измерения начинались и заканчивались на расстоянии 300 мм от магнитных полюсов.

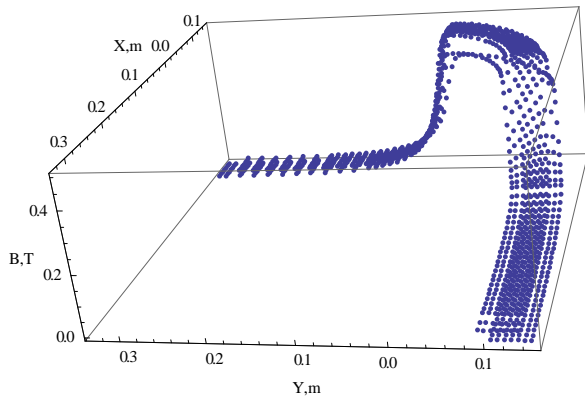


Рис. 3. Измеренные значения поля

По измеренным значениям поля были определены основные характеристики магнита, важные для дальнейших вычислений.

Эффективная длина магнита, рассчитанная по траектории частицы с энергией 23 МэВ в измеренном поле, 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 [5]:

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

где g – вертикальная высота зазора магнита.

По магнитным измерениям для нашего магнита величина $FINT=1,5$, что существенно отличается от величины этого параметра в стандартных моделях спада поля, обычно используемых в программе MAD X [5].

2. СРАВНЕНИЕ ТРАЕКТОРИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ РАЗНЫМИ ПРОГРАММАМИ

Для трассировки траектории электрона в измеренном поле использовалась следующая методика.

Полученные экспериментально распределения поля линейно интерполировались в пределах измеренного массива данных для получения непрерывного в пространстве распределения поля. Вне этого массива была проведена линейная экстраполяция поля. С помощью написанной нами программы, используя уравнения движения, частица с заданной энергией, точкой и углом входа в магнит протягивалась в этом поле в медианной плоскости магнита. Полученная в результате модель поля и вычисленная траектория для одной частицы приведены на Рис. 4.

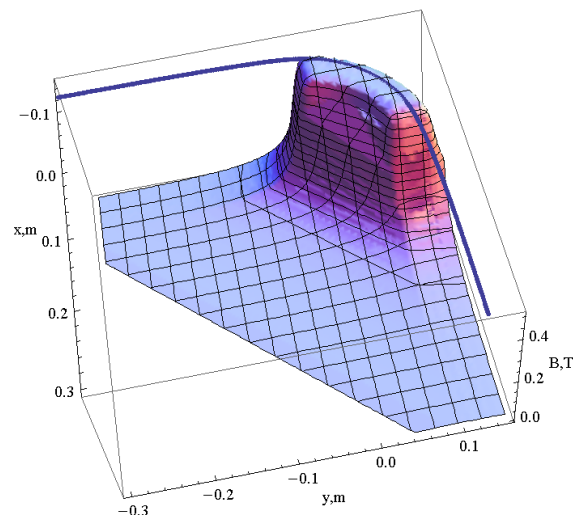


Рис. 4. Модельное распределение поля магнита

На Рис. 5 приведены траектории трёх частиц с энергией 23 МэВ, движущихся в измеренном поле. В исходной точке частицы двигались на расстоянии 5 мм параллельно оси движения частиц в ускорителе.

