

ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ ОБРАЗЦОВ Nd-Fe-B-МАГНИТОВ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ С ЭНЕРГИЕЙ 23 МэВ

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

Были проведены экспериментальные исследования поля двух образцов магнита из Nd-Fe-B-сплава при прямом облучении электронным пучком с энергией 23 МэВ на ускорителе «ЭПОС». Поглощённая доза для образцов составляла 16 Град. Величина интеграла вертикальной составляющей магнитного поля вокруг образца на расстоянии около 3 мм от поверхности образцов составила после облучения 0,62 и 0,42 от величины поля до облучения. Для образца, подвергнувшегося воздействию тормозного излучения вне пучка электронов, существенного изменения поля не наблюдалось.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время магниты из сплава Nd-Fe-B начали широко применяться в ускорительных технологиях. Так, например, на основе этого материала созданы компактные магнитные системы для ондуляторов на ряде источников синхротронного излучения [1, 2]. Опыт использования этих систем показал, что под действием облучения электронным пучком наблюдается изменение величины поля в этих устройствах [3 - 5]. Анализ причин изменения поля магнитов под действием электронов высоких энергий также обсуждается в литературе [6, 7, 15].

Для создания нового канала вывода пучка с энергией 23 МэВ на ускорителе «ЭПОС» [8] разработан компактный дипольный магнит [9, 10], позволяющий повернуть пучок на 90 градусов. В конструкции устройства использованы постоянные магниты из Nd-Fe-B-сплава. Одним из важных вопросов является прогнозирование поведения поля этого магнита под действием облучения. С этой целью были проведены экспериментальные исследования изменения поля образцов магнитов при прямом облучении электронным пучком с энергией 23 МэВ и гамма-излучением, возникающим при торможении этого пучка на мишени.

Образцы магнитов были изготовлены по RLP технологии [11, 12]. Они имели геометрические размеры 30×24×12 мм. Плотность полученных образцов составляет 7,35...7,4 г/см³. Поверхность образцов для предотвращения коррозии была покрыта слоем никеля толщиной 0,02 мм. В процессе облучения образцы охлаждались водой с температурой не более 40°C. В серии измерений были использованы четыре образца магнитов, предварительно намагниченных в импульсном магнитном поле 3,5 Тл.

1. УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Образцы № 1 и 2 облучались электронным пучком линейного технологического ускорителя «ЭПОС» [7] с энергией 23 МэВ. Развернутый по

вертикали пучок электронов выводился в горизонтальном направлении из ускорителя в воздух через титановую фольгу [10]. После этого он рассеивался на фольге из алюминия и попадал на поверхность образцов магнита на расстоянии 1,35 м от выхода из ускорителя. Образцы ориентировались таким образом, что в процессе облучения электроны падали на южный полюс магнита размером 30×40 мм. Плотность потока электронов в пределах размеров образца не изменялась больше, чем на 10%.

Образец № 4 во время облучения помещался вне электронного пучка на расстоянии 300 мм от поля облучения образцов.

Под действием пучка с энергией 23 МэВ в образцах образуются нестабильные изотопы, которые могут существенно повлиять на активность магнитов после облучения. Поэтому для получения дополнительных данных об этих изотопах перед облучением никелевое покрытие образца № 1 было удалено.

Поле облучения размером 130×560 мм вокруг образцов было заполнено материалом с плотностью 3,5 г/см³, толщиной около 20 мм, в котором электроны теряли около 75% энергии. В связи с этим за время облучения электронами образцы испытывали воздействие тормозных гамма-квантов с интенсивностью, превосходившей более чем в 50 раз интенсивность тормозного излучения, возникающего при торможении электронов в самом образце.

Образцы № 1, 2 и 4 облучались около 192 ч, поглощённая доза от электронов составляла 16 Град (общий поток электронов, попавший на 1 см² образца, был равен $1,4 \cdot 10^{17}$).

Образец № 7 не облучался и служил опорным эталоном для калибровки точности метода и контрольных измерений.

Перед началом облучения магнитное поле вокруг образцов обмерялось. С этой целью использовалась линейка из семи датчиков Холла [13], поперёк которой передвигался магнит. Расстояние между датчиками в матрице было близким к 6 мм. Первоначальное положение образцов относительно линейки фиксировалось с помощью системы упоров. Образцы передвигались параллельно поверхности матри-

цы с датчиками на расстоянии, равном 3,05 мм. Расстояние между точками измерения вдоль движения матрицы изменялось от 2 до 5 мм. Точность измерения положения образца равна 1 мкм.

