

УДК 621.548

**ПРИМЕНЕНИЕ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ В ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ,  
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ И ДРУГИХ ОТРАСЛЯХ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

**Ю.Н. Перминов**, канд.техн.наук,

**Институт возобновляемой энергетики НАН Украины,**

**02094, г. Киев, ул. Гната Хоткевича, 20А**

Тел./факс +38-044-206-28-09

e-mail: [renewable@ukr.net](mailto:renewable@ukr.net)

ORCID: 10000-0001-5604-8327

**В.П. Коханевич**, , канд.техн.наук,

**Институт возобновляемой энергетики НАН Украины,**

**02094, г. Киев, ул. Гната Хоткевича, 20А**

Тел./факс +38-044-206-28-09

e-mail: [renewable@ukr.net](mailto:renewable@ukr.net)

ORCID: 0000-0003-0033-1355

**С.Ю. Перминова**

**Институт экологического управления и сбалансированного природопользования,**

**02002, г. Киев, ул. Никольско – Слободская, 6 -Д**

Тел./факс +38-044-541-10-11

e-mail: [polisvett@gmail.com](mailto:polisvett@gmail.com)

ORCID: 0000-0003-0550-6548

**А.В. Бабийчук**

**ОП Научно-технический центр ГП «НАЭК «Энергоатом»**

**01032, м. Київ, вул. Назарівська, 3**

Тел./факс +38 (044) 277-78-83

e-mail: [a.babichuk@direkcy.atom.gov.ua](mailto:a.babichuk@direkcy.atom.gov.ua)

ORCID: 0000-0001-5169-3933

**Ю.В. Литовчук**

**ООО «Полимагнит»**

**04080, г. Киев, ул. В. Хвойки, 18/14, корп. №9, оф. №904**

Тел./факс: +38(044) 461-91-94

e-mail: [litovchuk@polymagnet.org.ua](mailto:litovchuk@polymagnet.org.ua)

[www.polymagnet.org.ua](http://www.polymagnet.org.ua)

ORCID: 0000-0002-1967-5070

*В статье рассматривается применение постоянных магнитов при обогащении магнетитовых и слабомагнитных руд, окисленных железосодержащих, ильменитовых марганцевых и т.д. и использование магнитов в электротехнической промышленности, в частности, электрических машинах и устройствах для сепарации различных продуктов. Освещены возможности и преимущества применения технологии магнитного обогащения, в т. ч. при переработке отходов горно-обогатительных комбинатов. Приводится сравнение устройств различных конструкций, выполненные на основании результатов исследований магнитных систем. Проанализированы отдельные вопросы, связанные с проектированием магнитных систем в разных конструкциях.*

***Ключевые слова:** сепарация, постоянные магниты, магнитные системы, электрические машины.*

## **USE OF PERMANENT MAGNETS IN THE MINING, ELECTROTECHNICAL AND OTHER INDUSTRY**

**Permynov Y., candidate of technical sciences,**

**Institute of Renewable Energy, NAS of Ukraine,**

**Hnata Khotkevicha Str., 20A, 02094, Kyiv - 94, Ukraine**

Phone./fax: +38-044-206-28-09

e-mail: [renewable@ukr.net](mailto:renewable@ukr.net)

ORCID: 10000-0001-5604-8327

**Kokhanievych V., candidate of technical sciences**

**Institute of Renewable Energy, NAS of Ukraine,**

**Hnata Khotkevicha Str., 20A, 02094, Kyiv - 94, Ukraine**

Phone./fax: +38-044-206-28-09

e-mail: [renewable@ukr.net](mailto:renewable@ukr.net)

ORCID: 0000-0003-0033-1355

**Permynova S.**

**Institute for Environmental Management and Balanced Nature,**

Mykilsko-Slobidska Str., 6-D, 02002, Kyiv-02, Ukraine

Phone./fax: +38-044-541-10-11

e-mail: [polisvett@gmail.com](mailto:polisvett@gmail.com)

ORCID: 0000-0003-0550-6548

**Babychuk A.**

**State Enterprise «NNEGC «Energoatom»,**

**Nazarivska Str., 3, 01032, Kyiv-32, Ukraine**

Phone./fax: +38 (044) 277-78-83

e-mail: [a.babichuk@direkcy.atom.gov.ua](mailto:a.babichuk@direkcy.atom.gov.ua)

ORCID: 0000-0001-5169-3933

**Litovchuk Y.**

**Polymagnet Ltd.**

V. Khvoiky Str.,18/14, 04080, build.9-904 , Kyiv-80, Ukraine

Tel./fax: +38 (044) 461-91-94

e-mail: [litovchuk@polymagnet.org.ua](mailto:litovchuk@polymagnet.org.ua)

[www.polymagnet.org.ua](http://www.polymagnet.org.ua)

ORCID: 0000-0002-1967-5070

*The article concerns the permanent magnets usage for the enrichment of the magnetite and weakly magnetic ores, oxidized iron-containing, ilmenite manganese, etc., as well as, use of magnets in the electrical industry, in particular, in electrical machines and separation devices for various products. The opportunities and advantages of using magnetic enrichment technology are highlighted, including processing waste from mining plants. On a base of magnetic systems research the devices in different designs was compared. Some questions related to the products with permanent magnets design are touched.*

**Key words:** *separation, permanent magnets, magnetic systems, electrical machines.*



*Перминов Юрий Никитич*

**Сведения об авторе:** канд. техн. наук, старший научный сотрудник Института возобновляемой энергетики НАН Украины.

**Образование:** окончил в 1968 г. Киевский политехнический институт по специальности «Электрические машины и аппараты».

**Область научных интересов:** ветрогенераторы, ветроустановки малой мощности, гидрогенераторы, устройства с постоянными магнитами.