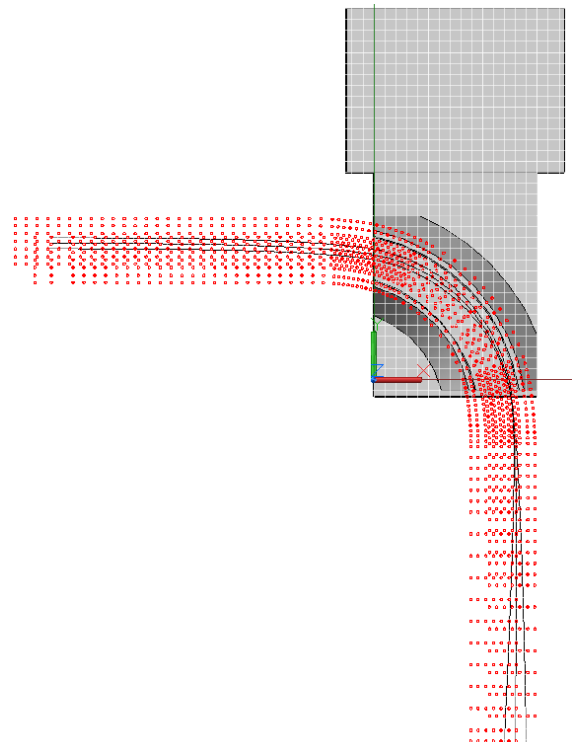


Рис. 5. Движение частиц в медианной плоскости

На рисунке также проведена привязка этих траекторий и измеренного массива экспериментальных данных к конструкции магнита. Центры кружочков обозначают точки, где было измерено поле.

Используемая программа рассчитывает траектории движения частиц только в медианной плоскости магнита.

Поэтому была предпринята попытка по измеренным характеристикам поля магнита в дальнейших расчётах горизонтального и вертикального движения частиц использовать известную программу MAD X [5]. Она позволяет на основе использования экспериментальных данных рассмотреть также и вертикальное движение частиц.

Для правильного учёта вертикального и горизонтального движения частиц в поле с помощью программы MAD X необходимо знание не только эффективной длины магнита и характера нарастания поля на входе и выходе из магнита. Для этого необходимо определить углы входных и выходных срезов магнита.

С этой целью, используя данные Рис. 4, была построена пространственная граница поля для уровня, соответствующего вычисленной величине эффективной длины магнита. Полученная кривая представлена на Рис. 6 красной линией.

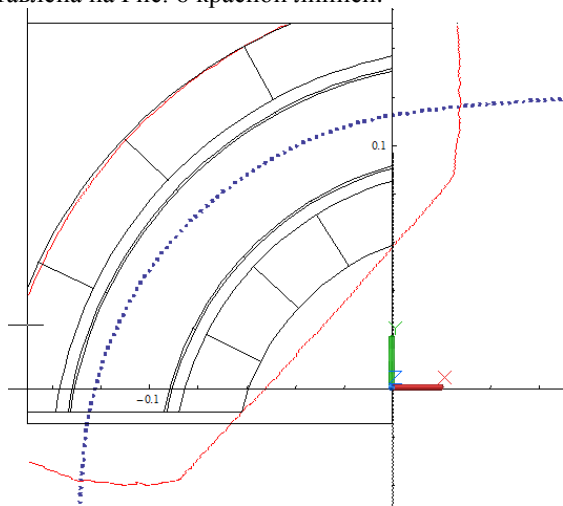


Рис. 6. Углы входных и выходных срезов магнита

На рисунке также представлена траектория частицы с энергией 23 МэВ (см. Рис. 4) и границы полюса магнита. Из представленных данных графически были определены углы входного и выходного среза магнитов. Они равны +3 и -4 градуса соответственно.

Затем были рассчитаны и сравнены результаты трекинга частиц с известными параметрами с помощью описанных двух методов в медианной плоскости магнита.