После измерения распределения поля с северного полюса магнита для измерений с южного полюса образец поворачивался на 180 градусов относительно длинной оси образца.

Измерялась нормальная по отношению к поверхности образца составляющая поля. Относительная погрешность измерений поля была не хуже 0,01%.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАДИАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

После облучения образцы выдерживались для достижения ими безопасных для измерений уровней активности. Затем с помощью германиевого детектора были сняты спектры гамма-квантов, испускаемых всеми образцами.

Для измерения γ -спектров исследуемых магнитов использовался спектрометр CANBERRA GC1818 с коаксиальным полупроводниковым детектором из сверхчистого германия. Относительная эффективность детектора составляла 18%, а энергетическое разрешение – 1,8 кэВ для линий ^{60}Co . В качестве системы сбора данных использовался блок-анализатор CANBERRADSA 1000 со встроенным источником высокого напряжения.

Калибровка спектрометра по эффективности проводилась при помощи стандартного набора эталонных источников: ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{241}Am , ^{22}Na , ^{60}Co и ^{152}Eu . Для получения значений абсолютной эффективности выполнялась подгонка данных функцией Кэмпбела [14].

На Рис. 1-3 представлены спектры, полученные с экспозицией 10 мин при исследовании образцов №1, 2 и 4 после облучения.

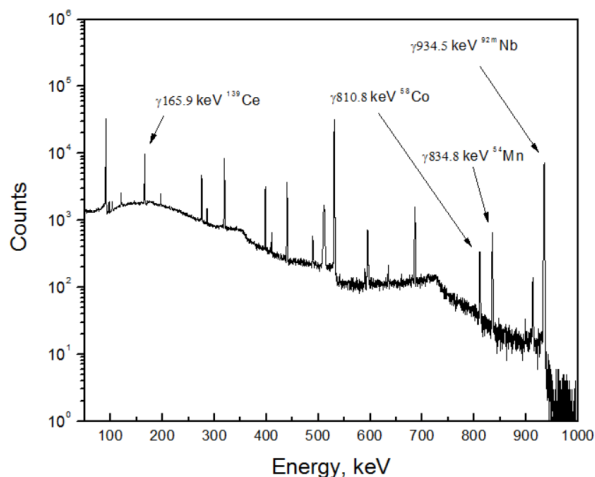


Fig. 1. Участок спектра наведенной активности магнита № 1, измеренный через 16 дней после окончания сеанса облучения. Время экспозиции – 10 мин. Практически все необозначенные на спектре пики принадлежат изотопу ^{147}Nd

На спектре образца № 2, более чем в спектре образца № 1, проявляется линия 122,1 кэВ, принадлежащая изотопу ^{57}Co . Время жизни изотопа –

271,79 дня. В целом, активность образца № 2 оказалась выше активности образца № 1.

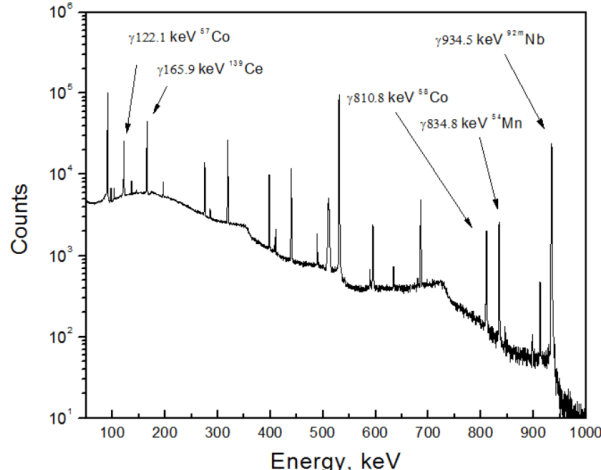


Fig. 2. Участок спектра наведенной активности магнита № 2, измеренный через 16 дней после окончания сеанса облучения.