**Публикації:** 84.

ORCID: 10000-0001-5604-8327

**Information about the author:** candidate of technical sciences, Senior Researcher at Institute for Renewable Energy, National Academy of Sciences of Ukraine.

**Education:** graduated from the Kiev Polytechnic Institute in 1968 with a degree in Electrical Machines and Apparatuses.

**Area of researches:** wind power systems, small capacity wind units, hydrogenerators, devices with permanent magnets

**Publications:** 84.



*Коханевич Владимир Петрович*

**Сведения об авторе:** канд. техн. наук, старший научный сотрудник отдела ветроэнергетики Института возобновляемой энергетики НАН Украины, Киев.

**Образование:** окончил в 1979 г. Киевский политехнический институт по специальности «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты».

**Область научных интересов:** ветроэнергетика, ветроустановки малой мощности, системы регулирования и защиты.

**Публикации:** 119

ORCID: 0000-0003-0033-1355

**Information about the author:** candidate of technical sciences, Senior Researcher at Institute for Renewable Energy, National Academy of Sciences of Ukraine.

**Education:** graduated from the Kyiv Polytechnic Institute in 1979 with the specialization «Technology of Machine-Building, Metal Cutting Machines and Tools».

**Area of researches:** power systems, converting types of energy, automation and modeling processes. wind power systems, small capacity wind units, control systems and protect.

**Publications:** 119.



*Перминова Светлана Юрьевна*

**Сведения об авторе:** начальник отдела научно - методического обеспечения Института экологического управления и сбалансированного природопользования

**Образование:** окончила в 2004 году Киевский национальный университет строительства и архитектуры по специальности «Экологическая безопасность».

**Область научных интересов:** возобновляемые источники энергии, зеленое строительство; экологический менеджмент, аудит и оценка жизненного цикла продукции (ISO 14000)

**Публикации:** 24.

ORCID: 0000-0003-0550-6548

**Information about the author:** Head of the Scientific and Methodological Support Department at Institute for Environmental Management and Balanced Nature

**Education:** graduated from the Kyiv National University of Construction and Architecture in 2004 with a degree in Environmental Safety.

**Area of researches:** renewable sources of energy, green building; environmental management, audit and life cycle assessment (ISO 14000)

**Publications:** 24.



*Бабийчук Алексей Викторович*

**Сведения об авторе:** ведущий инженер отдела информационного обеспечения ОП Научно-технический центр ГП «НАЭК «Энергоатом»

**Образование:** окончил в 1991 г. Киевский политехнический институт по специальности «Приборы точной механики»

**Область научных интересов:** атомная энергетика, промышленные ветроустановки большой мощности

**Публикации:** 8

ORCID: 0000-0001-5169-3933

**Information about the author:** Leading engineer of the Information Support Department in OP Scientific and technical center of the State Enterprise «NNEGC «Energoatom».

**Education:** graduated from the Kyiv Polytechnic Institute in 1991 with a degree in Precision Mechanics.

**Area of researches:** nuclear power, industrial wind power plants of high power

**Publications:** 8.



*Литовчук Юрий Валентинович*

**Сведения об авторе:** генеральный директор ООО «Полимагнит».

**Образование:** окончил в 1998 г. Национальный технический университет Украины (КПИ) по специальности «Композиционные и порошковые материалы и покрытия».

**Область научных интересов:** ветрогенераторы, ветроустановки малой мощности, гидрогенераторы, устройства с постоянными магнитами.

ORCID: 0000-0002-1967-5070

**Information about the author:** Director General of Polymagnet Ltd.

**Education:** graduated from the National Technical University of Ukraine (KPI) with a degree in Composite and Powder Materials and Coatings.

**Area of researches:** wind power systems, small capacity wind units, hydrogenerators, devices with permanent magnets

#### **Перечень используемых обозначений**

$P_n$	- номинальная мощность;
$\Phi_\delta$	- полезный магнитный поток;
$J$	- момент инерции якоря;
$R$	- сопротивление якоря;
$n_n$	номинальные обороты;
$M_n$	номинальный момент;
$E_n$	- номинальное ускорение;
$K_e$	- коэффициент Э.Д.С.;
$P$	- число пар полюсов;
$N$	- число проводников обмотки
$\alpha$	- число пар параллельных ветвей обмотки
$B_\delta$	- индукция в рабочем зазоре
$l_a$	- активная длина якоря.
$\gamma$	- удельный вес якоря

**Введение.** Постоянные магниты являются экологически чистыми, «холодными», источниками энергии и способны сохранять состояние намагниченности в течение длительного времени. Так, с момента намагничивания потеря магнитных параметров составляет приблизительно

2% за четверть века. По уровню магнитного поля, характеризуемому индукцией и напряженностью, магниты не уступают, а часто и превосходят электромагнитные источники энергии, поэтому спектр их применения необычайно широк, от синхронных генераторов и магнитных сепараторов до электрических микромашин различных конструкций, устройств для систем автоматического регулирования.

