

УДК 621.313.822.3

АКТУАЛЬНОСТЬ ВОПРОСА ОБ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ
ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НЕЙТРОННОГО
ПОТОКА И ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ
THE RELEVANCE OF THE ISSUE OF THE OPERATIONAL STABILITY
OF PERMANENT MAGNETS UNDER THE INFLUENCE OF NEUTRON
FLUX AND HIGH TEMPERATURE

Вознесенский М. В., Чернышев В. М., Седов А. Р., Касаткин Н. И.,
Басов А. А., к-т. техн. наук, доцент; Семенов А. Н., ст. преподаватель,
Нижегородский государственный технический университет
им. Р. Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия
M. Voznesensky, V. Chernyshev, A. Sedov, N. Kasatkin, A. Basov, Candidate
of Technical Sciences, Associate Professor; A. Semenenko, Senior Lecturer,
Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev,
Nizhny Novgorod, Russia

Аннотация. Рассмотрен вопрос радиационной и термической стойкости постоянных магнитов. Измерена магнитная индукция образца магнита из NdFeB до и после облучения в нейтронном поле вблизи Pu-Be источника. Потери остаточной магнитной индукции составили 4,2 % за 15 дней облучения. Также измерена магнитная индукция до и после нагрева магнита выше точки Кюри. Сделана оценка срока службы магнита. Описаны возможные причины потерь магнитной индукции.

Abstract. The issue of radiation and thermal resistance of permanent magnets is considered. The magnetic induction of a sample of NdFeB magnets before and after irradiation in a neutron field near a Pu-Be source was measured. The loss of residual magnetic induction amounted to 4.2 % over 15 days of irradiation. Magnetic induction was also measured before and after heating the magnet above the Curie point. The service life of the magnet is estimated. Possible causes of magnetic induction losses are described.

Ключевые слова: постоянный магнит, нейтронное поле, остаточная магнитная индукция, радиационная стойкость, термическая стойкость.

Key words: permanent magnet, neutron field, residual magnetic induction, radiation resistance, thermal resistance.

ВВЕДЕНИЕ

Магниты – изделия, главной особенностью которых является наличие собственного магнитного поля. За счет своей силы притяжения и хороших эксплуатационных качеств нашли свое обширное применение в медицине, электроэнергетике, топливной промышленности и атомной энергетике.

Однако, любой материал обладает длительностью своего действия, определяющим «время жизни» установки, для которой он предназначен.

Магнитное поле постоянного магнита может потерять свою силу, что приведет к выходу из строя ответственного агрегата. Поэтому важно изучать условия, влияющие на срок службы магнитного материала. В данной работе к ним относятся флюенс быстрых нейтронов и высокая температура.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В настоящее время наиболее надежным и перспективным электродвигателем, способным работать в атомной энергетике, является бесконтактный двигатель постоянного тока (БДПТ). Он существенно лучше обычных двигателей постоянного тока за счет отсутствия электромеханического коллектора, создающего радиопомехи, снижающего надежность и т. д. Постоянный магнит является главным элементом такого рода двигателей, так как определяет основные параметры его работы.

Другой немаловажной системой, обеспечивающей контроль, управление и прекращение цепной реакции в ядерном реакторе является исполнительный механизм (ИМ) системы управления и защиты (СУЗ). В него входит совокупность оборудования, которая создает условия для перемещения стержня поглотителя в режимах как автоматического, так и дистанционного управления. Поскольку на средства управления и защиты возложены ответственные функции, обеспечивающие ядерную безопасность, то и важнейшим требованием, предъявляемым к ИМ, является высокая надежность, точность, строгое выполнение предписанных процессов регулирования и контроля каждым элементом системы. Одним из этих элементов являются постоянные магниты, применяемые в системах индикации с датчиками угловых и линейных перемещений. Свое место они также нашли в магнитных муфтах, используемых по соображениям безопасности [1, с. 63–69, 100–107].

В данное время наиболее популярны магниты на основе редкоземельных металлов – неодима и самария. После открытия в 70–80х годах и до сегодняшнего дня они активно применяются в различных отраслях промышленности. В том числе и в ядерной отрасли за счет высокой намагниченности.

Магниты из сплава самарий-кобальт ($SmCo$) имеют наилучшую температурную стабильность, сопротивление к коррозии и устойчивость к окислению (нет необходимости в покрытии), а также высокие значения максимального энергетического произведения ($240 \frac{кДж}{м^3}$) и коэрцитивной силы ($1275 \frac{кА}{м}$) [2].