Практически все необозначенные на спектре пики принадлежат изотопу ^{147}Nd

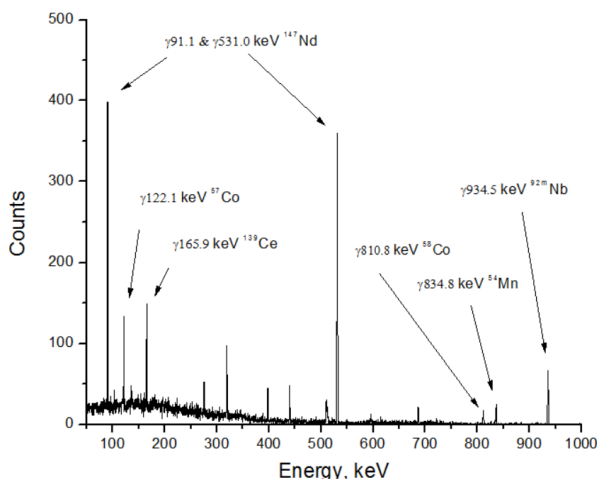


Fig. 3. Участок спектра наведенной активности магнита № 4, измеренный через 16 дней после окончания сеанса облучения. Время экспозиции – 10 мин. Практически все необозначенные на спектре пики принадлежат изотопу ^{147}Nd

Как видно из Рис. 3, активность образца № 4 значительно ниже активности образцов № 1 и 2. В спектре излучения образца № 4 проявляются линии тех же изотопов, что и в спектре образца № 2.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Результаты измерений поля со стороны северного полюса образца № 7 до проведения исследований на пучке представлены на Рис. 4.

Для интегральной оценки величины поля, создаваемого вокруг образца, использовался следующий метод. По измеренным точкам была проведена трёхмерная квадратичная интерполяция полученных данных между точками измерения. Размер области, в которой проводилась интерполяция данных, задавался расстоянием между крайними датчиками матрицы, а вдоль движения образца – областью сканирования, точно задаваемой системой определения

координат образца.

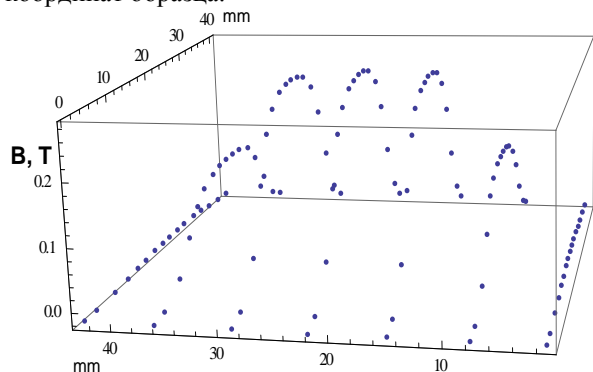


Рис. 4. Первоначальное распределение поля вокруг образца № 7, снятое линейкой датчиков Холла

На Рис. 5 представлены результаты такой интерполяции для образца № 7.

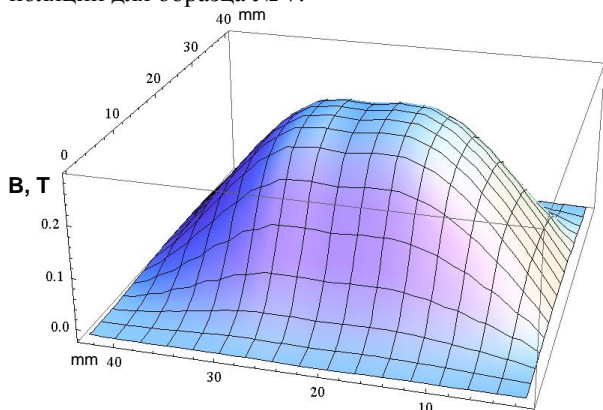


Рис. 5. Результаты интерполяции экспериментальных данных

В качестве меры изменения поля в дальнейших исследованиях использовался интеграл I (в относительных единицах) от вертикальной составляющей поля по всей поверхности, образованной в результате интерполяции измеренных данных. Проведенные исследования точности повторения этой меры для одного и того же образца, связанной с привязкой к границам образца измерительной системы, дают повторяемость на уровне 0,5%.

Для исследованных образцов до облучения величина I составляла: $I_1 = 172,2$; $I_2 = 176,4$; $I_4 = 178,1$; $I_7 = 175,4$.

Измерения поля со стороны южного полюса образцов дали значения интеграла, совпадающие с вышеприведенными в пределах точности измерений.

Из-за появления в результате облучения в образцах радиоактивных изотопов активность магнитов возросла. После снижения активности до допустимых для проведения измерений уровней были проведены измерения поля образцов № 1, 2 и 4.

На Рис. 6 показано интерполированное распределение поля со стороны южного полюса образца № 1 после облучения. Интегральный поток для этого измерения равен $I_1 = -108,28$.

