

Научная статья

УДК 669.046.516.2

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-1-150-161

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ ГАДОЛИНИЕМ НА МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА СПЕЧЕННЫХ МАГНИТОВ Pr–Dy–Fe–Co–B

М.В. Потапов¹, А.В. Бузенков¹, Р.Б. Моргунов^{1,2}, В.П. Пискорский¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН, Черноголовка, Московская обл., Россия; office@icp.ac.ru

Аннотация. Исследована зависимость магнитных свойств спеченных материалов состава $(Pr_{1-z-x}Dy_xGd_z)_{12,55-12,81}(Fe_{0,80}Co_{0,20})_{\text{ост}}B_{5,71-6,25}$ ($x = 0,34-0,58$; $z = 0,11-0,33$) от концентрации гадолиния и температуры спекания в диапазоне 1120–1140 °С. Измерен температурный коэффициент индукции в области температур 20–100 °С. Получены кривые размагничивания по намагниченности и по индукции на вибрационном магнитометре при температуре 20±5 °С. Выявлены температурные зависимости намагниченности в области температур 300–600 К. Сделан вывод о влиянии гадолиния на магнитные характеристики спеченных материалов.

Ключевые слова: динамически настраиваемый гироскоп, редкоземельные металлы, остаточная индукция, коэрцитивная сила по намагниченности и по индукции, температурная зависимость намагниченности, прямоугольность кривой размагничивания

Для цитирования: Потапов М.В., Бузенков А.В., Моргунов Р.Б., Пискорский В.П. Влияние легирования гадолинием на магнитные свойства спеченных магнитов Pr–Dy–Fe–Co–B // Труды ВИАМ. 2026. № 1 (155). С. 150–161. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-1-150-161.

Scientific article

EFFECT OF GADOLINIUM DOPING ON THE MAGNETIC PROPERTIES OF SINTERED Pr–Dy–Fe–Co–B MAGNETS

M.V. Potapov¹, A.V. Buzenkov¹, R.B. Morgunov^{1,2}, V.P. Piskorsky¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

²Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry RAS, Chernogolovka, Moscow region, Russia; office@icp.ac.ru

Abstract. The dependence of the magnetic properties of sintered materials of the composition $(Pr_{1-z-x}Dy_xGd_z)_{12,55-12,81}(Fe_{0,80}Co_{0,20})_{\text{bal}}B_{5,71-6,25}$ ($x = 0,34-0,58$; $z = 0,11-0,33$) on the gadolinium concentration and sintering temperature of 1120–1140 °C was studied. The temperature coefficient of induction was measured in the temperature range of 20–100 °C. Demagnetization curves (magnetization and induction) were measured using a vibrating sample magnetometer (VSM) at temperature of 20±5 °C. The temperature dependences of the magnetization in the temperature range of 300–600 K were revealed. about the article states the effect of gadolinium on the magnetic characteristics of sintered materials.

Keywords: dynamically adjustable gyroscope, rare earth metals, residual induction, coercive force by magnetization and induction, temperature dependence of magnetization, squareness of the demagnetization curve

For citation: Potapov M.V., Buzenkov A.V., Morgunov R.B., Piskorsky V.P. Effect of gadolinium doping on the magnetic properties of sintered Pr–Dy–Fe–Co–B magnets. *Trudy VIAM*, 2026, no. 1 (155), pp. 150–161. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-1-150-161.

Введение

Гироскопы имеют решающее значение для современных систем навигации, предоставляя высокоточную информацию об ориентации и угловых скоростях объектов. Эти устройства, основанные на принципах физики и механики, позволяют не только стабилизировать различные платформы, но и определить их положение относительно заданных координат.

Одним из примеров таких устройств является динамически настраиваемый гироскоп (ДНГ). Он представляет собой механический прибор с электромагнитными машинами и датчиками зазора, предназначенный для измерения угловых скоростей, а точнее, абсолютного отклонения объекта от некоторой заданной траектории [1]. Конструктивно его можно отнести к классу гироскопов с внутренним упругим вращающимся кардановым подвесом или торсионом [2]. В течение короткого периода, начиная с момента вращения в инерциальном пространстве, принцип его работы остается схожим с механизмом действия свободного гироскопа. При этом сигналы, получаемые от датчиков угла, пропорциональны малым углам поворота основания, на котором данный прибор размещен. В таком режиме ДНГ может применяться в качестве чувствительного элемента индикаторного гиросtabilизатора или в бесплатформенной инерциальной навигационной системе [3]. К достоинствам ДНГ относятся малые габаритные размеры и масса, относительно невысокая стоимость, надежность и стабильность показаний, хорошая точность [2].

Компактность, достигнутая за счет оригинального упругого подвеса, позволяет создавать малогабаритные гироскопические измерители вектора угловой скорости, соизмеримые с диаметром гироскопического маховика, и использовать их в некоторых системах космических аппаратов, например в спутниковых системах навигации, в отличие от традиционных поплавковых гироскопов [4]. Например, в работе [5] рассматривается гироскоп марки ДНГ-091, обладающий массой 125 г и габаритными размерами $\varnothing 32 \times 37$ мм. Помимо ограничения размеров, к приборам данного класса, используемым для выполнения задач искусственных спутников Земли с телескопическим оборудованием на борту, неизменно предъявляют особые требования к точности позиционирования. За долгое время существования конструктивная часть ДНГ максимально усовершенствована, достигла предельной эффективности и точности работы.

Как в ДНГ, так и в акселерометрах основным элементом является магнит. Такие магнитные материалы должны иметь максимальное значение и стабильность остаточной индукции (B_r) в течение длительного времени в наиболее широком диапазоне температур, а также позволять изготавливать кольцевые магниты с радиальной текстурой (КМРТ) по технологии, освоённой в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. Идеальной формой магнита для ДНГ является КМРТ, который расположен на роторе гироскопа. Как указано в работе [6], изготовление КМРТ возможно исключительно из материалов, содержащих редкоземельные металлы (РЗМ). При этом использование традиционных материалов системы Sm–Co в данном технологическом процессе недопустимо, поскольку такие изделия подвержены разрушению при спекании [7–11].

