

УДК 631.3-6

<https://doi.org/10.56619/2078-7138-2024-165-5-30-35>

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОСАЖДЕНИЯ ПРОДУКТОВ ИЗНОСА В МОТОРНОМ МАСЛЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПОЛЕЙ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ РАЗЛИЧНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

В.К. Корнеева,*доцент каф. технологии металлов БГАТУ, канд. техн. наук, доцент***В.М. Капцевич,***зав. каф. технологии металлов БГАТУ, докт. техн. наук, профессор***И.В. Закревский,***ст. преподаватель каф. технологии металлов БГАТУ***В.В. Остриков,***магистрант факультета технического сервиса в АПК БГАТУ*

Проведено экспериментальное моделирование процесса осаждения продуктов износа в моторном масле под действием полей постоянных магнитов различной конфигурации. Установлено, что предложенная магнитная система позволяет локализовать частицы непосредственно в области, примыкающей к магнитам, и может быть рекомендована для разработки и изготовления диагностических инструментов контроля продуктов износа ДВС.

Ключевые слова: моделирование, продукты износа, ферромагнитные частицы, моторное масло, постоянные магниты, магнитная система.

Experimental modeling of the deposition process of wear products in the engine oil under the influence of permanent magnet fields of different configuration has been carried out. It is proved that the proposed magnetic system allows to localize the particles directly in the area adjacent to the magnets and can be recommended for the development and manufacture of diagnostic tools for controlling the wear products of internal combustion engines.

Keywords: modeling, wear products, ferromagnetic particles, engine oil, permanent magnets, magnetic system.

Введение

В процессе работы ДВС металлические частицы (продукты износа) различного химического состава, генерируемые в трибосопряжениях деталей различных систем, с маслом попадают в картер. Причем из всех продуктов износа доля ферромагнитных частиц может составлять до 90 % [1]. Анализируя размеры и количество этих частиц, определяют интенсивность изнашивания рабочих поверхностей деталей [2], а оценивая форму частиц, можно судить о характере и механизмах износа [3, 4], что в конечном итоге позволяет спрогнозировать возможность возникновения катастрофического износа деталей ДВС и принять меры для его предотвращения.

В настоящее время для анализа продуктов износа в смазочных материалах широко используются методы, основанные на осаждении ферромагнитных частиц из проб рабочих жидкостей под действием магнитного поля. Это феррография прямого считывания [5], аналитическая феррография [6, 7], а также методы, основанные на анализе частиц износа с помощью устройств, встроенных в систему смазки (магнитные

фильтры, магнитные пробки и магнитные шупы) [1; 8, 9]. Данные методы контроля позволяют при помощи постоянных магнитов локализовать сбор ферромагнитных частиц и провести последующий анализ размеров, формы и количества продуктов износа, содержащихся в масле картера двигателя. Однако в Российской Федерации и Республике Беларусь магнитные методы контроля для анализа свойств моторного масла сельскохозяйственной техники не нашли применение.

В работах [10-13] рассмотрены теоретические задачи процессов осаждения ферромагнитных частиц в поле действия сил постоянных магнитов, но экспериментальные данные о таких процессах, а также моделирование осаждения продуктов износа в моторном масле в литературе отсутствуют.

Целью данной работы является экспериментальное моделирование процесса осаждения продуктов износа в моторном масле в поле действия постоянных магнитов различной конфигурации и обоснование выбора магнитной системы, обеспечивающей их эффективное осаждение.

Основная часть

Для проведения экспериментальных исследований осаждения частиц в магнитном поле использовали кювету, моделирующую элемент объема рабочего пространства картера ДВС, прозрачную рабочую жидкость, имитирующую моторное масло, ферромагнитные частицы, характеризующие продукты износа, и постоянные магниты различной конфигурации.

Элемент объема рабочего пространства картера ДВС моделировали при помощи кюветы стандарта КФК (50×40×24 мм, толщина стенки – 3 мм) из кварцевого стекла с диапазоном длин волн 325–1100 нм.

В качестве прозрачной рабочей жидкости, имитирующей моторное масло, использовали раствор глицерина ($C_3H_5(OH)_3$) чистотой 99,7 % (Чехия) в количестве 38 %, с изопропиловым спиртом (C_3H_7OH) (ТУ 2632-037-78119972-2014) в количестве 62 %. Выбранный раствор, во-первых, обладает прозрачностью, а во-вторых, его вязкость близка к вязкости моторного масла М10Г₂ при температуре 100 °С (10,5–11,5 мм²/с).