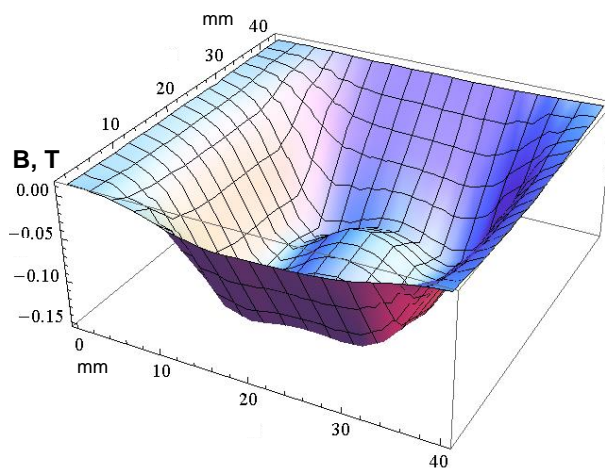


Рис. 6. Интерполированное распределение магнитного поля образца № 1 со стороны южного полюса после облучения

На Рис. 7 показано распределение поля этого образца, измеренного датчиком № 4.

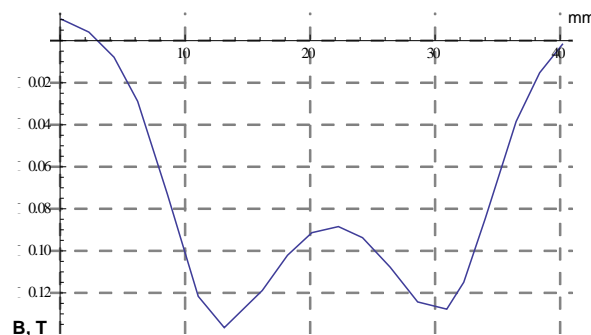


Рис. 7. Распределение поля образца № 1 после облучения, измеренное датчиком № 4

На Рис. 8 представлено распределение поля со стороны северного полюса образца № 2 после облучения.

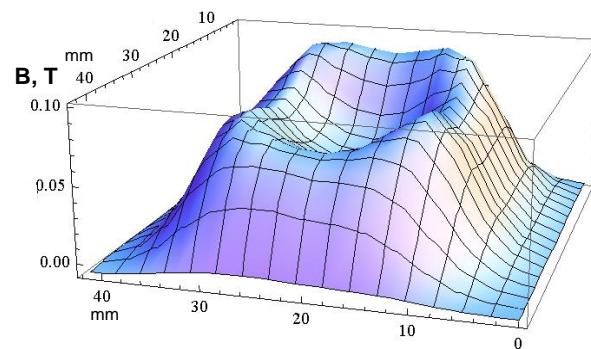


Рис. 8. Распределение поля образца № 2 со стороны северного полюса

Интеграл поля образца после облучения равен $I_2 = 74,69$, а распределение поля, определенное с помощью датчика № 4, представлено на Рис. 9.

Распределение поля вокруг образца № 4 после облучения представлено на Рис. 10. Интеграл поля равен $I_4 = 176,56$.

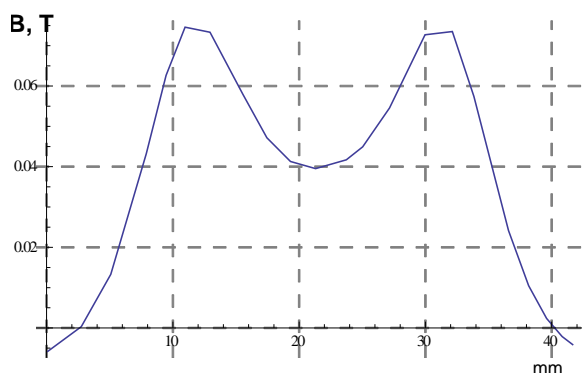


Рис. 9. Распределение поля по центру образца № 2 после облучения

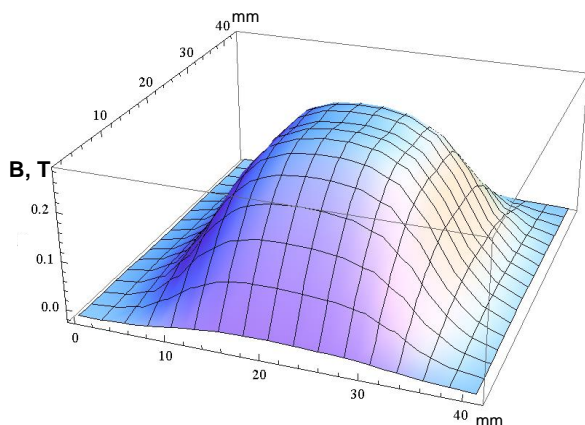


Рис. 10. Интерполированное распределение поля образца № 4 после облучения

Распределение поля, снятое датчиком № 4 после облучения (Рис. 11), практически совпадает с первоначальным распределением поля этого магнита.

