

ИЗМЕНЕНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ -МАГНИТОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ 10 МэВ-ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

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

Изучалось изменение магнитного поля образцов, изготовленных из $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ -сплава, при воздействии на них электронного и фотонного излучений технологического ускорителя с энергией 10 МэВ. Проведенные исследования показали, что поле образцов не меняется при прямом облучении поверхности электронным пучком. Поглощённая доза в эксперименте составляла 16 Град. Увеличение дозы облучения в 10 раз не приводит к изменению величины поля образца. Под воздействием тормозного излучения электронов в образце, расположенном вне воздействия электронного пучка, существенного изменения поля также не наблюдается.

ВВЕДЕНИЕ

Дипольные магниты, квадрупольные и другие многополюсные линзы, солениды, изготовленные из постоянных магнитов, уже давно находят широкое применение в ускорителях заряженных частиц и других физических устройствах [1, 2]. В случае работы при высоких температурах и в агрессивных условиях изделия из $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ -сплава имеют определённые преимущества перед устройствами, изготовленными из Nd-Fe-B-сплава. Температура Кюри $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ -сплава равна 825°C . Максимальная рабочая температура самариевых магнитов достигает 350°C . Температура Кюри для магнитов из сплава Nd-Fe-B равна 312°C , поэтому в условиях реальных экспериментов рабочие температуры для этого сплава не превышают 180°C .

Температурная стабильность магнитов NdFeB меньше, чем у магнитов SmCo – их температурный коэффициент магнитной индукции изменяется от 0,07 до 0,13 (%/°C) в противовес – 0,035 (%/°C) у SmCo.

Кроме того, магниты из самариевого сплава меньше подвержены коррозии, чем неодимовые магниты, и обычно не требуют покрытия.

Недостатками SmCo-магнитов являются их высокая стоимость и хрупкость. Высокая цена материала обусловлена использованием в нём дорогих редкоземельных металлов.

Несмотря на указанные недостатки, магниты из $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ -сплава незаменимы в тех случаях, когда в условиях, приближенных к критическим, изделие должно оставаться стабильным. Такие условия могут часто возникать при использовании магнитов на технологических ускорителях электронов.

Проведенные ранее исследования воздействия пучков электронов и гамма излучения на магнитные свойства магнитов из SmCo-сплава [3 - 5] показали достаточно малое воздействие – 82 и 17 МэВ электронного пучка и гамма-излучения кобальтового источника на магнитный поток образцов магнитов. При этом необходимо отметить, что величины поглощенных доз в материале в этих исследованиях значительно ниже, чем обычно могут быть созданы на технологических ускорителях электронов.

Магниты из $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ -сплава изготавливаются методами порошковой металлургии. Сначала изготавливается порошок путём размолла сплава, затем порошок прессуется в изделие с одновременной ориентацией частиц в магнитном поле, после чего проводится спекание заготовок в изделие. Для получения точных размеров спеченные магниты шлифуют абразивным инструментом.

Образцы магнитов для исследований были изготовлены по описанной выше технологии. В серии измерений были использованы пять образцов магнитов. Геометрические размеры магнитов – $30 \times 24 \times 12$ мм. Масса образцов после окончательной обработки колебалась от 70,55 до 73,2 грамм.

В работе исследовалось изменение магнитного поля вокруг предварительно намагниченных образцов в результате воздействия на них электронного пучка и тормозного излучения электронов большой интенсивности.

1. УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Образцы магнитов облучались электронным пучком линейного технологического ускорителя КУТ-1 [6] с энергией 10 МэВ. Ось ускорителя располагается вертикально, пучок выводится сверху вниз. Развернутый магнитом с изменяемым полем пучок электронов выводился из ускорителя в воздух через титановую фольгу. После этого он рассеивался на фольге из алюминия и попадал на поверхность образцов магнита. Образцы ориентировались таким образом, что в процессе облучения электроны падали на южный полюс магнита размером 30×24 мм. Плотность потока электронов в пределах размеров образца не изменялась больше, чем на 10%.

В процессе облучения образцы охлаждались водой с температурой не более 40°C .

Поле облучения размером 30×300 мм вокруг образцов было заполнено материалом с плотностью $3,5 \text{ г/см}^3$, толщиной около 15 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 10 раз интен-

сивность тормозного излучения, возникающего при торможении электронов в самом образце.

