

ДИПОЛЬНЫЙ МАГНИТ С ПОСТОЯННЫМ ПОЛЕМ ДЛЯ УСКОРИТЕЛЯ «ЭПОС»

А.М. Бовда, И.С. Гук, А.Н. Довбня, С.Г. Кононенко, В.Н. Лященко, А.О. Мыцыков
*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина*
E-mail: guk@kipt.kharkov.ua

Для создания нового канала вывода пучка с энергией 23 МэВ на ускорителе «ЭПОС» разработан компактный дипольный магнит, позволяющий повернуть пучок на 90 градусов. В конструкции использованы постоянные магниты из Nd-Fe-B-сплава. Приведены результаты исследования характеристик магнита.

ВВЕДЕНИЕ

На линейном электронном ускорителе «ЭПОС» [1], используемом для радиационной обработки материалов и изделий, предполагается провести модернизацию как ускоряющей системы, так и выходных устройств с созданием второго канала [2]. Основным назначением нового канала является массовая радиационная обработка материалов электронным пучком с энергией 23 МэВ с потреблением пучка около 4000 часов в год с длительностью сеансов облучения до 360 часов. На этом канале предполагается поворот пучка электронов с энергией 23 МэВ на 90 градусов осуществить с помощью магнита с постоянным полем. Был рассмотрен вариант создания этого магнита на основе постоянных магнитов из Nd-Fe-B-сплава [2]. Максимальное значение поля при предполагаемой величине зазора в 25 мм магнита должно быть равно 0,516 Тл для того, чтобы конструкция поворотной части канала могла быть размещена на раме ускорителя. Исходя из существующего энергетического разброса в пучке ускорителя, полюса магнита должны иметь ширину 50 мм с шиммами высотой 1 мм на краях для улучшения однородности поля по радиусу. В конструкции предполагалось использование блоков постоянных магнитов размером 150×150×90 мм, изготовленных из Nd-Fe-B-сплава фирмой «Полюс-Н» [3].

В литературе описаны единичные случаи создания устройств с постоянными магнитами, разработанными для использования с пучками электронов определённой энергии [4 - 6]. В связи с этим полученный опыт создания постоянного магнита поможет дальнейшему использованию таких устройств в фундаментальных и прикладных научных исследованиях. Описанию конструкции этого магнита, исследованию характеристик поля в зазоре магнита, а также температурной зависимости величины поля посвящена эта работа.

1. КОНСТРУКЦИЯ МАГНИТА

При существующей системе формирования и проводки на ускорителе «ЭПОС» невозможно исключить некоторые потери пучка на стенках вакуумной камеры магнита. Поскольку неизвестна дозовая зависимость величины поля в материале блока постоянных магнитов, была выбрана конструкция магнита, позволяющая максимально удалить этот блок от пучка. Поле в зазоре формируется с помо-

щью магнитопровода и полюсных наконечников из стали Ст3. Радиационная стойкость магнитных характеристик магнитов, изготовленных из этого материала, является высокой. После проведенной в работе [2] оптимизации параметров конструкции магнита был изготовлен образец, представленный на Рис. 1. Поле в зазоре было рассчитано с учетом магнитных характеристик изготовленных блоков из постоянных магнитов и использованного материала магнитопровода.



Рис. 1. Общий вид магнита

Верхняя и нижняя балки магнита были изготовлены из двух деталей. В них был профрезерован канал, в который запрессована медная трубка со штуцерами для присоединения к системе термостатирования ускорителя. Полюсные наконечники крепятся к балкам с помощью болтов. На торцах наконечников имеется возможность крепления небольших сегментов такого же сечения, как и полюсных наконечников, для изменения эффективной длины магнита. Стабильность зазора обеспечивается вставкой из титана, за которой размещается бокс для размещения магнитных блоков. Положение блоков фиксируется с помощью системы болтов в стенках бокса, изготовленных из алюминиевого сплава.

Точность обработки элементов конструкции магнита была не хуже 5 микрон.

В силу технологических требований магнитный блок нужных размеров был составлен из намагниченных плиток из Nd-Fe-B-сплава размером 50×50×10 мм.

Габаритные размеры магнита 233×170×435 мм.

2. МАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Ожидаемое распределение поля в медианной плоскости магнита приведено в работе [2]. Распределение поля вдоль траектории движения электронного пучка, взятое из работы [2], представлено на Рис. 2.