В качестве ферромагнитных частиц, моделирующих продукты износа трибосопряжений ДВС, использовали распыленный железный порошок марки ПЖР 2.200 (ГОСТ 9849-86) с размером частиц менее 63 мкм (рис. 1).

Для создания магнитного поля при моделировании процесса осаждения ферромагнитных частиц, присутствующих в моторном масле, были проведены три варианта испытаний с использованием неодимовых магнитов ($Nd_2Fe_{14}B$) различной конфигурации:

– вариант I (с дисковым магнитом N45 диаметром 6 мм и высотой 2 мм);

– вариант II (с призматическим магнитом N45 с размерами 15×8×5 мм);

– вариант III (с магнитной системой) [10], которая обеспечивает формирование зоны высокоградиентного магнитного поля в открытой доменной структуре Киттеля [14]. Такая магнитная система была предложена в источниках [15, 16] для магнитной сепарации при производстве чистых и сверхчистых материалов в электронике, металлургии и химии, для

разделения биологических объектов в биологии и медицине, для очистки воды от тяжелых металлов и органических примесей и др.

Магнитная система (рис. 2) состояла из двух неодимовых магнитов N45 1 (20×6×4 мм), которые устанавливались боковыми поверхностями друг к другу разноименными полюсами и располагались на нижней пластине 3 из магнитно-мягкого материала. На верхних гранях этих магнитов устанавливались две пластины 2 с зазором между ними – 0,5 мм, также состоящих из магнитно-мягкого материала Т150-50S (электротехническая анизотропная сталь для трансформаторов (ГОСТ 32482-2013)).

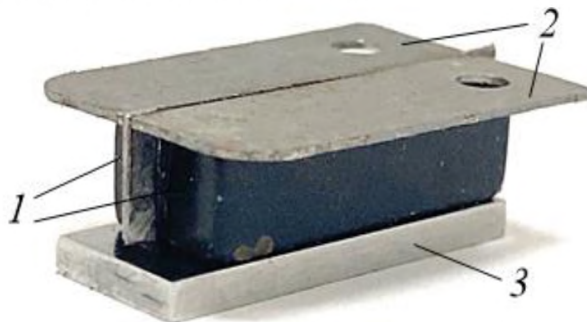
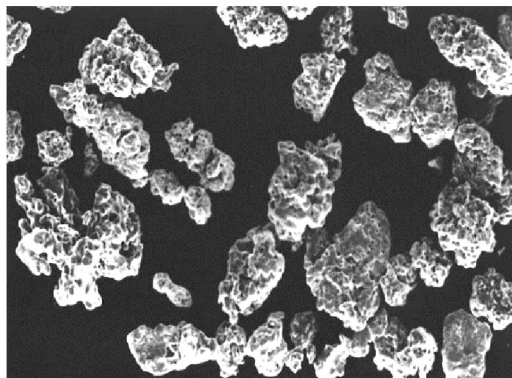


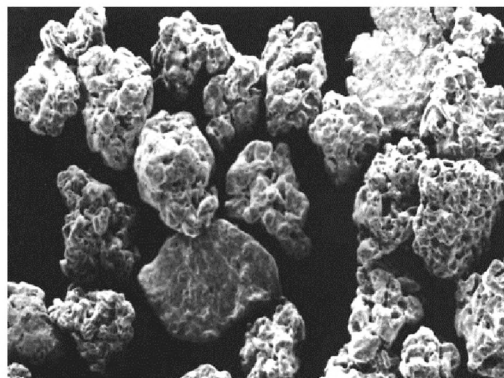
Рисунок 2. Внешний вид магнитной системы:
1 – магниты; 2 – верхние пластины;
3 – нижняя пластина

Фиксацию изображений проводимых испытаний производили при помощи фото- и видеокамеры мобильного телефона.