Следует также отметить, что материал для КМРТ должен обладать максимально возможным значением величины коэрцитивной силы по намагниченности (H_{cl}) [12]. Для этого материал легируют «тяжелыми» РЗМ (диспрозий, гадолиний, тербий и др.) [13]. Поскольку в магнитах на основе системы РЗМ–Fe–Co–B магнитные моменты

«тяжелых» РЗМ ориентированы противоположно магнитным моментам «легких» РЗМ, а также моментам железа и кобальта [14], рационально выбрать элементы с малой величиной магнитного момента.

Должное внимание также необходимо уделять требованиям к температурной стабильности магнитов, которую принято характеризовать величиной температурного коэффициента индукции (ТКИ). Чаще всего это целесообразно только для материалов с очень высокой температурой Кюри, таких как магниты ЮНДК и системы Fe–Cr–Co [15].

В случае редкоземельных магнитов наиболее рациональными являются изменение температурной зависимости намагниченности и выбор материала с учетом полученных результатов. В представленной работе использован именно этот подход, а в качестве «тяжелых» РЗМ, помимо хорошо исследованных празеодима и диспрозия, выбран гадолиний. Магнитный момент диспрозия и гадолиния составляет $10\mu_B$ и $7\mu_B$ соответственно, где μ_B – магнетон Бора [14]. Интерметаллидное соединение $(Pr, Dy)_2(Fe, Co)_{14}B$ является основной магнитной фазой (фаза А) магнитотвердых материалов системы $(Pr, Dy)-(Fe_{1-y}Co_y)-B$ с высоким значением остаточной индукции B_r [16]. Когда $y > 0,2$, данные магнитотвердые материалы относятся к фазовой диаграмме системы R–Co–B, что принципиально отличает их от материалов системы Nd–Fe–B как по фазовому составу, так и по магнитным свойствам [14, 16–18].

Следует отметить, что при замене диспрозия гадолинием в основной магнитной фазе $(Pr, Dy)_2(Fe, Co)_{14}B$ и увеличении его содержания происходит уменьшение намагниченности насыщения, поскольку орбитальный момент данного элемента равен нулю и возможно последующее изменение суммарного орбитального момента редкоземельной подрешетки.

Цель данной работы – исследование изменения магнитных свойств материала системы Pr–Dy–Fe–Co–B при легировании гадолинием.

Материалы и методы

Для изготовления слитка использованы следующие шихтовые материалы: празеодим ПрМ-1, диспрозий ДиМ-1, гадолиний ГдМ-1, железо АРМКО первого типа, кобальт К0. Бор вводили в плавку в виде лигатуры состава $Fe_{88,7}B_{11,3}$ (здесь и далее – % (по массе)). Сплавы выплавляли в вакуумной индукционной печи в атмосфере аргона.

Технологический процесс выплавки включает следующие основные этапы. В тигель загружается железо с кобальтом, после чего воздух из печи откачивается до давления $\sim 10^{-3}$ мм рт. ст. После полного расплавления железа и кобальта проводится выдержка расплава при температуре ~ 1500 °С, далее в камеру подается аргон. Расплав охлаждается до образования на поверхности «корочки», далее через дозатор или камеру загрузки шихты вводится диспрозий и гадолиний. После их полного расплавления расплав выдерживается до частичного затвердевания поверхности, затем через дозатор или камеру загрузки шихты вводится празеодим. После полного расплавления празеодима расплав выдерживается при более низкой температуре, после аналогичного цикла при повторном понижении температуры вводится ферробор. В конце проводятся контрольный замер температуры металла и заливка в чугунную изложницу. Слиток остывает в атмосфере аргона.

Для плавки использовали тигель, покрытый рабочим слоем из керамики на основе ZrO_2 , стабилизированный Y_2O_3 . Образцы изготавливали по порошковой технологии. Первую стадию дробления проводили на щековой дробилке ДЛЩ 80-150 в атмосфере аргона для получения частиц размером 5–10 мм. На второй стадии, осуществляемой в конусной инерционной дробилке КИД-100 (в аргоне), получали частицы размером менее 630 мкм. Атмосфера аргона предохраняла порошок от окисления.

Для выделения частиц размером менее 630 мкм использовали лабораторные сита из металлической проволочной сетки (ГОСТ Р 51568–99). Более тонкий помол проводили в планетарно-центробежной мельнице в среде фреона.

Призматические образцы магнитов изготавливали путем прессования в магнитном поле напряженностью 800 кА/м, ориентированном перпендикулярно направлению приложения нагрузки. Спекание проводили в печи типа «ВЕГА» при температуре ~1150 °С в вакууме.

Плотность образцов определяли методом гидростатического взвешивания [19]. Магнитные свойства образцов исследовали на вибрационном магнитометре в полях напряженностью до 1600 кА/м. Температурные зависимости намагниченности измеряли на этом же магнитометре в области температур 300–600 К. Размагничивающий фактор для сферического образца исследовали с использованием математических формул, приведенных в работах [20–22].

Важна сферическая форма образцов, поскольку величина размагничивающего поля внутри сферы одинакова по величине и направлению во всех точках, а намагниченность распределена однородно по образцу. Размагничивающий фактор сферы при этом равен 1/3 в системе СИ [20].

Коэффициент прямоугольности кривой размагничивания определяли по методике, приведенной в работах [23, 24], по формуле

$$SF = \frac{H_k}{H_{cl}},$$

где H_k – поле, соответствующее величине намагниченности, равной 90 % от остаточной индукции; H_{cl} – коэрцитивная сила по намагниченности. Величину H_k принято называть полем «колена».