Образцы № 1, 2 и 3 облучались непрерывно в течение 20 часов. Электронный пучок падал прямо на поверхность образцов № 1 и 2. Поглощённая доза от электронов для образцов № 1 и 2 составляла 16 Град (общий поток электронов, попавший на 1 см² образца, был равен 1,4×10¹⁷). Образец № 3 облучался одновременно с образцом № 2, но располагался вне электронного пучка, на расстоянии 40 мм от него. Образец № 5 облучался сеансами длительностью по 20 часов с перерывами 24 часа. Суммарная поглощённая доза для этого образца составила 160 Град. Образец № 4 не подвергался воздействию облучения и служил опорным для магнитных и радиационных измерений.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАДИАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Спустя 48 часов после окончания облучения каждого образца были сняты спектры гамма-квантов, испускаемых магнитами.

Для измерения γ -спектров исследуемых магнитов использовался спектрометр CANBERRA GC1818 с коаксиальным полупроводниковым детектором из сверхчистого германия. Относительная эффективность детектора составляет 18%, а энергетическое разрешение – 1,8 кэВ для линий ⁶⁰Co. 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 ¹³³Ba, ¹³⁷Cs, ²⁴¹Am, ²²Na, ⁶⁰Co и ¹⁵²Eu. Для получения значений абсолютной эффективности выполнялась подгонка данных функцией Кэмпбела [7].

На Рис. 1 представлен спектр гамма-квантов, испускаемых образцом № 2 за время 15 мин. Он характерен для изотопа ¹⁵³Sm, образованного в результате реакции ¹⁵⁴Sm(γ ,n)¹⁵³Sm, идущей под действием тормозного излучения электронов. Время жизни этого изотопа равно 46,284 часа. Спектры гамма-квантов, испускаемых образцами № 1, 3 и 5, аналогичны спектру, представленному на Рис. 1. Наведенная активность образца № 3 после облучения ниже активности магнита № 2 в 5 раз. Активность образцов после облучения практически не выходит за пределы допустимых норм.

Для выяснения возможности работы с образцами магнитов при больших энергиях пучка, образец из Sm₂Co₁₇-сплава массой 0,2 г облучался на пучке электронного технологического ускорителя ЭПОС с энергией 23 МэВ [8]. Время облучения определялось исходя из условия получения образцом объёмной дозы, эквивалентной облучению его на ускорителе КУТ. На Рис. 2 представлен спектр, полученный с экспозицией 15 мин для этого образца после облучения. Геометрия измерения при фиксации спектров, представленных на Рис. 1 и 2, практически не изменялась. Активность образца в основном обусловлена изотопом ⁵⁸Co, образованным в резуль-

тате реакции ⁵⁹Co(γ , n)⁵⁸Co. Время жизни этого изотопа равно 70,86 дня.

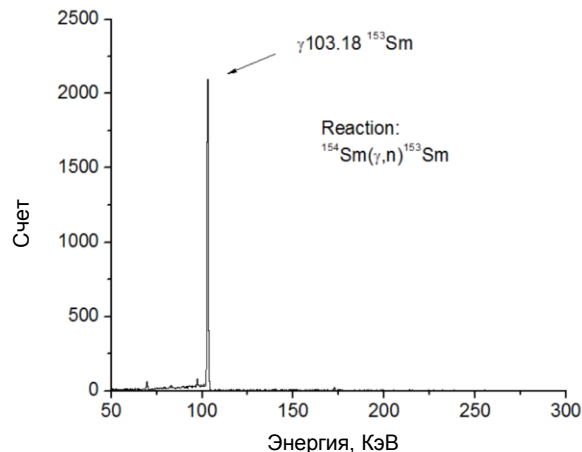


Рис. 1. Характерный спектр наведенной γ -активности, измеренный для магнита № 2

Активность образца после облучения оказалась очень высокой, что указывает на нецелесообразность использования магнитов из этого сплава на технологических ускорителях при энергиях больше 10 МэВ.