Для проведения испытаний прозрачную рабочую жидкость (раствор глицерина со спиртом) объемом 25 см³ заливали в кювету и засыпали в нее ферромагнитные частицы (железный порошок) массой 0,125 г. Учитывая, что насыпная плотность железного порошка ПЖР 2.200 – 28 г/см³, концентрация частиц в растворе составляла 0,02 %. Для получения устойчивой суспензии порошка производили перемешивание в рабочей жидкости в течение 5 минут с использованием электро-механической пружинной мешалки из коррозионно-стойкой стали. Полученная устойчивая суспензия порошка в рабочей жидкости представлена на рисунке 3.



а



б

Рисунок 1. Микроструктура железного порошка марки ПЖР 2.200 с различным увеличением:
а – 100×; б – 250×

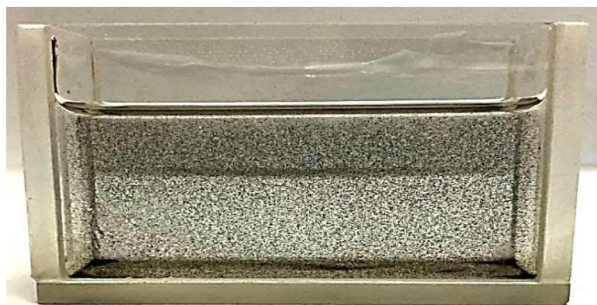


Рисунок 3. Внешний вид полученной устойчивой суспензии

Процесс осаждения ферромагнитных частиц во времени τ по трем вариантам испытаний представлен в таблице 1.

Проведенные исследования осаждения ферромагнитных частиц по трем вариантам испытаний показали, что, во-первых, осаждение по варианту III заканчивается на 105 с, в то время как по вариантам I и II осаждение еще продолжается и заканчивается на 173 и 200 с соответственно (табл. 2). Во-вторых, в варианте III осаждение происходит непосредственно на магнитной системе в отличие от вариантов I и II, в которых частицы осаждаются не только на самих магнитах, но и по всему дну кюветы. Последнее может быть объяснено тем, что магнитные силовые линии, создаваемые магнитами, в вариантах I и II распространяются по всему объему кюветы и даже выходят за ее пределы, в то время как в

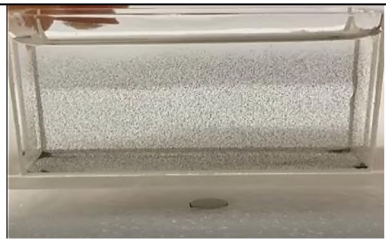

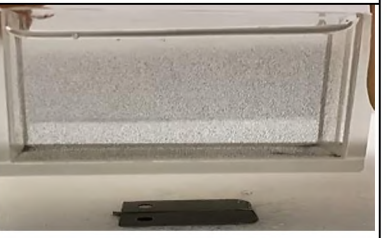






варианте III они замыкаются на магнитной системе.

Представленные экспериментальные результаты подтверждаются теоретическими расчетами, полученными с использованием программного комплекса Femm 4.2. Данный комплекс позволяет моделировать магнитные поля, создаваемые магнитами различной конфигурации. На рисунке 4 представлено распределение магнитных силовых линий, создаваемых призматическим магнитом (вариант II) (рис. 4а) и магнитной системой (вариант III) (рис. 4б).

Представленные теоретические результаты исследования показывают, что при использовании магнитной системы (рис. 4б) в зазоре между верхними пластинами 2 создается область 4 для выхода магнитных силовых линий, в которой образуется магнитное поле рассеяния с высокой напряженностью и высоким градиентом напряженности в направлении, перпендикулярном зазору. Нижняя пластина 3, расположенная под магнитами 1, также ограничивает выход силовых линий за пределы магнитной системы.

Проведенные экспериментальные исследования и теоретические расчеты по осаждению ферромагнитных частиц в различных магнитных полях постоянных магнитов доказали, что предложенная конструкция магнитной системы (вариант III) позволяет локализовать ферромагнитные частицы непосредственно в области, примыкающей к магнитам, и за более короткое время (в 1,7-2 раза) осуществить процесс их осаждения.