**Постановка задачи.** Целью данной статьи является обзор возможностей, практический опыт и перспективы применения постоянных магнитов при обогащении магнетитовых и слабомагнитных руд, окисленных железосодержащих, ильменитовых марганцевых и т.д., а также использование магнитов в электротехнической промышленности, в частности, электрических машинах и устройствах для сепарации различных продуктов.

## **1. Применение постоянных магнитов в устройствах для обогащения слабомагнитных и магнитных руд**

Задачи по вторичной переработке промышленных отходов всегда были актуальны. В США из промышленных отходов получают 20% алюминия, 33% железа, 50% свинца и цинка, 44% меди [1]. При этом, следует отметить, что себестоимость товарной продукции из промышленных отходов в 10–15 раз меньше, чем из добываемых традиционным способом руд.

В Украине имеется существенный потенциал использования отходов горнообогатительных предприятий. Так, в Кривбассе в отвалах находится до 13 млрд. т вскрышных пород и до 6 млрд. т отходов обогащения бедных руд. Эти отходы негативно влияют на природные ландшафты, экологические условия, занимая площадь 150 тыс. га плодородных земель и ухудшая среду обитания человека. Проблемы обогащения касаются не только железосодержащих руд, но и имеющихся в Украине слабомагнитных ильменитовых руд, используемых при производстве титана, марганцевых руд. Например, вторичная переработка 150 млн. т отходов обогащения марганцевых руд Никопольского р-на и 800 млн. т отходов обогащения железных руд Криворожского бассейна могут дать товарной продукции более чем на 10 млрд. долларов. На территории Криворожского железорудного бассейна заскладировано более 800 млн. т окисленной руды, в которой содержится около 30% полноценной руды, что составляет 12 летний объем добычи железорудного сырья.

Несколько лет назад речь шла о закрытии шахтной добычи руды в Криворожском бассейне из-за большого объема руды, отправляемой в отвалы. Одной из причин при этом является существенный процент содержания слабомагнитных окисленных руд. Однако, закрытие шахт без откачки воды будет сопровождаться подтоплением близлежащих территорий, а г. Кривой рог тянется на протяжении 120 км вдоль железосодержащей жилы, поэтому подтопление не допустимо, т. к. потребуются расходы на содержание закрытых шахт, которые будут составлять половину расходов на действующих шахтах.

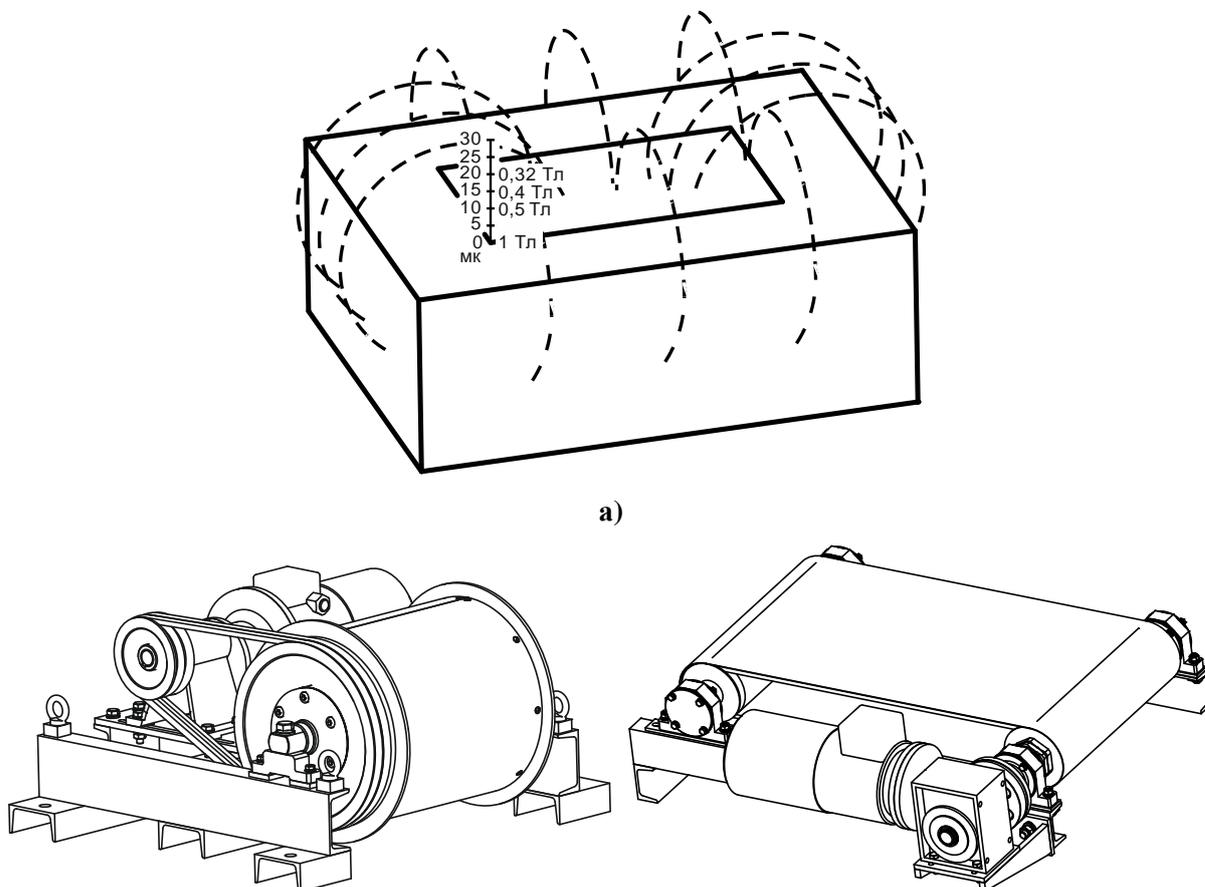
При традиционном взгляде отвалы не имеют промышленной ценности, но, как показали исследования, проведенные в Научно-исследовательском горнорудном институте (г. Кривой Рог), в