Задача магнита – создание магнитного поля либо в системе определенной конструкции, либо при полном ее отсутствии. Если величина прямоугольности относительно низкая, то и поле будет более слабым [25, 26]. В качестве примера можно привести магнитные материалы систем Fe–Cr–Co и Al–Ni–Co (в России магниты марки ЮНДК), которые имеют крайне низкую величину коэрцитивной силы, поэтому рассматривать прямоугольность кривой размагничивания нецелесообразно [27, 28].

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

Температурные зависимости намагниченности образцов, спеченных при 1120 °С, представлены на рис. 1, кривые размагничивания по намагниченности и по индукции спеченных материалов данных составов – на рис. 2.

Результаты измерений, показанные на рис. 2, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Свойства образцов, спеченных при температуре 1120 °С

Состав материала в атомных долях	H_{cl} , кА/м	H_{cb} , кА/м	$4\pi I_s$, мТл	B_r , мТл	H_k , кА/м	SF
(Pr _{0,31} Dy _{0,58} Gd _{0,10}) _{12,81} (Fe _{0,80} Co _{0,20}) _{80,94} B _{6,25}	775	425	600	550	150	0,19
(Pr _{0,33} Dy _{0,44} Gd _{0,22}) _{12,69} (Fe _{0,80} Co _{0,20}) _{81,33} B _{5,98}	700	360	525	470	100	0,14
(Pr _{0,33} Dy _{0,34} Gd _{0,33}) _{12,55} (Fe _{0,80} Co _{0,20}) _{81,74} B _{5,71}	700	370	510	470	150	0,21

Примечание. H_{cl} – коэрцитивная сила по намагниченности, H_{cb} – коэрцитивная сила по индукции, $4\pi I_s$ – намагниченность насыщения, B_r – остаточная индукция, H_k – магнитное поле «колена», SF – коэффициент прямоугольности кривой размагничивания.

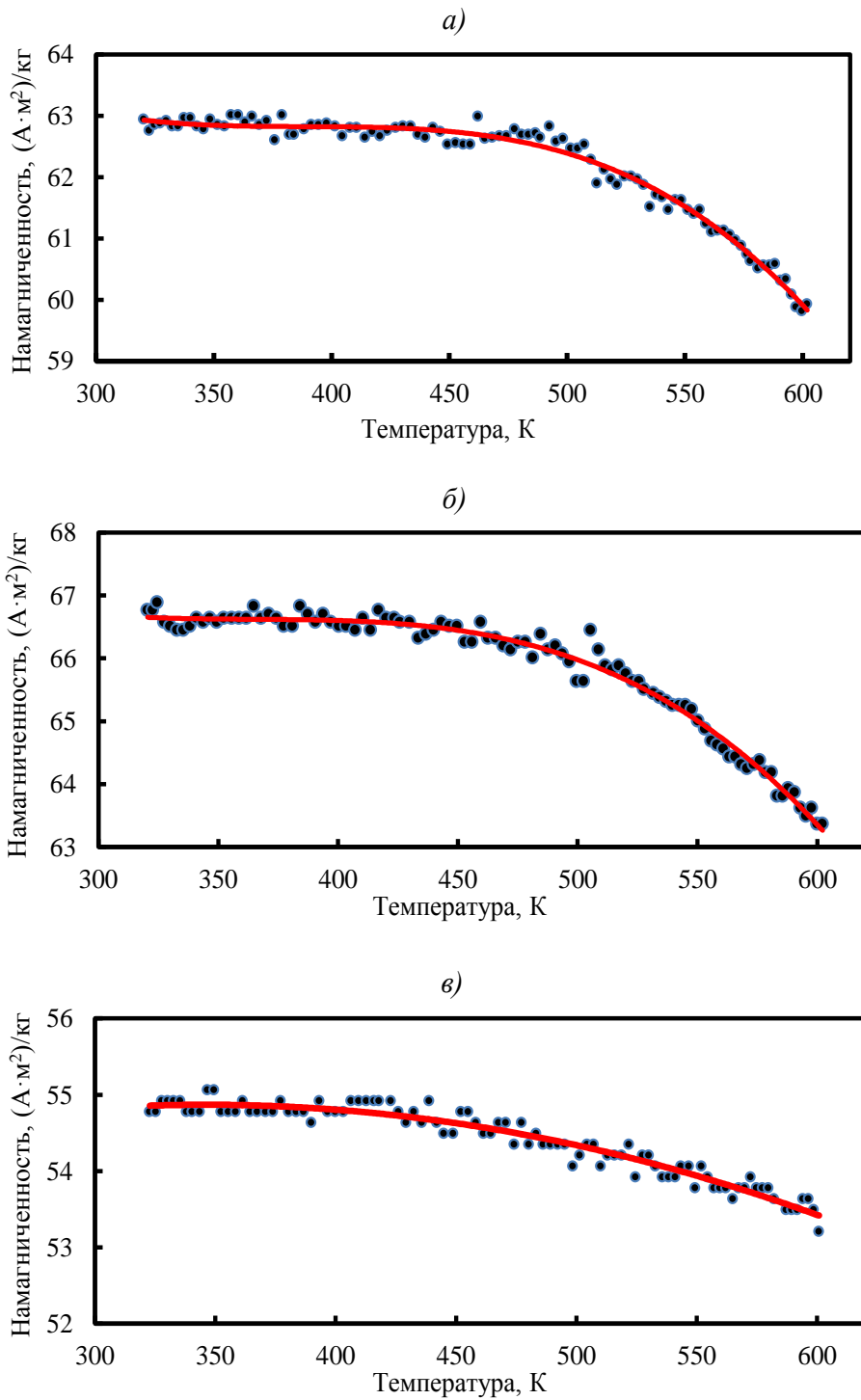


Рис. 1. Температурные зависимости намагниченности спеченных при 1120 °С образцов составов $(Pr_{0,31}Dy_{0,58}Gd_{0,10})_{12,81}(Fe_{0,80}Co_{0,20})_{80,94}B_{6,25}$ (а), $(Pr_{0,33}Dy_{0,44}Gd_{0,22})_{12,69}(Fe_{0,80}Co_{0,20})_{81,33}B_{5,98}$ (б) и $(Pr_{0,33}Dy_{0,34}Gd_{0,33})_{12,55}(Fe_{0,80}Co_{0,20})_{81,74}B_{5,71}$ (в)

Как видно из рис. 1, температурная зависимость намагниченности в области температур до 600 К монотонно уменьшается и не имеет максимумов. Кривые размагничивания в свою очередь имеют небольшой коэффициент прямоугольности кривой размагничивания, не превышающий величину 0,21.