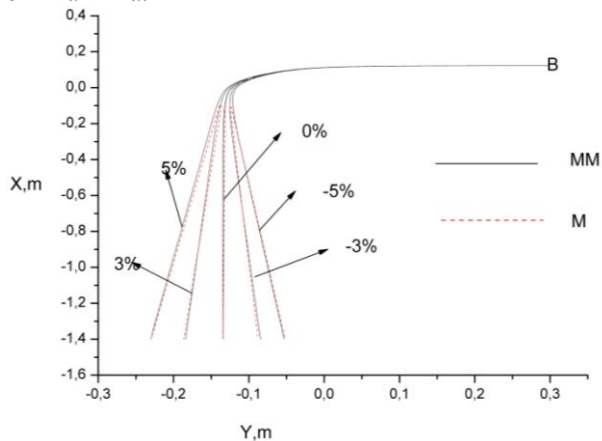


Рис. 7. Траектории движения частиц с разными энергиями

На Рис. 7 представлены результаты расчётов траекторий методом трекинга в интерполированном поле (линия MM) и по программе MAD X (линия M). В – начальная точка движения. Были рассчитаны траектории частиц, движущихся из одной точки с отклонением по энергии от 23 МэВ на +5%, +3%, 0%, -3%, -5%. Координаты и углы входа частиц в магнит в программе MAD X (красные прерывистые

линии) совмещались с данными, полученными методом трекинга в поле (сплошные чёрные линии). Отклонения частиц с энергией, большей или меньшей от центральной на 5% (и 3%), вычисленные на расстоянии 1,3 м от выходного среза магнита (предполагаемое место установки мишени [1]), как видно из рисунка, практически совпадают.

Полученные результаты по исследованию горизонтального движения двумя программами дают уверенность в успешном применении программы MAD X для расчёта вертикального движения пучка в системе.

3. ПАРАМЕТРЫ ПУЧКОВ НА ПРЕДПОЛАГАЕМОЙ МИШЕНИ

При моделировании движения в системе использовались следующие параметры пучка на выходе ускорителя: энергия пучка в максимуме $E_{max} = 23$ МэВ, размер пучка по вертикали и горизонтали равен 2 мм (2σ), эмиттанс пучка по вертикали и горизонтали – $6 \cdot 10^{-3}$ мм·рад. Поперечное распределение плотности электронов и расходимости – гауссовское (так же, как и в работе [1]). Распределение частиц по энергиям мы предположили гауссовским с разбросом 3 МэВ (2σ) [1]. Оценки энергетического разброса пучка основаны на проведенных на ускорителе «ЭПОС» измерениях разброса для пучка с энергией 31 МэВ [6] при величине тока в пучке, равном 460 мА.

На Рис. 8 представлены начальные поперечные размеры пучка (число частиц 3000), инжектируемого из ускорителя.

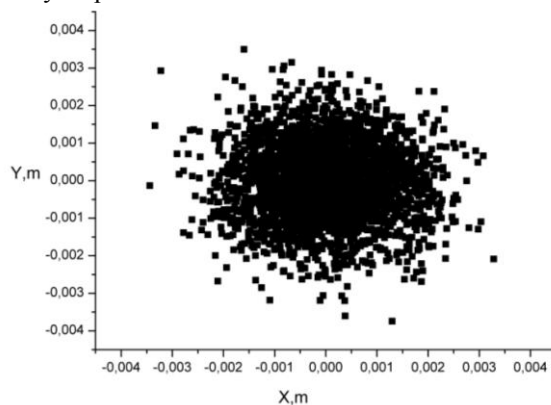


Рис. 8. Входной пучок

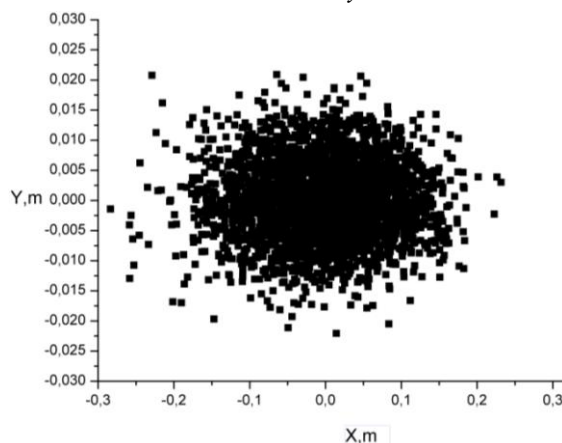


Рис. 9. Плотность пучка электронов на мишени

На Рис. 9 представлено распределение плотности пучка электронов на мишени, рассчитанное с помощью программы MAD X с учётом параметров магнита, полученных из измеренного распределения поля в магните.