результате магнитного обогащения окисленных руд получен концентрат с содержанием железа 66,5%, что соответствует требованиям металлургических предприятий.

Технология применения магнитного обогащения применима и для других слабомагнитных руд. В частности, в Житомирской области работает Иршанский ГОК, где перерабатывают ильменитовые пески, из которых производят титан. В 2001–2002 годах этот комбинат производил 300 тыс. т ильменитового концентрата в год, из которых 50 тыс. т концентрата терялась в результате традиционного обогащения, без использования магнитной обработки. Задача магнитного обогащения актуальна также для предприятий, перерабатывающих марганцевые руды, в частности для Марганецкого ГОКа. И это только некоторые примеры по целесообразности применения магнитного обогащения.

Для переработки слабомагнитных, окисленных руд совместно с несколькими странами Восточной Европы строился Криворожский горно-обогатительный комбинат окисленных руд (г. Долинская, Кировоградская область), но строительство не завершено, однако на комбинате осуществляется экспертная оценка содержания железа в рудах с комбинатов Украины, России, Казахстана.

Для этой цели по техническому заданию комбината были разработаны и изготовлены экспериментальные магнитные сепараторы, как для сухого, так и мокрого обогащения с разными уровнями магнитного поля, предполагая их использование не только для обогащения слабомагнитных железосодержащих, но и магнетитовых, ильменитовых и марганцевых руд (рис. 1).



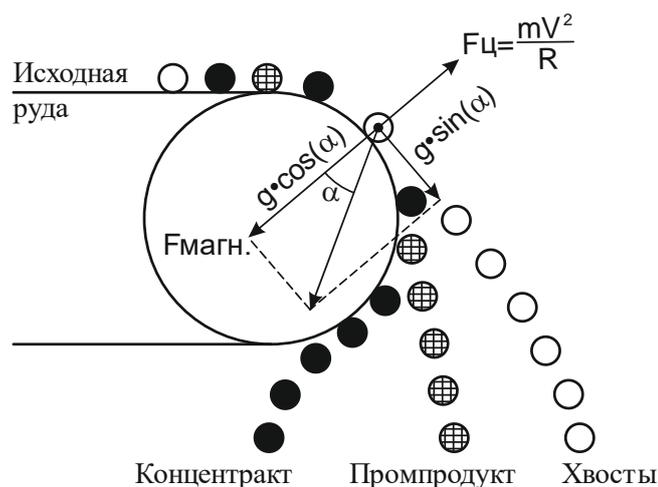
б)

в)

**Рис. 1.** Магнитные сепараторы: а) – магнитный блок сепаратора; б) – барабанный сепаратор; в) – валковый сепаратор.

**Fig.1.** Magnetic separators: а) – Magnetic block of separator; б) – Drum separator; в) – Roller separator.

Физическая суть процесса разделения частиц с разными магнитными свойствами заключается в том, что на каждую частицу одновременно действуют силы притяжения магнитного поля, центробежные и гравитационные силы (рис. 2). Под действием этих сил место расположения частицы определяется ее магнитными свойствами, чем ниже магнитная восприимчивость, тем дальше от источника магнитной энергии она будет отброшена центробежными силами. В результате в процессе обогащения образуется «веер» частиц. Содержание полезного компонента в «веере» частиц изменяется от максимального, у источника магнитной энергии, до минимального по мере удаления от него. В виду того, что магнитные силы направлены противоположно центробежным, а величина магнитных сил в сепараторах с постоянными магнитами неизменна, то эффективность обогащения может регулироваться изменением центробежных сил за счет изменения скорости вращения, поэтому для каждого обогащаемого материала имеется оптимальная частота вращения барабана.



**Рис. 2.** «Веер» частиц сепарируемого продукта.

**Fig. 2** «Fan» of the separated product particles.

Обогащение слабомагнитных руд можно осуществлять только в мощных магнитных полях. Для этого применяются электромагнитные и магнитные сепараторы с использованием постоянных магнитов с высокой удельной энергией (рис. 1) типа NdFeB, позволяющих осуществить замену электромагнитных сепараторов, благодаря отсутствию обмоток и потерь в них, уменьшению габаритов и массы, снижению расходов на обслуживание, повышению надежности устройств.