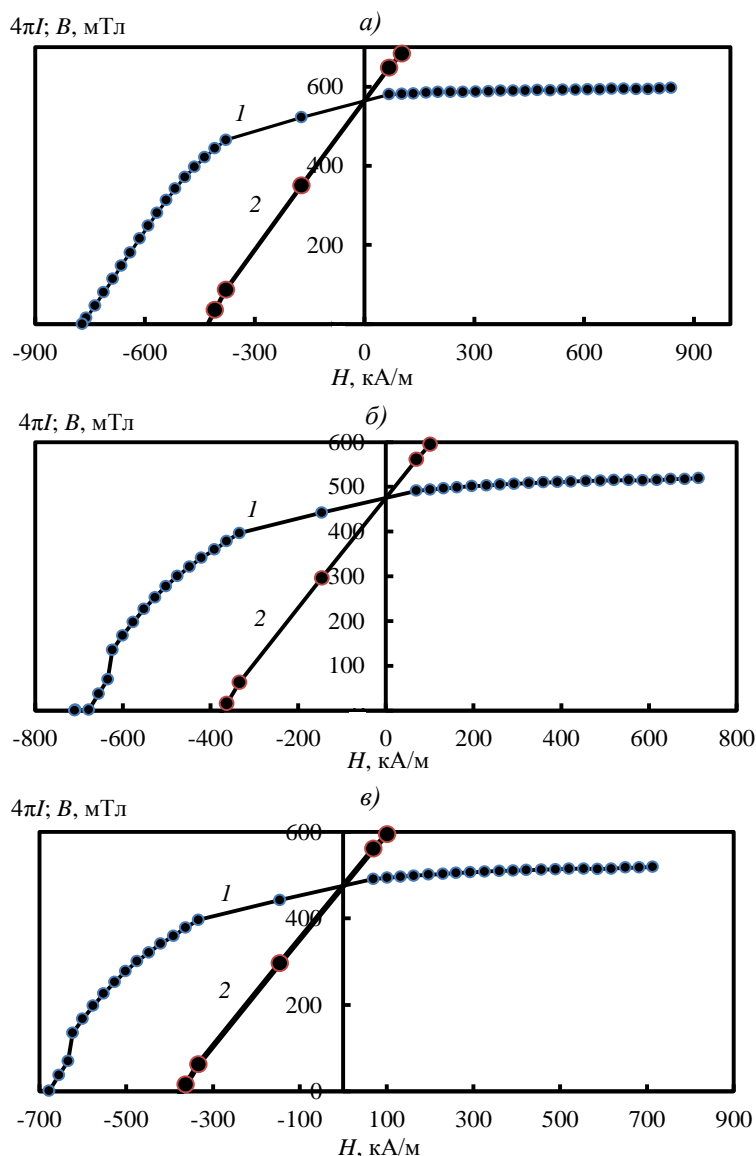


Рис. 2. Кривые размагничивания по намагниченности $4\pi I$ (1) и по индукции B (2) спеченных материалов составов $(Pr_{0,31}Dy_{0,58}Gd_{0,10})_{12,81}(Fe_{0,80}Co_{0,20})_{80,94}B_{6,25}$ (а), $(Pr_{0,33}Dy_{0,44}Gd_{0,22})_{12,69}(Fe_{0,80}Co_{0,20})_{81,33}B_{5,98}$ (б) и $(Pr_{0,33}Dy_{0,34}Gd_{0,33})_{12,55}(Fe_{0,80}Co_{0,20})_{81,74}B_{5,71}$ (в)

Состав и количество фаз в материалах, спеченных при температуре 1120 °С, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Фазовый состав спеченных материалов системы (Pr, Dy, Gd)–(Fe, Co)–B

Состав материала в атомных долях	Фаза	Размер зерна, мкм	Количество фазы, % (объемн.)	Состав фазы в атомных долях
$(Pr_{0,31}Dy_{0,58}Gd_{0,10})_{12,81}(Fe_{0,80}Co_{0,20})_{80,94}B_{6,25}$	A	–	92	$(Pr_{0,27}Dy_{0,62}Gd_{0,11})_2(Fe_{0,81}Co_{0,19})_{14}B$
	RF_2	6	7	$(Pr_{0,52}Dy_{0,41}Gd_{0,08})(Fe_{0,53}Co_{0,47})_2$
	$R_5F_2B_6$	5	1	$(Pr_{0,30}Dy_{0,61}Gd_{0,09})_5(Fe_{0,68}Co_{0,36})_2B_6$
$(Pr_{0,33}Dy_{0,44}Gd_{0,22})_{12,69}(Fe_{0,80}Co_{0,20})_{81,33}B_{5,98}$	A	–	92	$(Pr_{0,32}Dy_{0,49}Gd_{0,19})_2(Fe_{0,79}Co_{0,21})_{14}B$
	RF_3	4	4	$(Pr_{0,32}Dy_{0,48}Gd_{0,20})(Fe_{0,63}Co_{0,37})_3$
	RF_2	3	–	$(Pr_{0,61}Dy_{0,24}Gd_{0,15})(Fe_{0,51}Co_{0,49})_2$
$(Pr_{0,33}Dy_{0,34}Gd_{0,33})_{12,55}(Fe_{0,80}Co_{0,20})_{81,74}B_{5,71}$	A	–	94	$(Pr_{0,29}Dy_{0,40}Gd_{0,31})_2(Fe_{0,79}Co_{0,21})_{14}B$
	RF_2	3	5	$(Pr_{0,60}Dy_{0,20}Gd_{0,20})(Fe_{0,49}Co_{0,51})_2$

Объемное содержание основной магнитной фазы в магнитах (фаза А или $(Pr, Dy, Gd)_2(Fe, Co)_{14}B$), по данным табл. 2, повышается с увеличением содержания гадолиния с 92 до 94 %. Содержание остальных фаз незначительно и не превышает 7 % (объемн.).