На Рис. 10 представлено распределение плотности электронов на мишени, полученное в результате расчёта с использованием тех же входных параметров пучка, но величина $FINT=0,5$. Углы срезов также равны 0.

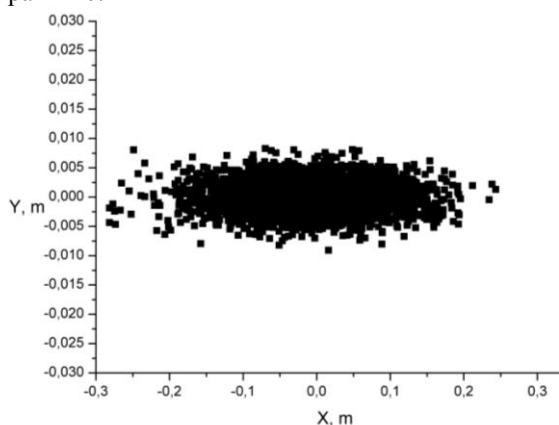


Рис. 10. Пучок на мишени

Такие параметры магнита использовались в работе [1] при первоначальном рассмотрении движения частиц в канале вывода пучка. Из представленных рисунков видно, что размеры пучка, рассчитанные на основе учёта реального распределения поля в магните, в значительной степени отличаются от расчётов размеров для идеализированной модели, использованной в работе [1].

ВЫВОДЫ

Полученные в работе результаты исследования траекторий движения частиц и распределения плотности электронов на предполагаемой мишени ук-

зывают на возможность использования программы MAD X для прогнозирования параметров пучков на выходе канала вывода на ускорителе «ЭПОС». Реалистичность этих прогнозов возрастает при использовании в расчётах экспериментально измеренных параметров магнита.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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.
2. 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.
3. <http://www.polus-n.com/index.html>
4. I.S. Guk, A.N. Dovbnya, S.G. Kononenko, V.N. Lyashchenko, A.O. Mytsykov, B.P. Romas'ko, A.S. Tarasenko, V.A. Shcherbinin. Dipole Magnet of the Injection System for the SALO Recirculator // *Physics of Particles and Nuclei Letters*. 2012, v. 9, № 4, 5, p. 410-414.
5. MAD – Methodical Accelerator Design; <http://mad.home.cern.ch/mad>.
6. И.С. Гук, А.Н. Довбня, С.Г. Кононенко, В.Н. Лященко, А.О. Мыцыков, В.П. Ромасько, А.С. Тарасенко, В.Н. Щербинин. Дипольный магнит энергетического фильтра для ускорителя «ЭПОС» // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»*. 2012, № 3, с. 67-69.

Статья поступила в редакцию 14.10.2015

BEAM PARAMETERS ON THE SECOND OUTPUT BEAM CHANNEL AT ACCELERATOR "EPOS"

I.S. Guk, A.N. Dovbnya, S.G. Kononenko, A.O. Mytsykov

On a linac "EPOS" making of the output beam channel with energy 23 MeV is supposed. The new channel for an irradiation will turn a beam in vertical plane on 90 degrees. The magnet for this channel with a field 0.5 T is created. On the basis of the measured performances of magnet beam performances on a channel exit are calculated.

ПАРАМЕТРИ ПУЧКА НА ДРУГОМУ КАНАЛІ ВИВОДУ НА ПРИСКОРЮВАЧІ “ЕПОС”

I.S. Guk, A.M. Довбня, С.Г. Кононенко, А.О. Мыцыков

На лінійному прискорювачі "ЕПОС" передбачається створення каналу виводу пучка з енергією 23 МеВ. Новий канал для опромінення буде повертати пучок у вертикальній площині на 90 градусів. Створено магніт для цього каналу з полем 0,5 Тл. На основі обмірних характеристик магніту розраховані характеристики пучка на виході каналу.