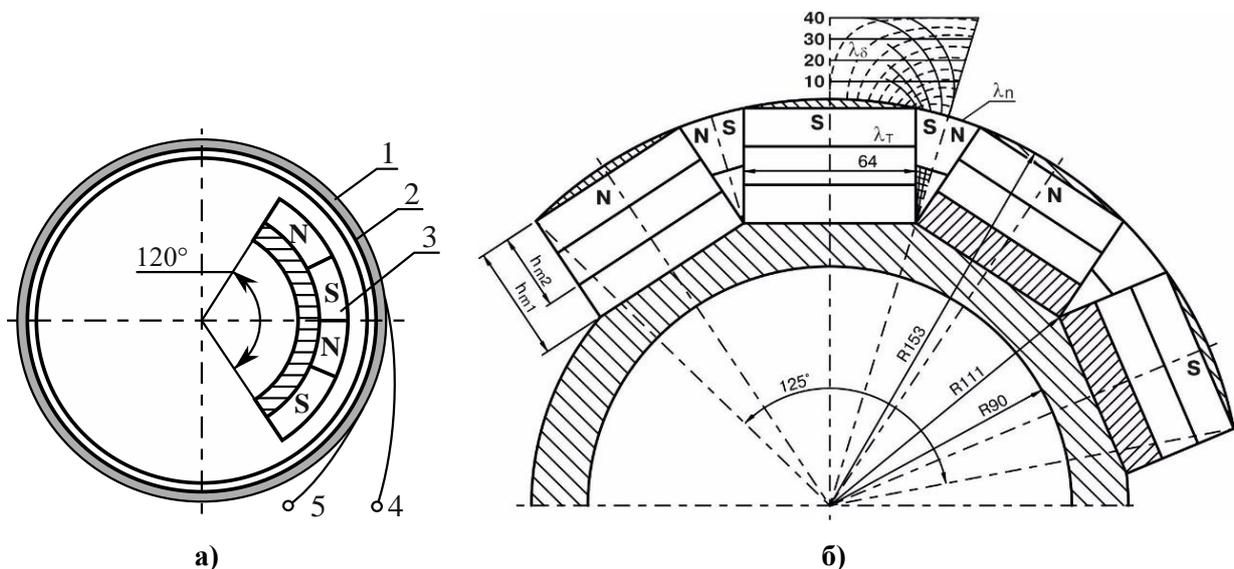
Наиболее важными моментами при разработке магнитных сепараторов и других изделий с постоянными магнитами являются правильный выбор конструкций устройства и оценка энергетических возможностей магнитной системы, требующей исследования магнитных полей и

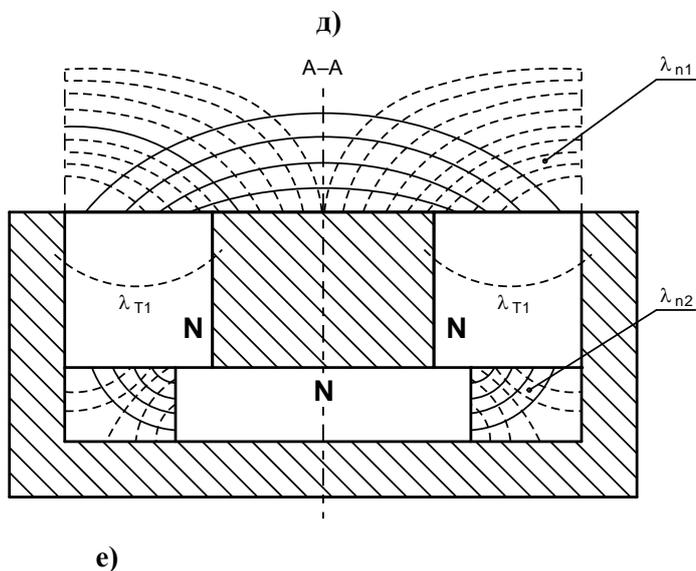
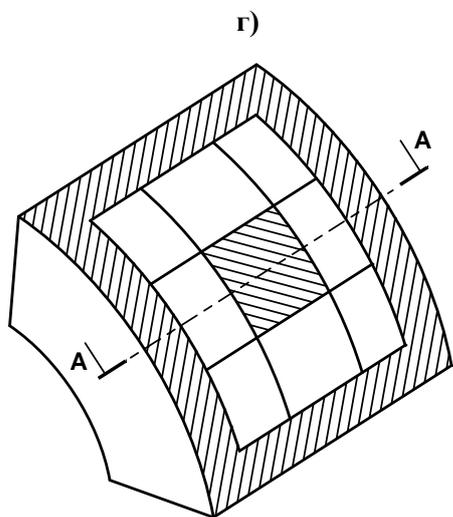
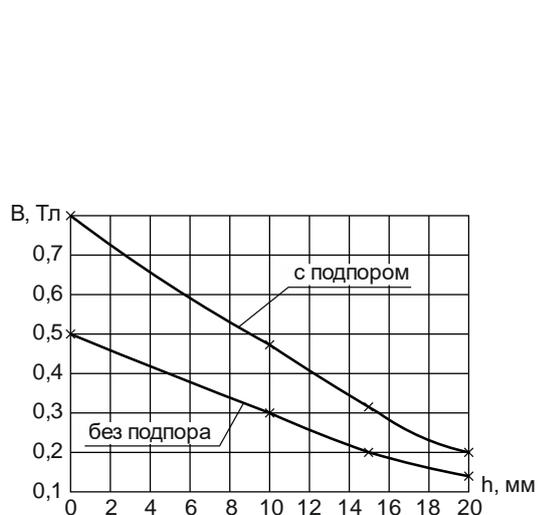
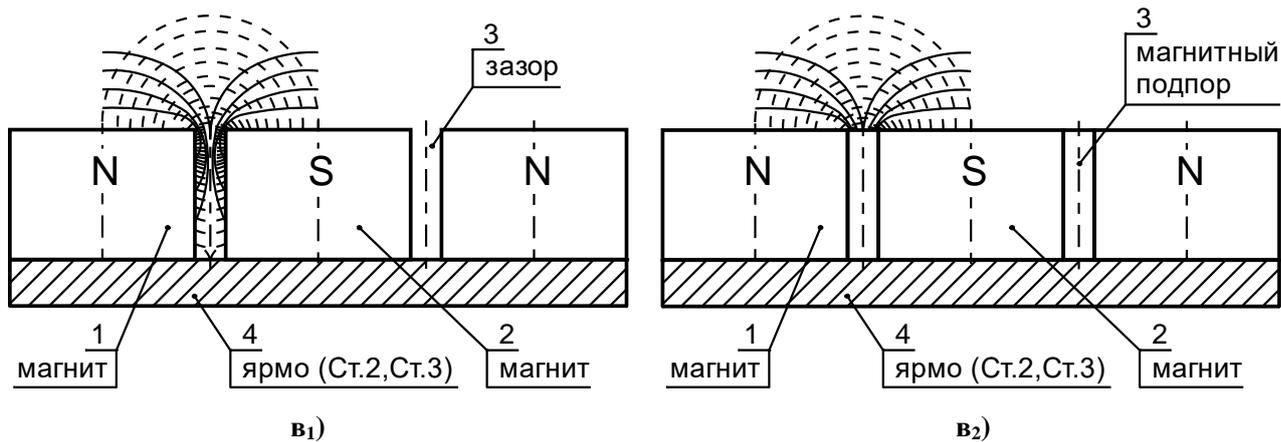
применения необходимых методов расчета. В данном случае применялось физическое моделирование магнитных систем различных конструкций, в которых с использованием пояса Роговского и баллистической установки определялось распределение магнитных потенциалов на границах систем и далее, используя реальные граничные условия, проводилось моделирование магнитных полей с помощью электроинтеграторов. По полученным картинам полей проводился расчет систем с применением известных и уточненных методов расчета [2 – 8].