Магниты на основе неодима ($NdFeB$) обладают большим сроком службы, хорошей механической прочностью, небольшой массой и низкой стоимостью, что позволяет применять их повсеместно. Они также имеют высокие значения магнитной индукции ($1,42 Тл$), коэрцитивной силы ($950 \frac{кА}{м}$) и максимального энергетического произведения ($380 \frac{кДж}{м^3}$).

Воздействие нейтронного излучения является фактором, ведущим к изменению магнитных свойств рассматриваемых магнитов. Так как, в отличие от других типов излучений, нейтроны передают свою энергию исключительно посредством взаимодействия с ядрами атомов мишени. Взаимодействие частиц, не имеющих электрического заряда, с атомами решетки приближенно можно рассматривать как столкновение двух шаров, после которого атом решетки приобретает энергию [2, с. 35–36]:

$$E' \approx 2A^{-1}E_n, \quad (1)$$

где A – массовое число атома ($A > 20$).

Если полученная от нейтрона энергия E' превысит пороговую энергию смещения атома E_d , то происходит перемещение атома из узла кристаллической решетки в междоузлие. Образуется дефект.

Длительное воздействие нейтронного потока приводит к разрушению кристаллической структуры магнитного материала. Постепенно в веществе накапливаются простые изолированные дефекты – вакансии и междоузельные атомы, а также сложные комплексы – «простой дефект + химическая примесь». Вследствие этого упорядоченная доменная структура магнита перестраивается, и величина создаваемого магнитного потока падает.

Процесс активации железа посредством ядерных реакций $Fe-54(n, p)$ с последующим образованием $Mn-54$ также вносит свой вклад в уменьшение остаточной магнитной индукции. Пороговая энергия нейтронов для такого превращения составляет 2 МэВ .

Был проведен эксперимент, в ходе которого образец магнита из неодима с размерами 20×3 мм был помещен в нейтронное поле $Pu-Be$ источника быстрых нейтронов. Радиационные параметры источника представлены в табл. 1.

Таблица 1

Радиационные параметры и размеры источника

Тип источника	Наружный размер, мм		Размер активной части, мм, не более		Поток быстрых нейтронов от источника в угол $4\pi_{\text{ср}}$, нейтр./с.	Активность, Бк, не более
	диаметр	высота	диаметр	высота		
ИБН-8	$24,0 \pm 0,3$	$36,0_{-1,0}$	16,0		$(2,0 \pm 0,4) \cdot 10^6$	$5,0 \cdot 10^{10}$

Средняя энергия быстрых нейтронов $Pu-Be$ источника $E_0 = 4,55 \text{ МэВ}$.

Образец располагался в непосредственной близости к источнику плотно прилегая к его активной части. В таком случае, условно принимая источник точечным, можно оценить плотность потока нейтронов на поверхности магнита.

$$n = \frac{S}{4\pi \cdot r^2} = \frac{2 \cdot 10^6 \text{ н/с}}{4\pi(0,8\text{см})^2} = 2,5 \cdot 10^5 \frac{\text{н}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}, \quad (2)$$

где S – интенсивность источника;

$r = 16 \text{ мм} / 2$ – расстояние до магнита.

Процесс облучения длился ровно 15 дней. Флюенс нейтронов, которому подвергся магнит, по итогу составлял:

$$\Phi = n \cdot t = 2,5 \cdot 10^5 \frac{\text{нейтр}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}} \cdot (15 \cdot 24 \cdot 3600) \text{с} = 3,2 \cdot 10^{11} \frac{\text{н}}{\text{см}^2}. \quad (3)$$

Была определена остаточная магнитная индукция до и после эксперимента с помощью миллитесламетра ТПМ-250. В качестве характерной точки измерений был выбран центр магнита. Замеры в каждом случае были проведены 10 раз и усреднены. Результаты эксперимента приведены в табл. 2.

Таблица 2

Величина магнитной индукции в центре магнита до и после облучения

Время проведения эксперимента t (дни)	Время проведения эксперимента Φ (дни)	$B(t)$, мТл
0	0	82,82
15	15	79,33

Таким образом, за 15 дней облучения магнита в потоке быстрых нейтронов со средней энергией 4,55 МэВ неодимовый магнит потерял 4,2 % от начальной остаточной магнитной индукции.