По данным рис. 2 можно сделать вывод, что величина остаточной индукции значительно уменьшается с увеличением содержания гадолиния. Незначительно уменьшается и величина коэрцитивной силы по намагниченности. Такое влияние гадолиния на величину коэрцитивной силы ранее отмечено в работах [18, 29, 30]. Величина ТКИ, измеренного в диапазоне температур 20–100 °С, находится в пределах от –0,015 до –0,0007 %/К (табл. 3).

Таблица 3

Составы и величина температурного коэффициента индукции (ТКИ) образцов	
Состав материала в атомных долях	ТКИ, %/К, в диапазоне температур 20–100 °С
$(Pr_{0,31}Dy_{0,58}Gd_{0,10})_{12,81}(Fe_{0,80}Co_{0,20})_{80,44}B_{6,25}$	–0,0007
$(Pr_{0,33}Dy_{0,44}Gd_{0,22})_{12,69}(Fe_{0,80}Co_{0,20})_{81,33}B_{5,98}$	–0,01
$(Pr_{0,33}Dy_{0,34}Gd_{0,33})_{12,55}(Fe_{0,80}Co_{0,20})_{81,74}B_{5,71}$	–0,015

При повышении температуры спекания до 1140 °С наблюдали изменение намагниченности (рис. 3).

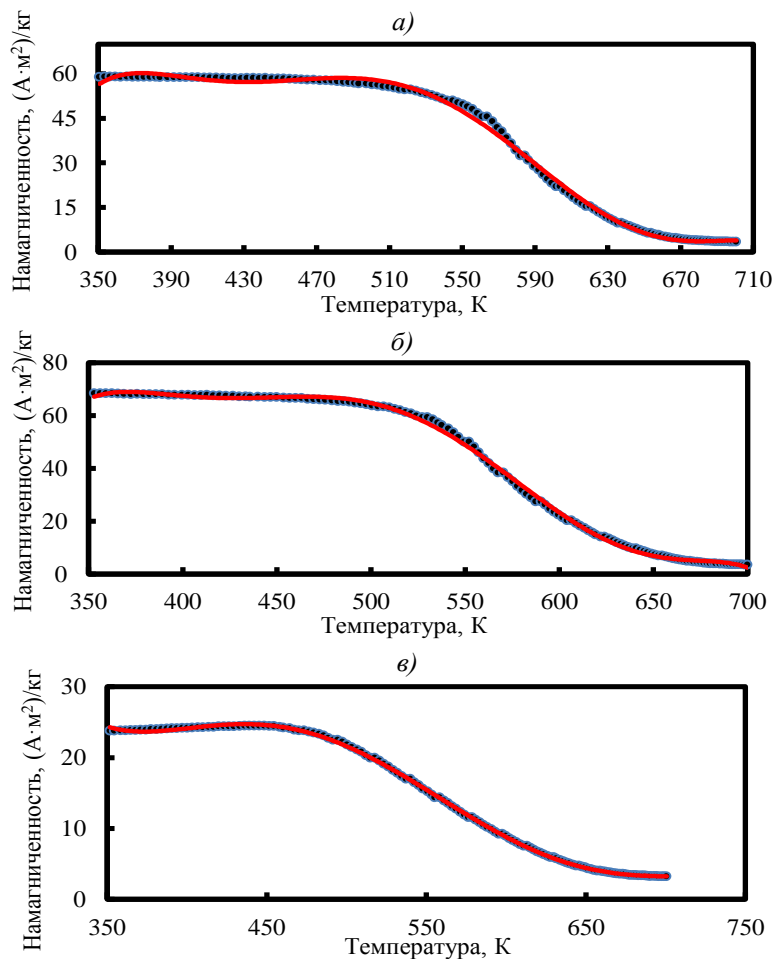


Рис. 3. Температурные зависимости намагниченности спеченных при 1140 °С образцов составов $(Pr_{0,31}Dy_{0,58}Gd_{0,10})_{12,81}(Fe_{0,80}Co_{0,20})_{80,44}B_{6,25}$ (а), $(Pr_{0,33}Dy_{0,44}Gd_{0,22})_{12,69}(Fe_{0,80}Co_{0,20})_{81,33}B_{5,98}$ (б) и $(Pr_{0,33}Dy_{0,34}Gd_{0,33})_{12,55}(Fe_{0,80}Co_{0,20})_{81,74}B_{5,71}$ (в)

Исходя из данных, измеренных на вибрационном магнитометре и приведенных на рис. 3, можно утверждать, что коэффициент прямоугольности кривой размагничивания остается на одном уровне, хотя и наблюдается незначительный перегиб в диапазоне температур 450–550 К. Следует отметить, что величина ТКИ в области температур до 460 К существенно меняется при легировании гадолинием. По изменению наклона кривой можно сделать вывод, что меняется не только значение ТКИ, но и его знак. В дальнейших исследованиях следует расширить область температур измерения, поскольку современные ДНГ работают в температурном диапазоне от –50 до +80 °С [31, 32], а также увеличить содержание кобальта, поскольку он повышает температурную стойкость магнитов [33, 34].