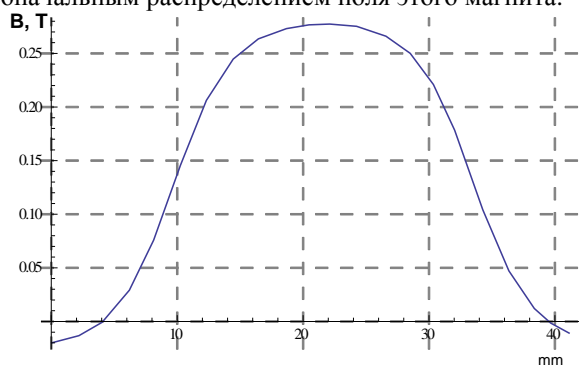


Рис. 11. Распределение поля со стороны северного полюса образца № 4 вдоль траектории движения относительно датчика № 4

Распределение поля вокруг образца № 7, измеренное после окончания измерений на облучённых магнитах, также не изменилось, что может свидетельствовать о временной стабильности поля образцов за время цикла исследования, продолжавшегося шесть месяцев.

ВЫВОДЫ

Как видно из приведенных данных, наблюдается существенное изменение магнитного поля образцов № 1 и 2, подвергшихся прямому воздействию электронного пучка с энергией 23 МэВ. При этом изменилась не только величина интеграла поля (0,62 и 0,42 от величины поля до облучения), но и характер

распределения поля вокруг образца. Распределения поля со стороны северного и южного полюсов практически совпадают. При этом необходимо отметить, что образцы облучались только со стороны южного полюса.

Величина поля и распределение его вокруг образца № 4, не подвергавшегося прямому облучению электронами, практически не изменились. При этом он испытал воздействие гамма-излучения, более чем в 50 раз превышавшего тормозное излучение образца, находящегося под влиянием электронного пучка. Образцы № 1 и 2 также находились в поле гамма-квантов практически той же интенсивности.

Проведенные исследования показали, что в результате ядерных превращений в указанных экспериментальных условиях наблюдается активация материала магнитов за счёт появления нестабильных изотопов.

Из полученных данных также следует, что в разработанном магните [9] с постоянным полем воздействие гамма-излучения, возникающего в процессе работы ускорителя ЭПОС» [8], не окажет существенного влияния на величину поля в зазоре этого магнита. Поскольку магнитный материал из Nd-Fe-B сплава в конструкции магнита экранирован достаточно толстыми слоями титана и железа, исключено прямое попадание электронного пучка на поверхность материала, приводящее к изменению поля.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. P. Vagin, S. Francoual, J. Keil, O.H. Seeck, J. Stempfer, A. Schöps, M. Tischer. Commissioning Experience with Undulators at PETRA III // *Proc. of SRI2012*, Lyon, July 2012, *Journal of Physics: Conference Series*, 2013, v. 425, p. 032013.
2. M. Barthelmess, U. Englisch, J. Puger, A. Schops, J. Skupin, M. Tischer. Status of the PETRA III Insertion Devices // *Proc. of EPAC08*, Genoa, Italy, 2008, p. 2320-2322.
3. P. Vagin, O. Bilani, A. Schöps, S. Tripathi, T. Vielitz, M. Tischer. Radiation damage of undulators at PETRA III // *Proc. of IPAC2014*, Dresden, Germany, 2014, p. 2019-2021.
4. Rui Qiu, Hee-Seock Lee, Junli Li, Tae-Yeong Koo, T. Bizen & Qiyong Fan. Demagnetization of Nd-Fe-B Permanent Magnet at 2.5 GeV Electron Accelerator // *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2008, v. 45: sup. 5, p. 46-49.
5. T. Bizen, Y. Asano, X.-M. Maréchal. SPring-8. Irradiation Experiments and Magnet Protection Plans at SPring-8. <http://www.slideserve.com/xarles/irradiation-experiments-and-magnet-protection-plans-at-spring-8>.
6. T. Bizen, Y. Asano, T. Hara, X. Marechal, T. Seike, T. Tanaka, H. Kitamura, H.S. Lee, D.E. Kim, J.S. Bak. Demagnetization of undulator magnets irradiated by high energy electrons, www-linac.kek.jp/~suwada/ERLSC/F/DATA/.../2_0_11.PDF.
7. T. Bizen. Brief review of the approaches to elucidate the mechanism of the radiation-induced demagnetization // *Proceedings of ERL2011*. Tsukuba, Japan, p. 121-126.