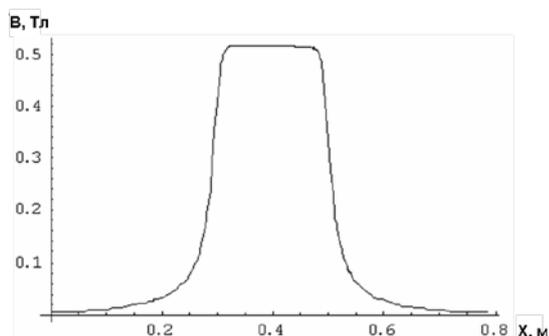


Рис. 2. Поле вдоль траектории

Измеренные значения поля в центре полюсных наконечников изготовленного магнита ($\approx 0,4$ Тл) оказались ниже представленных на Рис. 2.

Поиск причин, повлиявших на изменение поля, был начат с исключения эффектов насыщения в материалах конструкции. С этой целью последовательно из бокса с магнитными элементами извлекались слои толщиной 10 мм, общее количество которых было равным 9. Представленная на Рис. 3 зависимость поля указывает на отсутствие эффектов насыщения.

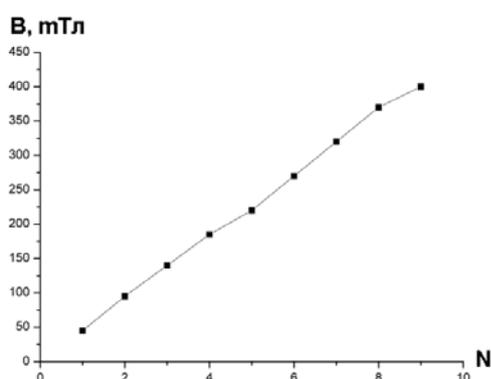


Рис. 3. Зависимость поля в центре зазора магнитных наконечников от величины магнитного блока

Далее были проведены измерения нормальной к поверхности составляющей поля отдельной плитки размером $50 \times 50 \times 10$ мм на расстоянии от поверхности 0,3; 3,8 и 10,3 мм. Измерения проводились с помощью матрицы из 7 датчиков Холла по методике, описанной ранее в работе [7].

На Рис. 4 представлено распределение поля, полученное путём сканирования его матрицей вдоль одной из боковых граней плитки.

На Рис. 5 гладкими кривыми представлено распределение поля плитки, рассчитанное в предположении однородной намагниченности с остаточным значением 1,23 Тл. Измеренные значения поля представлены на рисунке точками. Измерения привязаны к середине боковой грани плитки.

Из сравнения графиков видно, что измеренное поле в центре магнитной плитки превышает расчетное при небольших расстояниях от плитки.