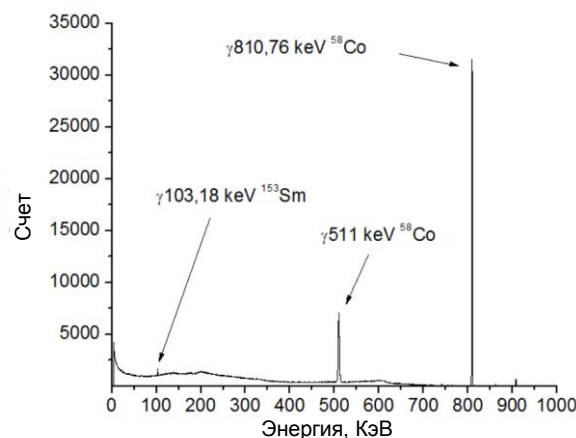


Рис. 2. Спектр наведенной γ -активности при облучении образца из Sm₂Co₁₇-сплава электронным пучком с энергией 23 МэВ

Достаточно большое время жизни изотопа ⁵⁸Co исключает возможность оперативного использования магнитов из Sm₂Co₁₇-сплава на таких установках.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Перед началом облучения магнитное поле вокруг образцов обмерялось. Были использованы два способа измерения поля [9 - 12].

Прецизионные измерения магнитного потока проводились с использованием катушки Гемгольца [12, 13]. Результаты измерения магнитного потока для образцов до и после облучения представлены в Таблице. Видно, что величина магнитного потока, измеренная вдоль оси легкого намагничивания образцов, не изменяется в пределах ошибки измерений (3%).

Образец	1	2	3	4	5
До обл.	22,0	21,1	21,0	21,5	22,0
После	22	22	22	22	22

Второй способ заключался в измерении распределения поля вокруг образца и на его основании оценки полного магнитного потока.

С этой целью использовалась линейка из семи датчиков Холла [14], 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 матрицы с датчиками на расстоянии, равном 3,05 мм. Расстояние между точками измерения вдоль движения образца изменялось от 2 до 5 мм. Точность измерения положения образца равна 1 микрону.

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%.

На Рис. 3 представлено распределение поля со стороны северного полюса магнита № 1, до облучения образцов, измеренное по описанной методике.

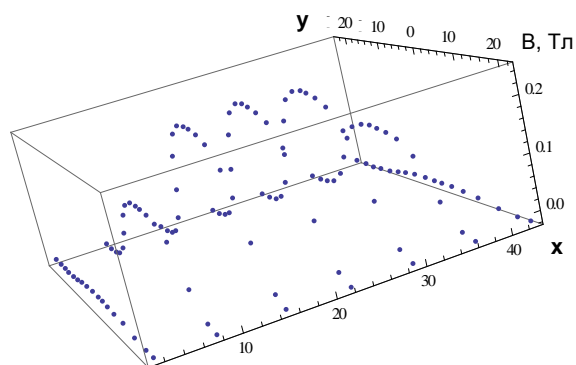


Рис. 3. Данные распределения поля вокруг образца, полученные с помощью семи датчиков Холла

Распределения поля, снятые четвертым датчиком со стороны северного и южного полюса образца № 1, представлены на Рис. 4 и 5.

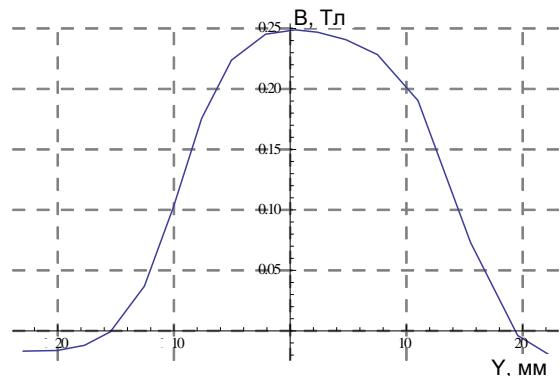


Рис. 4. Распределение поля со стороны северного полюса магнита №1, полученное с помощью четвертого датчика Холла

По измеренным точкам (см. Рис. 3) была проведена трёхмерная квадратичная интерполяция полученных данных между точками измерения. На Рис. 6 представлены результаты такой интерполяции для

измерений поля образца № 1 со стороны северного полюса магнита до облучения. На Рис. 7 представлено интерполированное распределение поля для южного полюса этого образца.

В качестве меры изменения поля 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%.

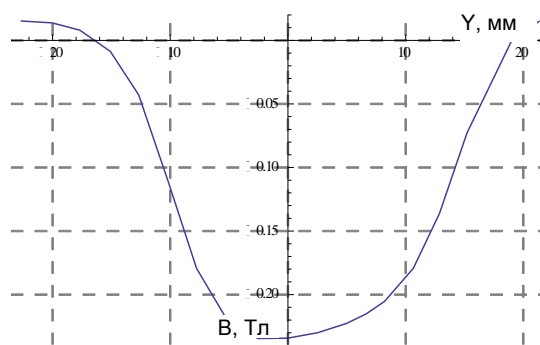


Рис. 5. Распределение поля со стороны южного полюса магнита № 1, полученное с помощью четвертого датчика

Для северного полюса образца № 1 этот интеграл равен 153,565, а для южного – -151,94.