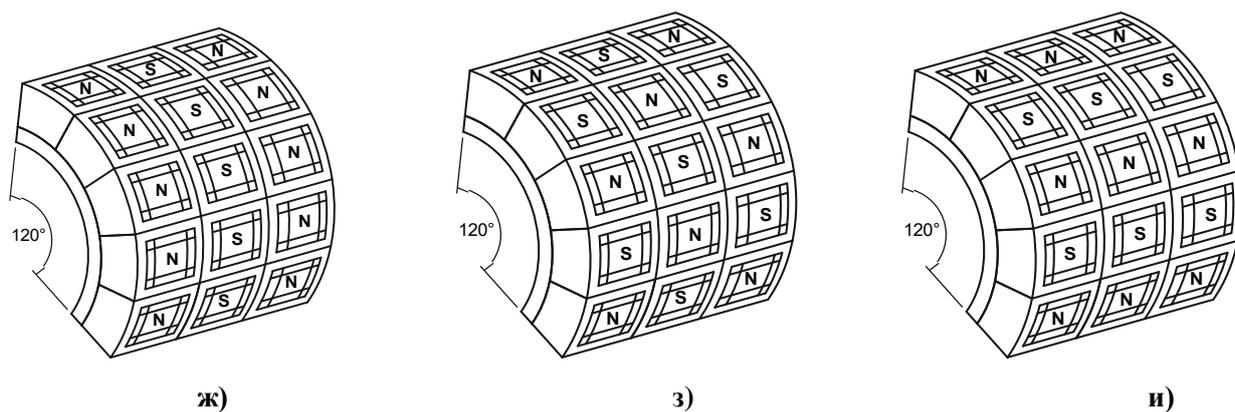
Использование программных продуктов, в частности Comsol Multiphysics в некоторых случаях не дает результатов [9]. Это объясняется тем, что при составлении программ используются методы расчетов, построенные на определенных граничных условиях в рассматриваемой области магнитного поля, которые не всегда известны. Так, например, в кольцевых цельных магнитах многополюсная магнитная система формируется при намагничивании, при этом воздушные промежутки между полюсами противоположной полярности отсутствуют, граничные условия не известны и традиционные методы расчетов – не приемлемы, поэтому осуществляется физическое моделирование, на основе которого строится методика расчета [9]. Накопленный опыт в результате позволяет оперативно решать задачи по расчету магнитных полей в различных магнитных системах и, в целом, выполнять проектирование устройств в сжатые сроки.

Объем статьи не позволяет останавливаться подробно на магнитных системах различных конструкций, поэтому ниже приводятся рисунки магнитных систем и полей с краткими комментариями.