Таблица 1. Динамика процесса осаждения ферромагнитных частиц по трем вариантам испытаний

t, с	Вариант испытаний		
	I	II	III
0			
30			
60			

Продолжение таблицы 1








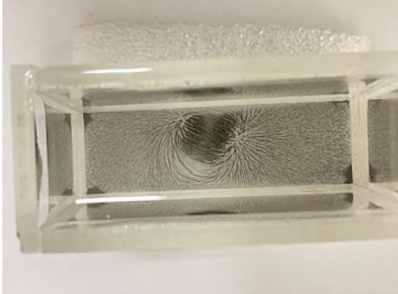



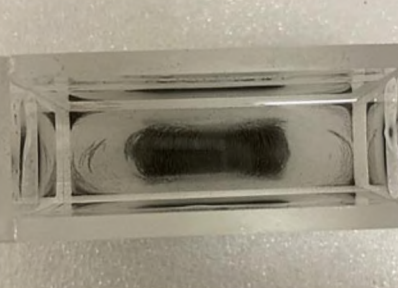
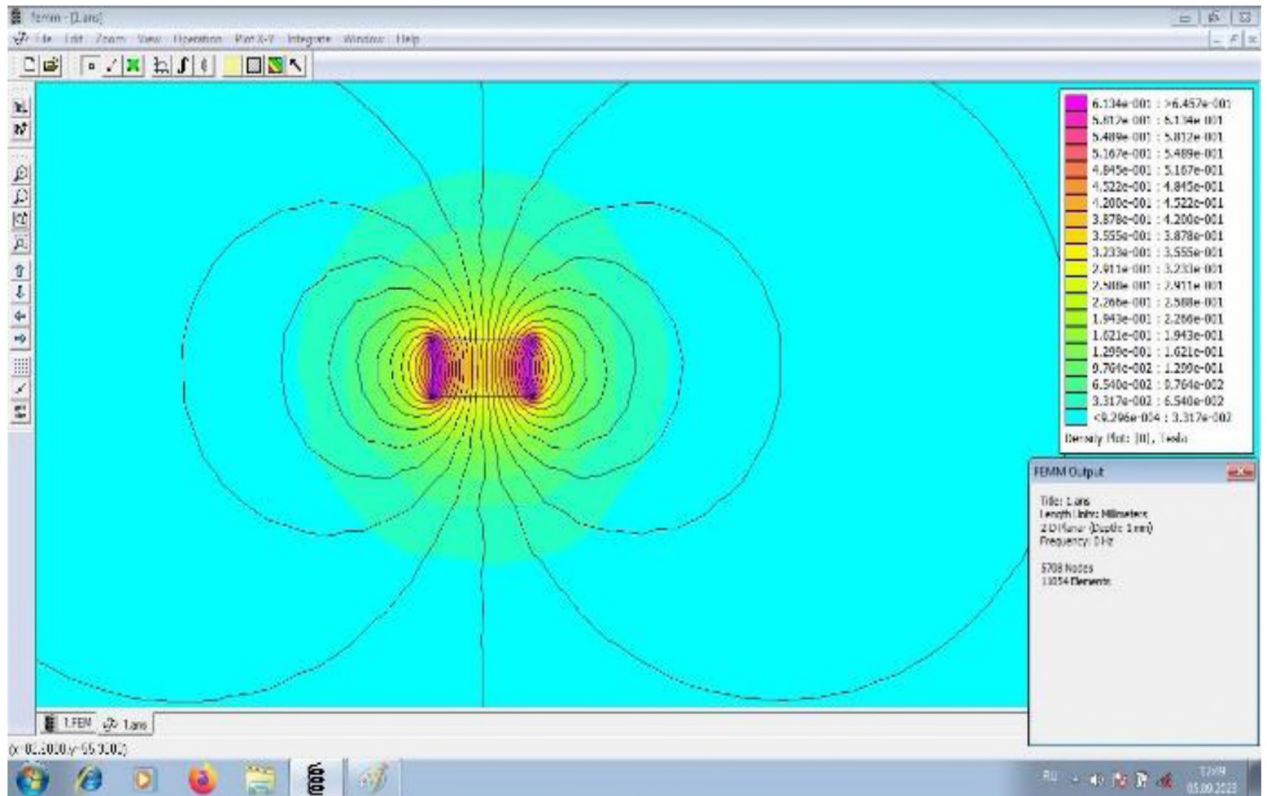
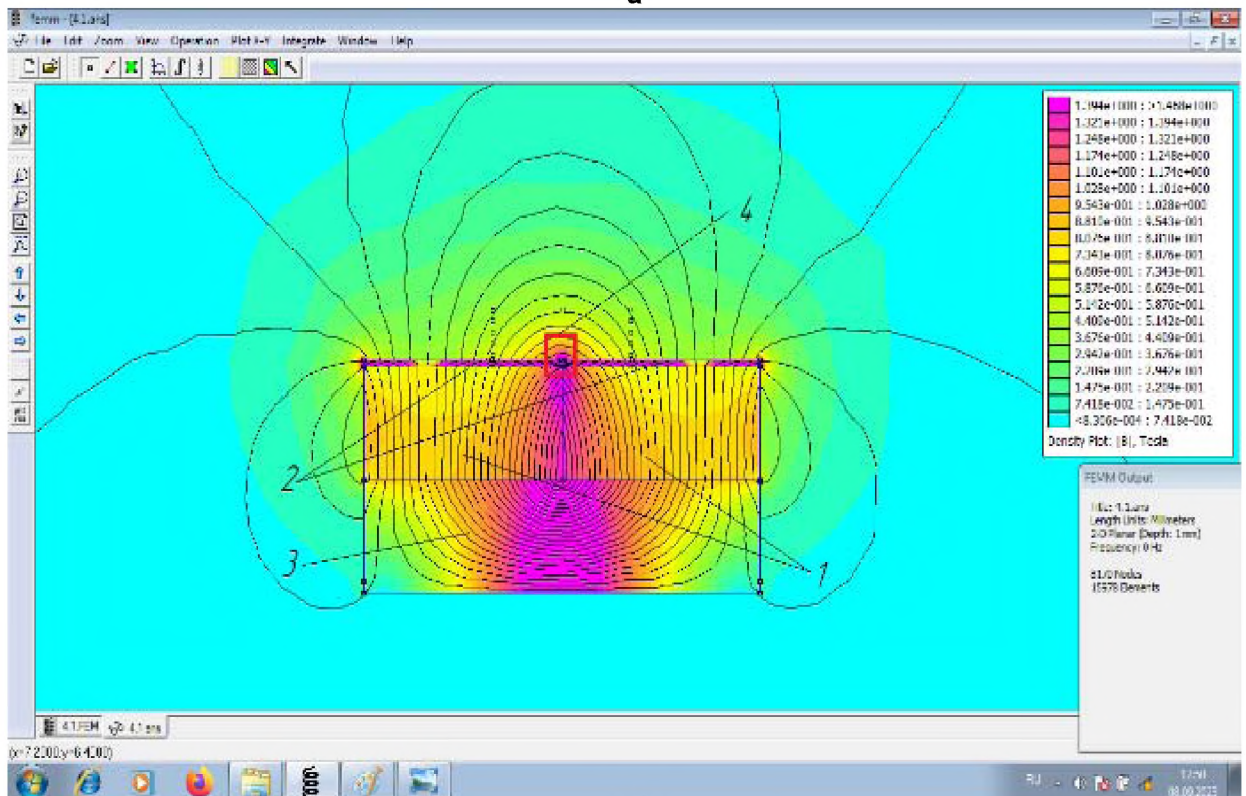
τ, с	Вариант испытаний		
	I	II	III
90			
105			