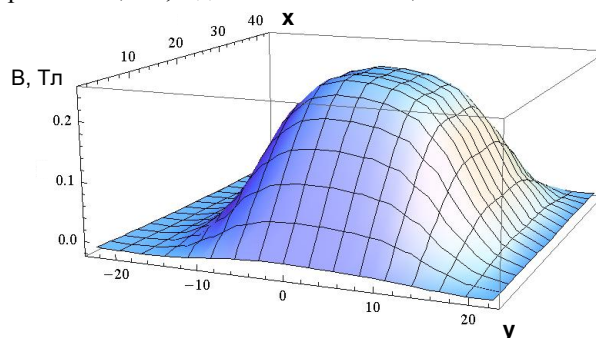


Рис. 6. Интерполированное распределение поля со стороны северного полюса магнита № 1 до облучения

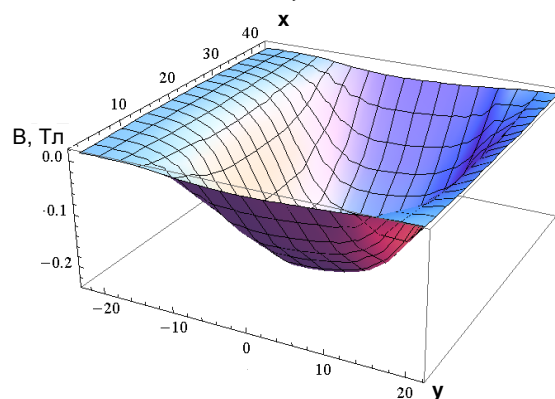


Рис. 7. Интерполированное распределение поля со стороны южного полюса магнита № 1

Распределения поля образца № 1 вдоль оси x , при значении Y равном 0, для интерполированных распределений (см. Рис. 6 и 7) представлены на Рис. 8. Для наглядности знак распределения для северного

полюса образца на рисунке изменён на противоположный.

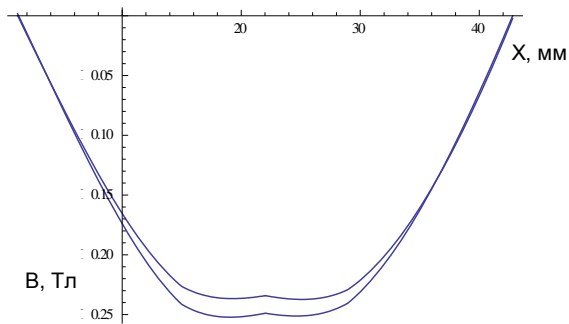


Рис. 8. Распределение поля вдоль оси x со стороны северного и южного полюсов магнита

Распределение поля, измеренное четвёртым датчиком со стороны южного полюса образца № 2 до облучения, представлено на Рис. 9.

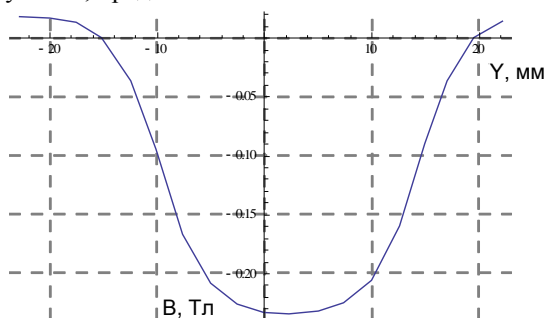


Рис. 9. Распределение поля со стороны южного полюса образца № 2

Интерполированное распределение поля образца № 2 со стороны южного полюса магнита до облучения представлено на Рис. 10.