Магнитные системы рудных сепараторов барабанного и валкового типов показаны на рис. 1, 3, 4.







**Рис. 3.** Барабанные магнитные сепараторы.

**Fig. 3.** Drum magnetic separators.

Барабанный и валковый сепараторы имеют существенные конструктивные отличия и связанные с ними магнитные параметры.

Барабанные сепараторы (рис. 3а) представляют собой неподвижную магнитную систему, занимающую часть окружности ( $\approx 120^\circ$ ), вокруг которой вращается обечайка 1 из немагнитного материала. На обечайку с вибрлотка сыпается руда, магнитная фракция которой испытывает тяжение магнитного поля системы 3, направленное к центру окружности, и в результате вращения обечайки, при выходе из зоны действия поля, падает по одной траектории (линия 5), а порода – по другой траектории (линия 4), аналогично, как и на рис. 2.

В такой конструкции (рис. 3а) расстояние от магнитной системы до основания сепарируемого продукта  $\approx 10$  мм: 3 мм – зазор между магнитной системой 3 и обечайкой 4; 4 мм – толщина обечайки 2; 3 мм – толщина футеровки (рис. 3а). По мере удаления от магнитной системы происходит резкое падение индукции (рис. 3г), которая на расстоянии 10 мм не должна быть менее (0,45–0,47) Тл – для слабомагнитных руд и (0,18–0,25) Тл – для магнетитовых руд по условиям сепарации. Поэтому для обогащения магнетитовых руд в магнитной системе применяются анизотропные ферриты бария, или ферриты стронция, а для обогащения слабомагнитных руд их энергии недостаточно, поэтому применяются магниты типа NdFeB, у которых энергия на порядок выше. Для получения индукции (0,45–0,47) Тл потребовалось определение конструкции магнитной системы, её расчет с целью получения зависимости  $B_g = f(h)$ , где  $h$  – глубина проникновения магнитного поля в сепарируемый продукт (рис. 3г). На рис. 3б показан вариант конструкции системы барабанного сепаратора; на рис. 3в<sub>1</sub> – фрагмент этой системы в серийном сепараторе с магнитами NdFeB. Как видно из рис. 3в<sub>1</sub> между боковыми поверхностями полюсов противоположной полярности имеется значительный поток рассеяния, поэтому для повышения параметров магнитной системы данного серийного сепаратора был применен магнитный «подпор» в виде встречно включенных магнитов между боковыми поверхностями полюсов противоположной полярности, что показано на рис. 3в<sub>2</sub>.

Это позволило устранить поток рассеяния между этими поверхностями и существенно

поднять уровень индукции в рабочей зоне (рис. 3г). Серийный барабанный сепаратор имеет диаметр (1–1,2) м и длину – 2,5 м; магнитная система занимает часть окружности – 120° (рис. 3а). При таких размерах на одну магнитную систему требуется ≈ 500 кг магнитов NdFeB, стоимость которых на сегодняшний день – 120 у. е. за кг, т.е. стоимость магнитов на систему ≈ 60000 у. е. Поэтому возник вопрос о разработке магнитной системы для серийного барабанного сепаратора, которая по магнитным параметрам была бы сопоставима с серийной системой (рис. 3в<sub>1</sub>), но имела бы меньший расход магнитов. В результате были разработаны магнитные блоки (рис. 1, 3е), из которых составлялась магнитная система (рис. 3ж, з, и). Каждый блок представляет собой концентратор с встречно включенными на него магнитами NdFeB и имеет оптимальные геометрические соотношения (рис. 1, 3е). В результате исследования магнитного поля, показанного на рис. 3д, также получена зависимость  $B_s = f(h)$ . Как видно, по магнитным параметрам магнитный блок превосходит систему с магнитным «подпором» (рис. 3в<sub>2</sub>), но при этом расход магнитов – вдвое меньше.

По опыту сепарации слабомагнитных руд целесообразна конструкция магнитной системы, в которой изменение полярности магнитов происходит вдоль оси системы (рис. 3ж), а при сепарации магнетитовых руд – изменение полярности по углу (рис. 3з).

Барабанный сепаратор имеет значительные габариты, требуется большой расход дорогостоящих магнитов – NdFeB из-за значительного расстояния между поверхностью системы и основанием сепарируемого продукта ≈ 10 мм, обусловленного самой его конструкцией. Если на поверхности системы с магнитным «подпором» индукция – 0,83 Тл (рис. 3д), то на расстоянии 10 мм – 0,42 Тл, т.е. близко к минимально допустимому значению по условию сепарации слабомагнитных руд, полученное из опыта по обогащению руд.

Устранение указанных недостатков возможно в валковом сепараторе (рис. 1, 4), который представляет собой небольшой транспортер, у которого ведущий валок – магнитная система с кольцевыми магнитами NdFeB, включенными встречно на концентраторы из магнитомягкого материала (рис. 4а, б, г), а ремень изготовлен из прочного материала (например кевлар или полиэстер пропитанный полиуретаном) толщиной (0,3–0,6) мм. Т.е. расстояние от магнитной системы до основания сепарируемого продукта равно толщине ленты, что на порядок меньше, чем в барабанном сепараторе.