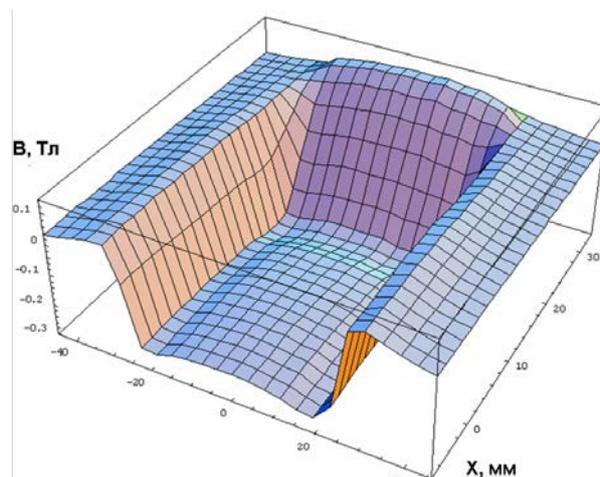


Рис. 4. Распределение поля

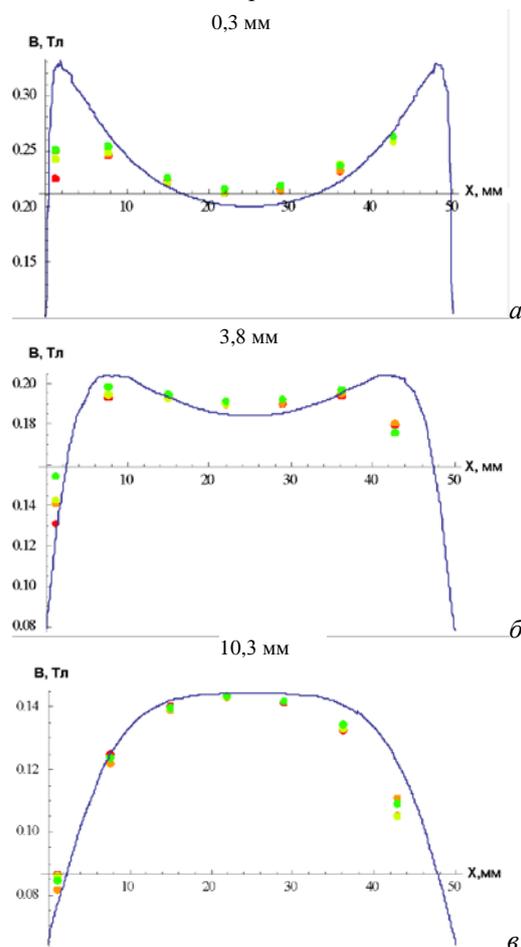


Рис. 5. Распределение поля вдоль середины плитки. а – на расстоянии 0,3 мм от поверхности; б – 3,8 мм; в – 10,3 мм

Величина поля, при однородной намагниченности плитки, ограниченной некими размерами, предполагает конкуренцию влияния между центральными и периферийными областями. Поэтому разумно предположить, что превышение поля в центре вызвано меньшей величиной остаточной намагниченности на краях плитки. Связано это, в том числе, и с полями рассеяния на краях.

Для объяснения несовпадения экспериментальных и рассчитанных данных была построена модель, в которой остаточная намагниченность края плитки шириной 1 см была равна 1,07 Тл по сравне-

нию с 1,23 Тл в центральной части плитки. Экспериментальные данные и расчёты по модели с учетом неоднородности поля в центре плитки при этом согласуются лучше (Рис. 6).

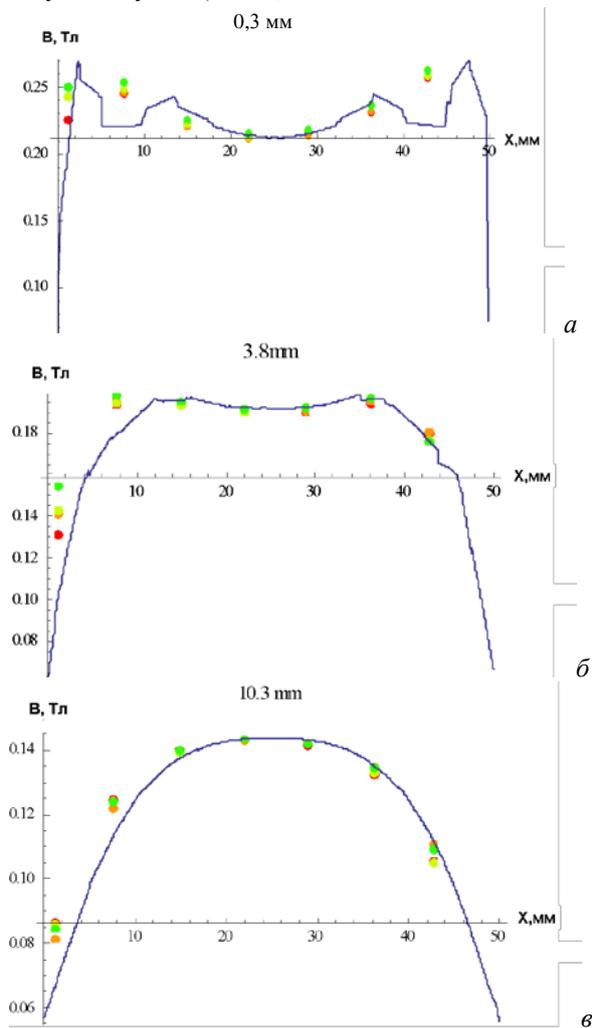


Рис. 6. Распределение поля вдоль середины плитки (расчётная кривая для Рис. 6,а не была просчитана с большей точностью в связи с ограничениями применяемой для расчёта программы)

При наличии эффекта изменения эффективной намагниченности к краю плитки величина поля в магните могла оказаться меньше предполагаемой по первоначальной модели.

Была предпринята попытка увеличения поля в магните до необходимого уровня без существенных изменений конструкции за счёт увеличения площади магнитного блока.

Для расчётов использовалась модель магнита, представленная на Рис. 7. Новые расчёты, выполненные с учётом проведенных исследований, указали на возможность получения необходимой величины поля при изменении размера магнитного блока на 25 мм в обе стороны, как это показано на Рис. 7.