Таблица 2. Окончательная картина осаждения ферромагнитных частиц по трем вариантам испытаний, зафиксированная с разных позиций

Вариант	Изображения окончания процесса осаждения	
	Главный вид	Вид сверху
I		
II		
III		



а



б

Рисунок 4. Моделирование магнитных систем, создаваемых магнитами различной конфигурации, с использованием программного комплекса Femm 4.2: а – силовые линии призматического магнита; б – силовые линии магнитной системы: 1 – магниты; 2 – верхние пластины; 3 – нижняя пластина; 4 – зазор

Заклучение

Проведено экспериментальное моделирование и дано теоретическое подтверждение процесса осаждения продуктов износа в моторном масле под действием полей постоянных магнитов различной конфигурации и предложенной магнитной системой, состоящей из двух неодимовых магнитов, установленных разноименными полюсами друг к другу боковыми поверхностями на нижней пластине из магнитно-мягкого материала, а на их верхних гранях установлены две пластины из магнитно-мягкого материала с зазором между ними. Предложенная конструкция магнитной системы позволяет локализовать частицы непосредственно в области, примыкающей к магнитам, и за более короткое время осуществить процесс их осаждения.

Полученные результаты исследований позволяют рекомендовать предложенную магнитную систему для разработки и изготовления диагностических инструментов контроля продуктов износа ДВС в моторном масле, встраиваемых непосредственно в масляную систему (магнитные фильтры, щупы, пробки), а также лабораторного оборудования (аналитический феррограф и феррограф прямого считывания).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Fitch, B. Magnetic Filtration Applications and Benefits / B. Fitch // Machinery Lubrication [Electronic resource]. – 2005. – Mode of access: <https://www.machinerylubrication.com/Read/794/magnetic-filtration>. – Date of access: 08.07.2024.
2. Bubenicek, S. Le suivi d'usure de machines par la méthode des analyse périodiques d'huile / S. Bubenicek // Bulletin technique du: Bureau Veritas. – 1987. – Mart / April. – P. 75-78.
3. Fitch, B. Anatomy of Wear Debris / B. Fitch // Machinery Lubrication [Electronic resource]. – 2013. – Mode of access: <https://www.machinerylubrication.com/Read/29537/wear-debris-anatomy>. – Date of access: 09.07.2024.
4. Fitch, J. The Benefits of Using Wear Debris Analysis in Industrial Machinery / J. Fitch // Machinery Lubrication [Electronic resource]. – 2008. – Mode of access: <https://www.machinerylubrication.com/Read/1390/wear-debris-analysis-industrial>. – Date of access: 09.07.2024.
5. Nair, K. An appraisal of the direct reading (dr) ferrograph / K. Nair, E. Fitch, R. Tessniann // BhPR Journal. – 1980. – № 13 (4). – P. 319-328.
6. Westcott, V.C. Ferrography Oil and Grease Analysis as Applied to Earth Moving Machinery / V.C. Westcott. – SAE Preprint 7050555. – 1975. – 11 p.
7. Method and apparatus for assessing particle deposits: Patent WO85/04715: IPC G 01N 15/06, 33/28 / Inventor A.R. Lansdown, D.B. Jones, A.L. Price; applicant The University College of Swansea. – № 1985004715; Patented 24.10.1985.
8. Engine oil magnetic oil dip rod: Patent CN2739368Y: IPC F01M11/12, F01M11/03 / Inventor 曹东升; applicant 曹东升. – № 200420060737; Patented 09.11.2005.
9. Магнитный щуп для контроля уровня масла и наличия ферромагнитных частиц в картере двигателя внутреннего сгорания: пат. 23735 С1 Респ. Беларусь, F 01M 11/12, В 03С 1/00 / В.М. Капцевич, В.К. Корнеева, И.В. Закревский, А.Н. Рыхлик; заявитель Белорусский гос. аграр. техн. ун-т. – № а 20200363; заявл. 14.12.2020; опубл. 30.04.2023.
10. Корнеева, В.К. Осаждение ферромагнитных частиц в поле постоянных магнитов / В.К. Корнеева, В.М. Капцевич, И.В. Закревский, П.М. Спиридович // Агропанорама. – 2022. – № 5. – С. 34-39.
11. Motion analysis on the particles in a magnetic field detector / Y. Liu [et al.] // Tribology International. – 2000. – № 33. – P. 837-843.
12. Самофалов, В.Н. Сильные поля рассеяния в системах магнитов с гигантской магнитной анизотропией / В.Н. Самофалов, Д.П. Белозоров, А.Г. Равлик // Успехи физических наук. – 2013. – Т. 183. – № 3. – С. 287-306.
13. Coey, J.M.D. Permanent magnet applications / J.M.D. Coey // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2002. – № 248. – P. 441-456.
14. Kittel, C. Physical Theory of Ferromagnetic Domains / C. Kittel // Reviews of Modern Physics. – 1949. – V. 21. – № 4. – P. 541-583.
15. Способ формирования высокоградиентного магнитного поля и устройство для разделения веществ на его основе: пат. РФ 2 370 319, МПК В03С 1/02 / В.А. Глебов, Е.И. Ильяшенко, А.В. Глебов. – № 2005106208; заявл. 22.12.04 ; опубл. 20.10.2009 // Афіцыйны бюл./ Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 29.
16. Permanent magnet systems with strong stray magnetic fields and very high gradients for material separation / E.I. Il'yashenko [et al.] // Physica Status Solidi. – 2006. – № 7. – P. 1556-1560.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 10.10.2024