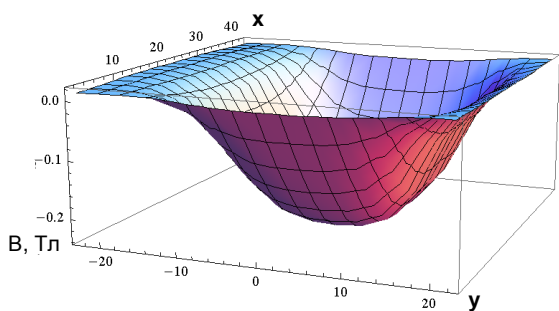


Рис. 10. Поле образца № 2 до облучения

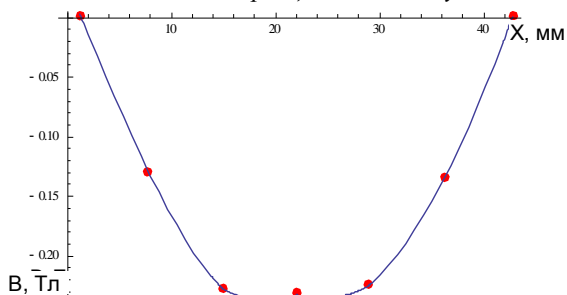


Рис. 11. Распределение поля вдоль оси x

Для южного полюса образца № 2 интеграл поля равен $-149,462$, а для северного совпадает с этим значением в пределах точности измерений.

На Рис. 11 сплошной линией представлено интерполированное распределение поля вдоль оси x со

стороны южного полюса магнита. Точки – измеренное распределение поля со стороны северного полюса (знак измеренных величин изменён).

Характер распределения поля вокруг образцов № 3, 4 и 5 аналогичен распределениям вокруг образца № 2 (см. Рис. 9-11). Распределения поля симметричны относительно осей образцов. Величина интеграла поля с южного полюса для образца № 3 равна $-149,007$, для № 4 – $-152,519$, для № 5 – $-152,326$. Величины интеграла поля с северного полюса для всех этих образцов в пределах точности измерений совпадают с приведенными выше для южного полюса.

Интерполированное распределение поля с южного полюса вокруг образца № 1 после облучения представлено на Рис. 12.

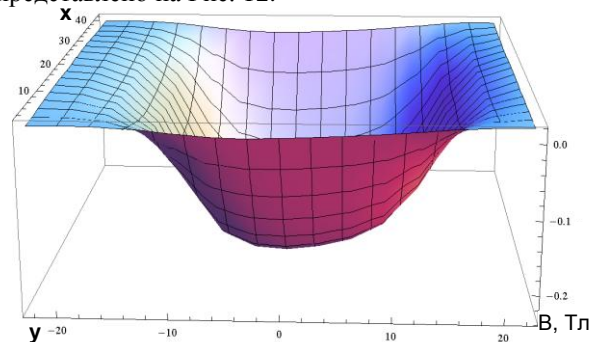


Рис. 12. Интерполированное распределение поля со стороны южного полюса магнита № 1 после облучения

Величина интеграла поля образца № 1 со стороны южного полюса после облучения равна $-150,64$.

Распределение поля, измеренное четвёртым датчиком со стороны северного полюса (см. Рис. 13), совпадает с распределением, полученным на этом образце до облучения (см. Рис. 4). Величина интеграла поля образца № 1 со стороны северного полюса после облучения равна $153,962$.

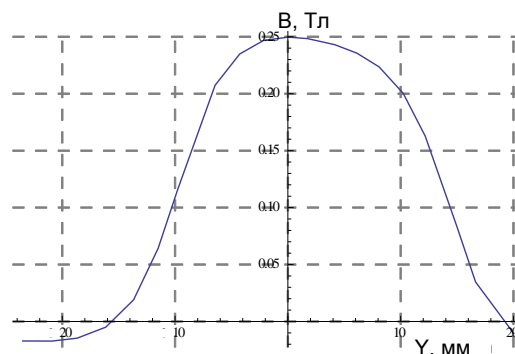


Fig. 13. Распределение поля со стороны северного полюса магнита № 1 после облучения, полученное с помощью четвёртого датчика Холла

Распределения вдоль оси x после облучения симметричны и совпадают с распределениями поля до облучения (см. Рис. 8).

Интегралы поля для образца № 2 после облучения равны $149,185$ и $-149,434$, для образца №3 – $148,397$ и $-149,727$, для образца №5 – $149,714$ и $-150,065$ для северного и южного полюсов соответственно.

Интеграл для магнита № 4 после окончания измерений равен $152,496$ и $-155,135$.

Распределения поля вокруг образцов № 2, 3 и 5 после облучения симметричны относительно осей образцов и практически совпадают с распределениями до облучения (см., например, Рис. 9).