Для подтверждения такой возможности из железа ЖР008 была изготовлена модель магнита с использованием постоянного магнита с того же материала и подготовленного по аналогичной методике (Рис. 8).

При изменении сечения вставки с 30×30 мм до 38×38 мм поле в зазоре магнита возросло от 0,33 до 0,46 Тл.

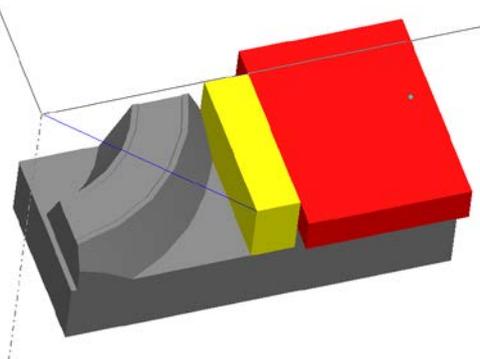


Рис. 7. Модель магнита

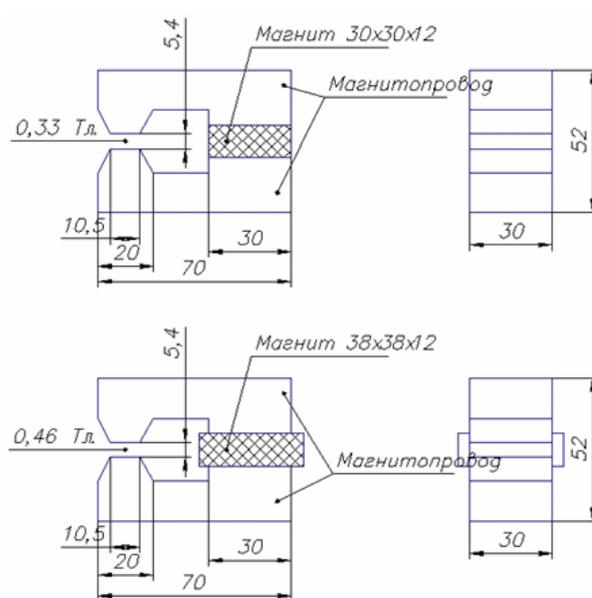


Рис. 8. Результаты моделирования

3. ИЗМЕРЕНИЯ В МОДЕРНИЗИРОВАННОМ МАГНИТЕ

Модернизированный магнит вместе с направляющими приспособлениями для матрицы датчиков представлен на Рис. 9.



Рис. 9. Устройство для измерения поля вдоль траектории движения пучка

Измеренное распределение поля представлено на Рис. 10. С целью учёта влияния рассеянных полей на траекторию движения пучка измерения были проведены на расстоянии более 30 см от полюсов магнита.

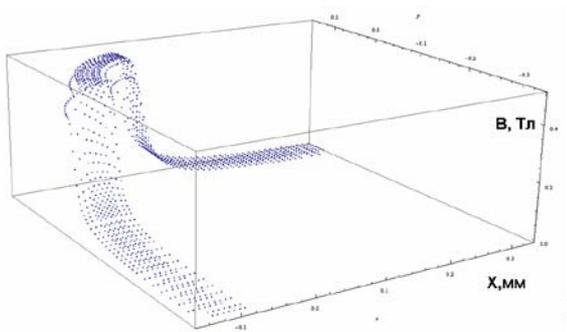


Рис. 10. Распределение поля вдоль траектории пучка

На Рис. 11 представлено измеренное распределение поля в медианной плоскости магнита в центре полюсных наконечников в направлении, перпендикулярном траектории движения пучка.

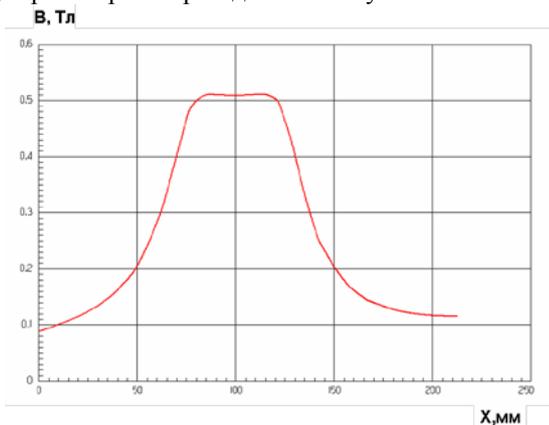


Рис. 11. Величина поля

Распределение поля вдоль идеальной траектории движения пучка представлено на Рис. 12.