Заключения

Установлено, что изменение температуры спекания в области температур 1120–1140 °С не оказывает существенного влияния на магнитные характеристики магнитотвердых материалов системы (Pr, Dy, Gd)–(Fe, Co)–В. Для применения исследованных магнитов в навигационных приборах самолетов следует увеличить содержание кобальта, что приведет к повышению стойкости к изменениям температуры окружающей среды, основных магнитных характеристик как магнитов, так и включающих их приборов, а также расширит диапазон возможных температур эксплуатации таких приборов.

Благодаря малой величине магнитного момента гадолиний является перспективным металлом для легирования спеченных магнитов для навигационных приборов.

Таким образом, исследованные материалы системы (Pr, Dy, Gd)–(Fe, Co)–В, легированные гадолинием, обладают удовлетворительными свойствами по температурной стабильности. В дальнейшем необходимо исследовать величину ТКИ в температурном диапазоне от –50 до +80 °С для применения таких материалов в навигационных приборах, а также более подробно изучить зависимость величины магнитных характеристик от изменения температуры спекания.

Список источников

1. Мезенцев Г.М. Анализ двухмассовой модели линейного движения динамически настраиваемого гироскопа. Миасс: Изд-во Южно-Уральск. гос. ун-та, 2019. 94 с.
2. Мартыненко Ю.Г. Тенденции развития современной гироскопии // Соросовский образовательный журнал. 1997. № 11. С. 120–127.
3. Василевский Н.И. Разработка динамически настраиваемого гироскопа с учетом его вибрационных характеристик. Миасс: Изд-во Южно-Уральск. гос. ун-та, 2018. 77 с.
4. Чиркин Д.С., Рословец П.В., Татарин Ф.В. и др. Уменьшение дрейфа динамически настраиваемого гироскопа от запуска к запуску // Инженерный журнал: наука и инновации. 2017. № 1. С. 1–14. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-01-1579.
5. Топильская С.В., Бородулин Д.С., Корнюхин А.В. Экспериментальная оценка допустимых механических воздействий на динамически настраиваемый гироскоп // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Приборостроение. 2018. № 4. С. 69–79.
6. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий // Авиационные материалы и технологии. 2013. № S2. С. 3–10.
7. Sun T., Zhu J., Wan D. The anisotropic expansion and fracture of radially oriented toroid specimens of the rare-earth-cobalt permanent magnets // Fourth International Workshop on Rare Earth-Cobalt Permanent Magnets and Their Applications. Hakone, 1979. Paper No. 12-5. P. 419–435.
8. Tian J., Qu X., Zhang S. et al. Magnetic properties and microstructure of radially oriented Sm(Co, Fe, Cu, Zr)_z ring magnets // Materials Letters. 2007. Vol. 61. P. 5271–5274.

9. Tian J., Qu X., Zhang S. et al. Influence of heat treatment on fracture and magnetic properties of radially oriented $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ permanent magnets // *Transaction of Nonferrous Metals Society of China*. 2007. Vol. 17. P. 491–495.
10. Li A., Li W., Wang H. et al. The study on thermal expansion of sintered $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ magnets // *IEEE Transaction on Magnetics*. 2009. Vol. 45. No. 10. P. 4402–4404.
11. Tian J., Pan D., Zhou H. et al. Radial cracks and fracture mechanism of radially oriented ring 2:17 type SmCo magnets // *Journal of Alloys and Compounds*. 2009. Vol. 467. P. 98–101.
12. Моисеева Н.С., Резчикова И.И., Королев Д.В. и др. Ограничение допустимой коэрцитивной силы, вызванное полем рассеяния магнита // *Журнал технической физики*. 2019. Т. 89. № 7. С. 1055–1058.
13. Tenaud P., Lemaire H., Vial F. Recent improvements in NdFeB sintered magnets // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 1991. Vol. 101. P. 328–332.
14. Herbst J.F. $\text{R}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ materials: intrinsic properties and technological aspects // *Reviews of Modern Physics*. 1991. Vol. 63. No. 4. P. 819–898.
15. Сергеев В.В., Булыгина Т.Н. Магнитотвердые материалы. М.: Энергия, 1980. 224 с.
16. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Пискорский В.П., Резчикова И.И., Валеев Р.А., Давыдова Е.А. Фазовый состав спеченных материалов системы Pr–Dy–Fe–Co–B // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № S2. С. 5–10. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-S2-5-10.
17. Бузенков А.В., Бурканов М.В., Валеев Р.А., Пискорский В.П. Свойства спеченных магнитов Pr–Dy–Fe–Co–B в зависимости от состава и технологических параметров изготовления // *Труды ВИАМ*. 2024. № 5 (135). С. 91–100. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.02.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-5-91-100.
18. Валеев Р.А., Королев Д.В., Моргунов Р.Б., Пискорский В.П. Вклад фаз в намагниченность спеченных материалов Nd–Dy–Fe–Co–B // *Труды ВИАМ*. 2022. № 11 (117). С. 60–68. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.02.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-60-68.
19. Определение плотности тел гидростатическим взвешиванием: метод. рекомендации. Иркутск: Иркутск. гос. ун-т, 2003. С. 1–9.
20. Лаптева К.А., Толмачев И.И. Расчет размагничивающего фактора при продольном намагничивании в магнитопорошковой дефектоскопии // *Известия Томского политехнического университета*. 2012. Т. 321. № 2. С. 140–144.
21. Sato M., Ishii Y. Simple and approximate expressions of demagnetizing factors of uniformly magnetized rectangular rod and cylinder // *Journal of Applied Physics*. 1989. Vol. 66. No. 2. P. 983–985.
22. Chen D.-X., Brug J.A., Goldfarb R.B. Demagnetizing factor for cylinder // *IEEE Transactions on Magnetics*. 1991. Vol. 27. No. 4. P. 3601–3619.
23. Perigo E.A., Takiishi H., Motta C.C. et al. On the squareness factors behavior of RE–FeB (RE = Nd or Pr) magnets above room temperature // *IEEE Transaction Magnetics*. 2009. Vol. 45. No. 10. P. 4431–4434.
24. Yuing Z., Tianyu M., Mi Y. et al. Squareness factors of demagnetization curves for multi-main-phase Nd–Ce–Fe–B magnets with different Ce contents // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2019. Vol. 487. P. 165355. DOI: 10.1016/j.jmmm.2019.165355.
25. Minna H., Sampo T., Timo S.-N. et al. Magnetic behavior of sintered NdFeB magnets on a long-term timescale // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2014. Vol. 7. P. 760584. DOI: 10.1155/2014/760584.
26. Takiishi H., Lima L.F.C.P., Costa I. et al. The influence of process parameters and alloy structure on the magnetic properties of NdDyFeNb HD sintered magnets // *Journal of Materials Processing Technology*. 2004. Vol. 152. P. 1–8.
27. de Vos K.J. The relationship between microstructure and magnetic properties of alnico alloys. Eindhoven: Technische Hogeschool Eindhoven, 1966. 119 p. DOI: 10.6100/IR287613.