Магниты состоят из миллионов молекул, объединенных в группы, которые называются доменами. Внутри них намагниченность имеет равномерное направление. При одинаковом установлении доменов их сила объединяется. В процессе размагничивания домены перестраиваются, переставая участвовать в создании общего магнитного поля. Если представлять домены как отдельные системы, то с помощью теоремы Бернулли можно сделать предположение, что скорость размагничивания пропорциональна количеству доменов, еще не подвергнувшихся переориентации. Если учитывать, что число однонаправленных доменов $N(t)$ пропорционально величине остаточной магнитной индукции $B(t)$, то можно вывести закон уменьшения магнитной индукции со временем.

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda N(t) \rightarrow (N(t) \sim B(t)) \rightarrow \frac{dB(t)}{dt} = -\lambda B(t). \quad (4)$$

Он означает, что величина приращения поля $-dB(t)$, произошедшая за короткий интервал времени dt , пропорциональна величине этого поля в

момент времени t . Константа λ – постоянная размагничивания, характеризующая вероятность изменения ориентации домена за единицу времени.

Решение этого дифференциального уравнения имеет вид:

$$B(t) = -B_0 e^{-\lambda t}. \quad (5)$$

В результате, величина остаточной магнитной индукции магнита уменьшается по экспоненциальному закону.

На основании аппроксимации результатов эксперимента (табл. 2) выражение (5) принимает вид:

В зависимости от прошедшего времени, сек.:

$$B(t) = -82,82 \cdot e^{-0,00287021t}. \quad (6)$$

В зависимости от полученного флюенса быстрых нейтронов, $\frac{H}{\text{см}^2}$:

$$B(\Phi) = -82,82 \cdot e^{-1,3359 \cdot 10^{-13} \cdot \Phi}, \quad (7)$$

где $B_0 = 82,82$ мТл – величина изначальной остаточной магнитной индукции.

Постоянные размагничивания:

$$\lambda_1 = 0,00287021, \text{ с}^{-1}, \quad (8)$$

$$\lambda_2 = 1,3359 \cdot 10^{-13}, \text{ см}^2/\text{н}. \quad (9)$$

Далее на рис. 1 представлена аналитическая зависимость (7).