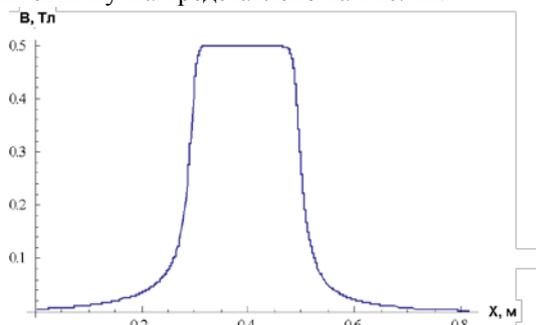


Рис. 12. Распределение поля вдоль траектории движения пучка

Как видно из полученных данных, значение поля в зазоре магнита удовлетворяет заданным величинам.

Эффективная длина магнита, рассчитанная по траектории частицы с энергией 23 МэВ в измеренном поле, равна $242 \pm 1,1$ мм.

Поперечное распределение поля в нескольких сечениях по ходу пучка представлено на Рис. 13. Положение шимм обозначено на рисунке черными прямоугольниками.

По измеренным распределениям поля можно провести трассирование пучка с заданными энергией, размерами и расходимостью. С этой целью была проведена интерполяция полученных данных между точками измерения. На Рис. 14 представлены результаты такой интерполяции. Сплошной линией

показана траектория движения электрона с энергией 23 МэВ с нулевыми начальными параметрами в этом поле.

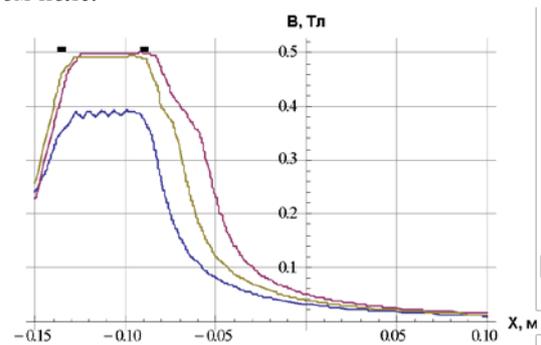


Рис. 13. Привязка измерений к положению шимм

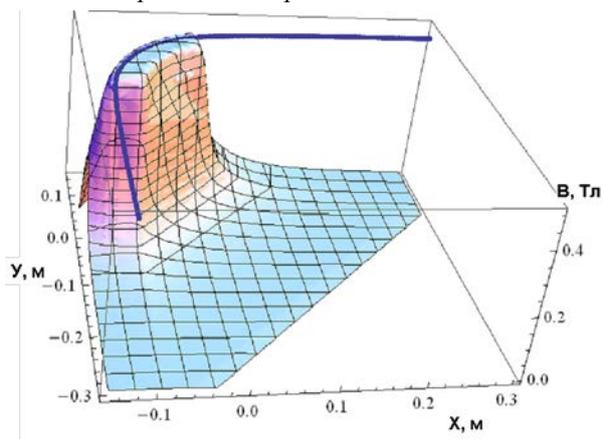


Рис. 14. Трассировка движения пучка

Создание канала требует привязки как измеренного поля, так и конструкции магнита, к реальному расположению узла поворота в установке. Это можно осуществить при трассировании пучка с учётом полученных измерений поля. На Рис. 15 показана такая привязка.

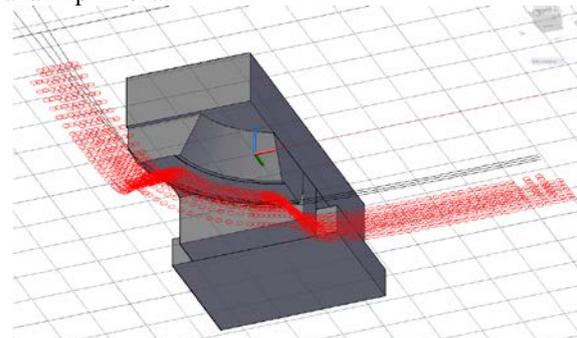


Рис. 15. Расположение магнита, магнитных измерений и траекторий пучка в пространстве

Траектории, приведенные на рисунке черными линиями, соответствуют движению электронов, входящих в систему с разным расстоянием от идеальной траектории.

4. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ

Известно, что поле в магнитах из Nd-Fe-B-сплава существенно зависит от температуры. Реально температура воздуха в бункере ускорителя изменяется в довольно широких пределах. А это может отразиться на положении пучка на выходе магнитной системы.