28. Akbar S., Ahmad Z., Awanb M.S. et al. Development of Fe–Cr–Co permanent magnets by single step thermo-magnetic treatment // *Key Engineering Materials*. 2012. Vol. 510–511. P. 507–512.
29. Betancourt J.I. Nanocrystalline hard magnetic alloys // *Revista Mexicana de Fisica*. 2002. Vol. 48 (4). P. 283–289.
30. Heritier L., Fruchart R. Crystallographic and magnetic study of solid solutions $Gd_2(Fe_{14-x}Co_x)B$, $Gd_2(Co_{14-x}Mn_x)B$, $Dy_2Fe_{14}BH_x$, $Y_2Fe_{14}BH_x$ and $Lu_2Fe_{14}BH_x$ // *Journal de Physique*. 1985. Vol. 46. P. C6-319–C6-322.
31. Королев М.Н. Исследование технических характеристик современных типов датчиков угловой скорости // *Материалы 12-й Междунар. науч.-техн. конф. «Приборостроение–2019»*. Минск: БНТУ, 2019. С. 21–23.
32. Блажнов Б.А., Несенюк Л.П., Пешехонов В.Г., Старосельцев Л.П. Миниатюрные интегрированные системы ориентации и навигации // *Электроника: Наука, Технология, Бизнес*. 2001. Т. 5. С. 56–59.
33. Валеев Р.А., Королев Д.В., Моргунов Р.Б., Пискорский В.П. Влияние высоких концентраций кобальта на свойства магнитов Pr–Dy–Fe–Co–B и Nd–Dy–Fe–Co–B // *Труды ВИАМ*. 2022. № 10 (116). Ст. 66–75. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.02.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-66-75.
34. Валеев Р.А., Пискорский В.П., Королев Д.В., Моргунов Р.Б. Оптимизация содержания кобальта как способ температурной стабилизации редкоземельных магнитов // *Труды ВИАМ*. 2023. № 3 (121). Ст. 58–66. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.02.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-3-58-66.

References

1. Mezentsev G.M. *Analysis of a Two-Mass Model of Linear Motion of a Dynamically Tuned Gyroscope*. Miass: Publ. House of the South Ural State University, 2019, 94 p.
2. Martynenko Yu.G. Trends in the Development of Modern Gyroscopy. *Sorosovskiy obrazovatelnyy zhurnal*, 1997, no. 11, pp. 120–127.
3. Vasilevsky N.I. *Development of a Dynamically Tuned Gyroscope Taking into Account its Vibration Characteristics*. Miass: Publ. House of the South Ural State University, 2018, 77 p.
4. Chirkin D.S., Roslovets P.V., Tatarinov F.V. et al. Reducing the Drift of a Dynamically Tuned Gyroscope from Launch to Launch. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii*, 2017, no. 1, pp. 1–14. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-01-1579.
5. Topilskaya S.V., Borodulin D.S., Kornukhin A.V. Experimental assessment of permissible mechanical effects on a dynamically tuned gyroscope. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser.: Priborostroyeniye*, 2018, no. 4, pp. 69–79.
6. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Vershkov A.V. Rare metals and rare-earth elements are materials for modern and future high technologies. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2013, no. S2, pp. 3–10.
7. Sun T., Zhu J., Wan D. The anisotropic expansion and fracture of radially oriented toroid specimens of the rare-earth-cobalt permanent magnets. *Fourth International Workshop on Rare Earth-Cobalt Permanent Magnets and Their Applications*. Hakone, 1979, paper no. 12-5, pp. 419–435.
8. Tian J., Qu H., Zhang S. et al. Magnetic properties and microstructure of radially oriented $Sm(Co, Fe, Cu, Zr)_Z$ ring magnets. *Materials Letters*, 2007, vol. 61, pp. 5271–5274.
9. Tian J., Qu H., Zhang S. et al. Influence of heat treatment on fracture and magnetic properties of radially oriented Sm_2Co_{17} permanent magnets. *Transaction of Nonferrous Metals Society of China*, 2007, vol. 17, pp. 491–495.
10. Li A., Li W., Wang H. et al. The study on thermal expansion of sintered Sm_2Co_{17} magnets. *IEEE Transaction on Magnetics*, 2009, vol. 45, no. 10, pp. 4402–4404.
11. Tian J., Pan D., Zhou H. et al. Radial cracks and fracture mechanism of radially oriented ring 2:17 type SmCo magnets. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, vol. 467, pp. 98–101.