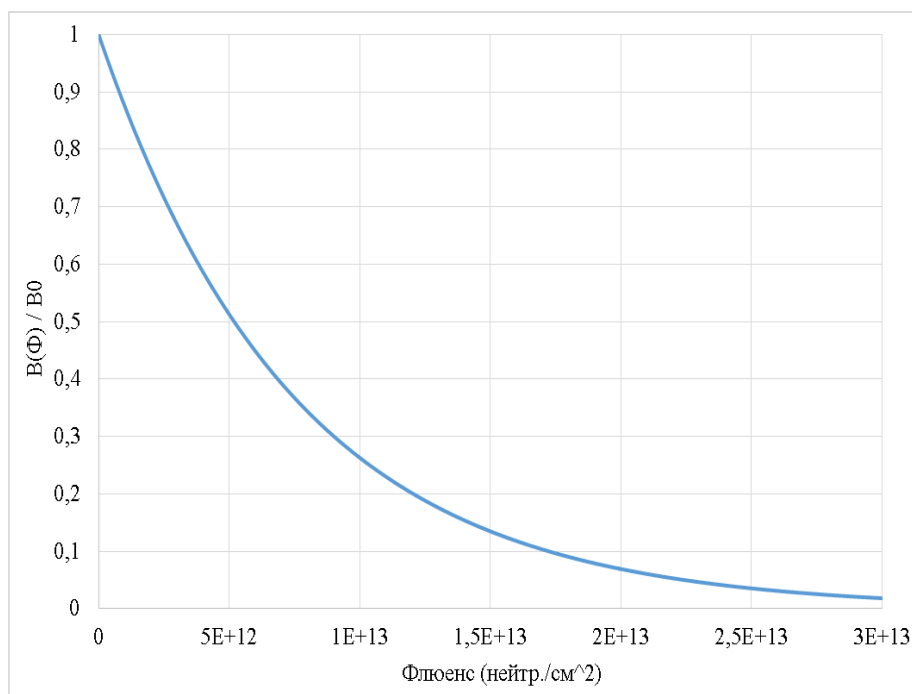


Рис. 1. Зависимость величины остаточной магнитной индукции магнита от времени

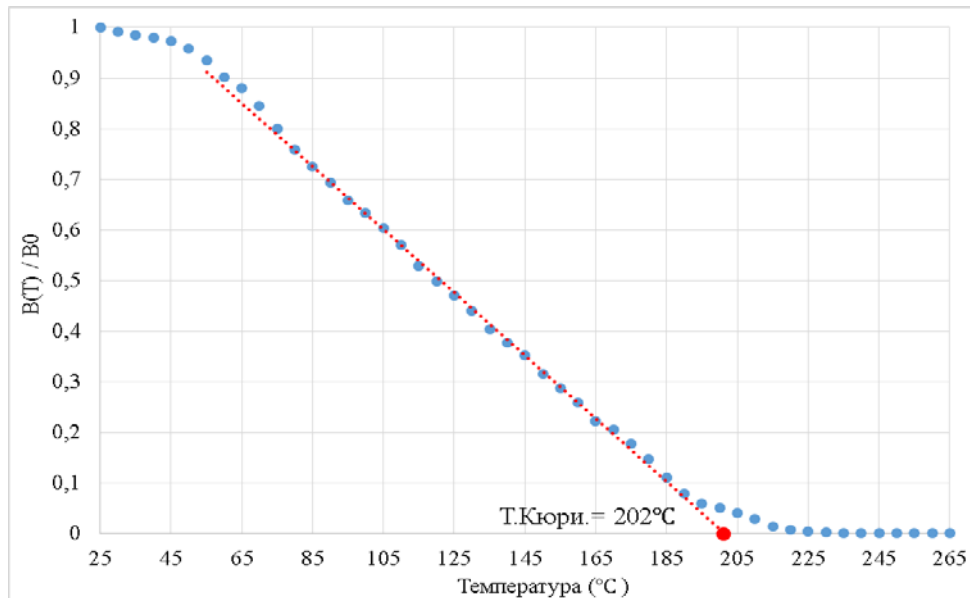


Рис. 2. Зависимость величины остаточной магнитной индукции магнита от температуры

Период полуразмагничивания образца неодимового магнита составляет:

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln(2)}{\lambda_1} = 241,5 \text{ дней}. \quad (10)$$

При флюенсе быстрых нейтронов:

$$\Phi_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln(2)}{\lambda_2} = 5,2 \cdot 10^{12} \frac{\text{н}}{\text{см}^2}. \quad (11)$$

В качестве оценки, при проектировании ядерных установок, такой флюенс можно считать существенным, опасно влияющим на работоспособность магнита.

При эксплуатации необходимо также учитывать нагрев магнита, поскольку материал теряет свои ферромагнитные свойства при достижении температуры близкой к точки Кюри. Максимальная рабочая температура для неодимовых ($NdFeB$) магнитов достигает $150^\circ\text{C} - 200^\circ\text{C}$. При этом у самарий-кобальтовых ($SmCo$) работоспособность сохраняется вплоть до 300°C [3, с. 9].

На рис. 2 приведена зависимость величины магнитной индукции магнита от температуры. При нагреве начинается размагничивание материала и чем больше температура, тем сильнее наблюдаемый эффект. Получая дополнительную энергию домены из атомов хаотически разворачиваются, переставая участвовать в создании общего магнитного поля.

Между 70°C и 180°C температуры магнита наблюдается линейный участок изменения магнитной индукции, описываемый уравнением (12).

$$B(T) = -0,00622 \cdot T + 1,2535 \text{ (}^\circ\text{C)}. \quad (12)$$

Точка Кюри для неодимового магнита согласно (12) равна $202\text{ }^{\circ}\text{C}$, что с достаточной точностью согласуется со справочной информацией.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, нейтронное и тепловое воздействие на магниты способно ускорить размагничивание материала и тем самым существенно снизить срок службы ответственных систем и механизмов ядерных установок. Это приводит к повышению фактора риска для аварийных ситуаций, а также величины амортизационных отчислений для замены оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Емельянов, И. Я. Основы конструирования исполнительных механизмов управления ядерных реакторов / И. Я. Емельянов, В. В. Воскобойников, Б. А. Масленок. Под ред. чл.-кор. АН СССР И. Я. Емельянова. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 232 с.: ил.
2. Власичев, Г. Н. Физика ядерных реакторов: учеб. Пособие / Г. Н. Власичев; Нижегород. гос. техн. ун-т. им. Р. Е.Алексеева. – Нижний Новгород, 2008. – 106 с.
3. Liu, J. Thermal stability and radiation resistance of SM-CO based permanent magnets / J. Liu, P. Vora, P. Dent et al. // Proceed. Space Nuclear Conf. – Boston, 2007.