На Рис. 16 приведена измеренная зависимость величины поля в центре зазора магнита от температуры конструкции в целом в том диапазоне температур, который реально реализуется в бункере ускорителя. При разработке магнита предполагалось использовать для стабилизации температуры конструкции систему термостатирования ускорителя. Температура воды в системе термостатирования секций близка к 38°C.

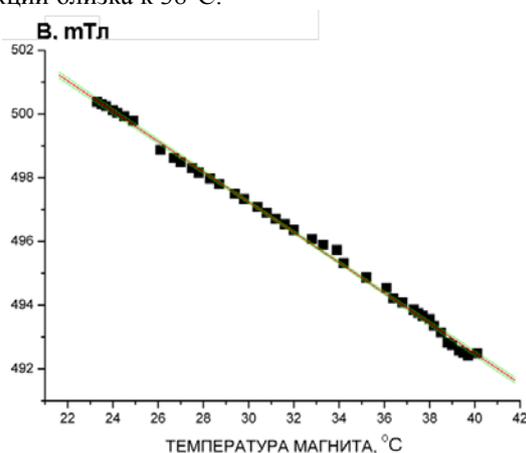


Рис. 16. Температурная зависимость поля в магните

Как видно из полученных данных, величина поля в магните линейно снижается с увеличением температуры.

ВЫВОДЫ

Полученные результаты свидетельствуют о возможности создания на основе постоянных магнитов из Nd-Fe-B-сплава дипольных магнитов с заданными значениями поля. Такие магниты могут найти широкое применение в технологических ускорителях вследствие простоты получения больших величин поля. Магниты не требуют затрат на электроэнергию, достаточно дешёвы в связи с широким и массовым производством из исходных материалов изделий любых размеров.

DIPOLE MAGNET WITH THE CONSTANT FIELD FOR ACCELERATOR "EPOS"

A.M. Bovda, I.S. Guk, A.N. Dovbnya, S.G. Kononenko, V.N. Lyashchenko, A.O. Mytsykov

The compact dipole magnet is developed for making new channel with energy 23 MeV on accelerator "EPOS", allowing to turn a beam on 90 degrees. In construction constant magnets from Nd-Fe-B alloy are used. Magnet performances are explored.

ДИПОЛЬНИЙ МАГНІТ З ПОСТІЙНИМ ПОЛЕМ ДЛЯ ПРИСКОРЮВАЧА «ЕПОС»

О.М. Бовда, І.С. Гук, А.М. Довбня, С.Г. Кононенко, В.М. Лященко, А.О. Мищиков

Для створення нового каналу виводу пучка з енергією 23 MeV на прискорювачі «ЕПОС» розроблений компактний дипольний магніт, що дозволяє повернути пучок на 90 градусів. У конструкції використані постійні магніти з Nd-Fe-B-сплаву. Приведено результати дослідження характеристик магніту.

Температурная зависимость поля указывает на возможность тонкой регулировки поля в магните с помощью системы термостатирования конструкции.

В дальнейшем необходимо провести дополнительные исследования радиационной стойкости устройств различной формы, что позволит создавать простые конструкции выводных систем с регулируемой величиной поля.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Н.И. Айзацкий, В.Н. Борискин, А.Н. Довбня и др. Линейные электронные ускорители ННЦ ХФТИ – исследование и развитие // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»*. 2003, № 2, с. 19-25.
2. А.Н. Довбня, И.С. Гук, С.Г. Кононенко и др. Второй канал вывода пучка на ускорителе «ЭПОС» // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»*. 2014, № 3, с. 8-12.
3. <http://www.polus-n.com/index.html>
4. V.I. Shvedunov, R.A. Barday, V.P. Gorbachev, et al. A Race-Track Microtron with High Brightness Beams // *NIM*. 2004, v. 531, № 3, p. 346-366.
5. V.I. Shvedunov, A.N. Ermakov, I.V. Gribov, et al. A 70 MeV Race-Track Microtron // *NIM*. 2005, v. 550, № 1-2, p. 39-53.
6. А.А. Бондусь, В.П. Горбачев, В.П. Степанчук, Р.В. Максимов, Д.В. Мутасов. Перспективы улучшения параметров малогабаритного микротрона трехсантиметрового диапазона // *Известия Саратовского университета. Сер. «Физика»*. 2010, т. 10, в. 2, с. 47-55.
7. И.С. Гук, А.Н. Довбня, С.Г. Кононенко, и др. 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