ВЫВОДЫ

Были проведены исследования влияния облучения образцов из $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ -сплава электронным пучком с энергией 10 МэВ и тормозным излучением такого пучка. Поглощённая доза в 16 Град электронным пучком и тормозное излучение этого пучка не изменяют распределения поля вокруг образцов. Увеличение поглощенной дозы в 10 раз не приводит к заметному изменению поля вокруг образца.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. S. Caspi, S. Gourlay, M. Green, G. Sabbi. *T2 Working Group Summary Report*. SLAC-PUB-9478, August 2002.
2. Y. Iwashita, M. Ichikawa, Y. Tajima, H. Fujisawa, S. Kuroda, T. Okugi, T. Tauchi, M. Kumada, C.M. Spencer. Modification and measurement of the adjustable permanent magnet quadrupole for the final focus in a linear collider, SLAC-PUB-13090, Contributed to Particle Accelerator Conference (PAC 2007), 6/25/2007-6/29/2007, Albuquerque, NM // *Conf. Proc. C070625:2719,2007*; Conference: Particle Accelerator Conference PAC07 25-29 Jun 2007, Albuquerque, New Mexico.
3. S. Okuda, K. Ohashi, N. Kobayashi. Effects of electron-beam and γ -ray irradiation on the magnetic flux of Nd-Fe-B and Sm-Co permanent magnets // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. 1994, B 94, p. 227-230.
4. Henry B. Luna, Xavier K. Maruyama, Nicholas J. Colella, John S. Hobbs, Robert S. Hornady, Bernhard Kulke, James V. Palomar. Bremsstrahlung radiation effects in rare earth permanent magnets // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. 1989, A285, p. 349-354.
5. R.S. Gao, L. Zhen, W.Z. Shao, X.P. Hao, X.Y. Sun, L. Yang, B.Y. Wang. Study of γ -ray irradiation effect on permanent magnets // *J. Appl. Phys.* 2008, v. 103, 07E136, p. 103-105.
6. M.I. Ayzatsky, V.N. Boriskin, et al. The NSC KIPT electron linacs – R&D // *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Nuclear Physics Investigations"*. 2003, № 2, p. 19-25.
7. 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.
8. 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"*. 2014, № 3, p. 8-12.
9. S.V. Vonsovskiy. *Magnetizm*. Moscow: "Nauka". 1984, 208 p.
10. Ю.В. Афанасьев, Н.В. Студенцов, В.Н. Хореев, Е.Н. Чечурина, А.П. Щелкин. Средства измерений параметров магнитного поля // *Энергия*. 1979.
11. *Основы метрологии и электрические измерения* / Под редакцией Е.М. Душина. Ленинград: "Энергоатомиздат", 1987.
12. V. Hud. Methods and devices for quality control of the permanent magnets // *Scientific journal "Transactions of KrNU"* KRNU. 2015, ISSUE 5(94), p. 32-37.
13. S.R. Trout. Use of Helmholtz Coils for Magnetic Measurements // *IEE Transactions on Magnetics*. 1988, № 4, p. 2108-2111.
14. 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"*. 2012, № 3, p. 67-69.

Статья поступила в редакцию 13.10.2017

MAGNETIC PROPERTIES OF $\text{SM}_2\text{CO}_{17}$ MAGNETS UNDER 10 MeV ELECTRON BEAM

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 aim of this study was to investigate the performance of $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ -magnets under 10 MeV photon irradiation in the technological accelerator. It was shown that direct irradiation of the magnets by electron beam did not result in the reduction of magnetic flux. The absorbed dose was 16 Grad. A ten times increase in the radiation dose had no effect on the magnetic flux also. Magnetic properties of the samples located beyond the direct electron irradiation and underwent the bremsstrahlung irradiation left unchanged.

ЗМІНА МАГНІТНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ $\text{SM}_2\text{CO}_{17}$ -МАГНІТІВ ПІД ВПЛИВОМ 10 MeV-ЕЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

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

Вивчалася зміна магнітного поля зразків, виготовлених з $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ -сплаву, при дії на них електронного і фотонного випромінювання технологічного прискорювача з енергією 10 MeV. Проведені дослідження показали, що поле магнітів не міняється при прямому опроміненні поверхні електронним пучком. Поглинена доза в експерименті складала 16 Град. Збільшення дози опромінення в 10 разів не призводить до зміни величини поля зразка. Під впливом гальмівного випромінювання електронів у зразка, розташованому поза впливом електронного пучка, істотної зміни поля також не спостерігається.