8. M.I. Ayzatsky, V.N. Boriskin, A.M. Dovbnya, V.A. Kushnir, V.A. Popenko, V.A. Shendrik, Yu.D. Tur, A.I. Zykov. The NSC KIPT electron linacs – R&D // *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Nuclear Physics Investigations"* (33). 2003, № 2, p. 19-25.
9. 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 Science and Technology. Series "Nuclear Physics Investigations"* (100). 2015, № 6, p. 13-17.
10. A. Dovbnya, I. Guk, S. Kononenko, G. Koval'ev, A. Mytsykov. The second output beam channel at accelerator "EPOS" // *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Nuclear Physics Investigations"* (91). 2014, № 3, p. 8-12.
11. Yasuhiro Une and Masato Sagawa. Enhancement of Coercivity of Nd-Fe-B Sintered Magnets by Grain Size Reduction // *J. Japan Inst. Metals*. 2012, v. 76, № 1, p. 12-16.
12. V.A. Bovda, A.M. Bovda, I.S. Guk, A.N. Dovbnya, S.G. Kononenko, V.N. Lyashchenko, A.O. Mytsykov, L.V. Onischenko. Dipole magnet with a permanent magnetic field for technological electron accelerator // *Proc. Rare-Earth and Future Permanent Magnets and their Applications (REPM 2016)*. 2016, Darmstadt, Germany, p. 481-488.
13. I.S. Guk, A.N. Dovbnya, S.G. Kononenko, V.N. Lyashchenko, A.Yu. Mytsykov, V.P. Romas'ko, A.S. Tarasenko, V.N. Shcherbinin. Dipole magnet of the energy filter for the accelerator "EPOS" // *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Nuclear Physics Investigations"* (79). 2012, № 3, p. 67-69.
14. L.A. McNelles, J.L. Campbell. Absolute efficiency calibration of coaxial Ge(Li) detectors for the energy range 160...1330 keV // *Nuclear Instruments and Methods*. 1973, v. 109, Issue 2, p. 241-251.
15. Teruhiko Bizen et al. Radiation-induced magnetization reversal causing a large flux loss in undulator permanent magnets // *Nature Scientific Reports*, 37937, 2016, p. 1-9.

Статья поступила в редакцию 24.10.2017

MAGNETIC PROPERTIES OF Nd-Fe-B MAGNETS UNDER ELECTRON BEAM IRRADIATION WITH THE ENERGY 23 MeV

V.A. Bovda, A.M. Bovda, I.S. Guk, A.N. Dovbnya, V.N. Lyashchenko, A.O. Mytsykov, L.V. Onischenko, A.I. Kalinichenko, S.S. Kandybei, O.A. Repikhov

The change of magnetic field of two Nd-Fe-B magnets was investigated under the direct irradiation with an electron beam with energy of 23 MeV on the accelerator "EPOS". The absorbed dose for the samples was 16 Grad. It was shown that integral of the normal magnetic flux component at a distance of about 3 mm from the surface of the samples after the irradiation was about 0.62 and 0.42 of the magnetic flux before irradiation. There was no significant change in the magnetic flux of sample subjected to the bremsstrahlung outside the electron beam.

ЗМІНА ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗРАЗКІВ Nd-Fe-B-МАГНІТІВ ПРИ ОПРОМІНЕННІ ЕЛЕКТРОННИМ ПУЧКОМ З ЕНЕРГІЄЮ 23 MeV

В.О. Бовда, О.М. Бовда, І.С. Гук, А.М. Довбня, В.М. Лященко, А.О. Мициков, Л.В. Оніщенко, О.І. Калініченко, С.С. Кандибей, О.О. Репіхов

Були проведені експериментальні дослідження поля двох зразків магніту з Nd-Fe-B-сплаву при прямому опроміненні електронним пучком з енергією 23 MeV на прискорювачі "ЕПОС". Поглинена доза для зразків складала 16 Град. Величина інтеграла вертикальної складової магнітного поля навколо зразка магніту на відстані близько 3 мм від поверхні зразків складала після опромінення 0,62 і 0,42 від величини поля до опромінення. Для зразка, що піддавався впливові гальмівного випромінювання поза пучком електронів, істотної зміни поля не спостерігалось.