12. Moiseeva N.S., Rezhikova I.I., Korolev D.V. et al. Limitation of the permissible coercive force caused by the stray field of a magnet. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 2019, vol. 89, no. 7, pp. 1055–1058.
13. Tenaud P., Lemaire H., Vial F. Recent improvements in NdFeB sintered magnets. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1991, vol. 101, pp. 328–332.
14. Herbst J.F. R₂Fe₁₄B materials: intrinsic properties and technological aspects. *Reviews of Modern Physics*, 1991, vol. 63, no. 4, pp. 819–898.
15. Sergeev V.V., Bulygina T.N. *Magnetically hard materials*. Moscow: Energiya, 1980, 224 p.
16. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Piskorskij V.P., Rezhikova I.I., Valeev R.A., Davydova E.A. Phase composition of the Pr–Dy–Fe–Co–B sintered materials. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. S2 (39), pp. 5–10. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-S2-5-10.
17. Buzenkov A.V., Burkanov M.V., Valeev R.A., Piskorsky V.P. Properties of sintered magnets Pr–Dy–Fe–Co–B depending on the composition and technological parameters of manufacture. *Trudy VIAM*, 2024, no. 5 (135), pp. 91–100. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 20, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-5-91-100.
18. Valeev R.A., Korolev D.V., Morgunov R.B., Piskorsky V.P. The contribution of phases to the magnetization of sintered materials Nd–Dy–Fe–Co–B. *Trudy VIAM*, 2022, no. 11 (117), pp. 60–68. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 20, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-60-68.
19. *Determination of the density of bodies by hydrostatic weighing: method. recommendations*. Irkutsk: Irkutsk State Univ., 2003, pp. 1–9.
20. Lapteva K.A., Tolmachev I.I. Calculation of the demagnetizing factor during longitudinal magnetization in magnetic particle testing. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2012, vol. 321, no. 2, pp. 140–144.
21. Sato M., Ishii Y. Simple and approximate expressions of demagnetizing factors of uniformly magnetized rectangular rod and cylinder. *Journal of Applied Physics*, 1989, vol. 66, no. 2, pp. 983–985.
22. Chen D.-X., Brug J.A., Goldfarb R.B. Demagnetizing factor for cylinder. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1991, vol. 27, no. 4, pp. 3601–3619.
23. Perigo E.A., Takiishi H., Motta C.C. et al. On the squareness factors behavior of RE–FeB (RE = Nd or Pr) magnets above room temperature. *IEEE Transaction Magnetics*, 2009, vol. 45, no. 10, pp. 4431–4434.
24. Yuing Z., Tianyu M., Mi Y. et al. Squareness factors of demagnetization curves for multi-main-phase Nd–Ce–Fe–B magnets with different Ce contents. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2019, vol. 487, p. 165355. DOI: 10.1016/j.jmmm.2019.165355.
25. Minna H., Sampo T., Timo S.-N. et al. Magnetic behavior of sintered NdFeB magnets on a long-term timescale. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014, vol. 7, p. 760584. DOI: 10.1155/2014/760584.
26. Takiishi H., Lima L.F.C.P., Costa I. et al. The influence of process parameters and alloy structure on the magnetic properties of NdDyFeNb HD sintered magnets. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, vol. 152, pp. 1–8.
27. de Vos K.J. *The relationship between microstructure and magnetic properties of alnico alloys*. Eindhoven: Technische Hogeschool Eindhoven, 1966, 119 p. DOI: 10.6100/IR287613.
28. Akbar S., Ahmad Z., Awanb M.S. et al. Development of Fe–Cr–Co permanent magnets by single step thermo-magnetic treatment. *Key Engineering Materials*, 2012, vol. 510–511, pp. 507–512.
29. Betancourt J.I. Nanocrystalline hard magnetic alloys. *Revista Mexicana de Fisica*, 2002, vol. 48 (4), pp. 283–289.
30. Heritier L., Fruchart R. Crystallographic and magnetic study of solid solutions Gd₂(Fe_{14-x}Co_x)B, Gd₂(Co_{14-x}Mn_x)B, Dy₂Fe₁₄BH_x, Y₂Fe₁₄BH_x and Lu₂Fe₁₄BH_x. *Journal de Physique*, 1985, vol. 46, pp. C6-319–C6-322.
31. Korolev M.N. Study of technical characteristics of modern types of angular rate sensors. *Proceedings of the 12th Int. sc. and tech. conf. «Instrument Engineering–2019»*. Minsk: BNTU, 2019, pp. 21–23.

32. Blazhnov B.A., Nesenyuk L.P., Peshekhonov V.G., Staroseltsev L.P. Miniature integrated orientation and navigation systems. *Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes*, 2001, vol. 5, pp. 56–59.
33. Valeev R.A., Korolev D.V., Morgunov R.B., Piskorsky V.P. The effect of high concentrations of cobalt on the properties of magnets Pr–Dy–Fe–Co–B and Nd–Dy–Fe–Co–B. *Trudy VIAM*, 2022, no. 10 (116), pp. 66–75. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 20, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-66-75.
34. Valeev R.A., Piskorsky V.P., Korolev D.V., Morgunov R.B. Optimization of the cobalt content as a way of temperature stabilization of rare earth magnets. *Trudy VIAM*, 2023, no. 3 (121), pp. 58–66. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 20, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-3-58-66.

Информация об авторах

Потапов Максим Викторович, техник 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Бузенков Александр Владимирович, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Моргунов Роман Борисович, ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н., профессор, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru; главный научный сотрудник, ФИЦ ПХФ и МХ РАН, office@icp.ac.ru

Пискорский Вадим Петрович, главный научный сотрудник, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Maksim V. Potapov, First Category Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Aleksander V. Buzenkov, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Roman B. Morgunov, Leading Researcher, Doctor of Sciences (Phys. & Math.), Professor, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru; Chief Researcher, FRC PCP MC RAS, office@icp.ac.ru

Vadim P. Piskorsky, Chief Researcher, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 24.04.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 13.05.2025.
The article was submitted 24.04.2025; approved and accepted for publication after reviewing 13.05.2025.