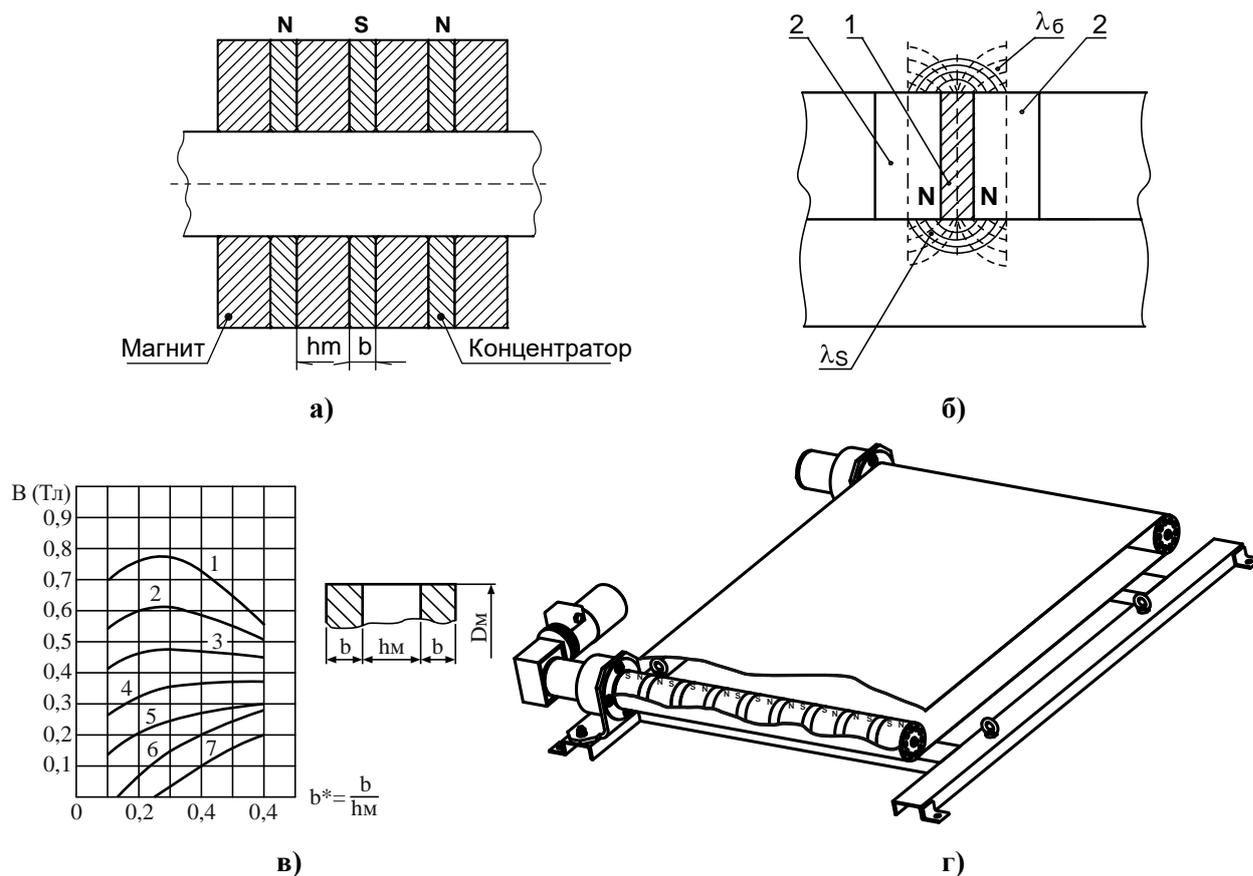


Рис. 4. Валковый сепаратор.

Fig. 4. Roller separator.

В результате исследования магнитного поля в этой конструкции (рис. 4б, в) получена зависимость  $B_s = f(h)$  и на рис. 3д приведены зависимости  $B_s = f(h)$  для разных сепараторов, из которой следует, что индукция у основания сепарируемого продукта – вдвое выше, чем в серийном барабанном сепараторе (смотри рис. 3д кривая 2 и кривая 3) даже в случае применения магнитного «подпора» (рис. 3г) или ранее рассмотренных магнитных блоков (рис. 3е).

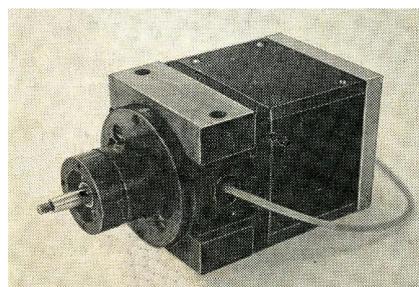
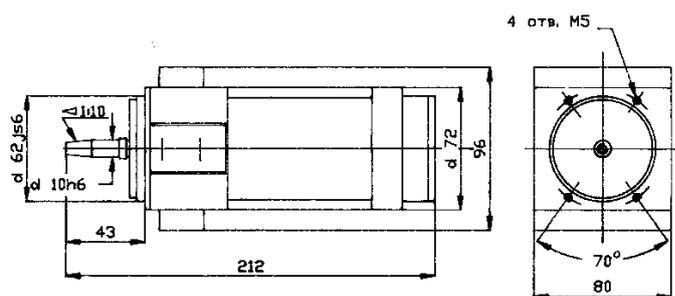
Объясняется это тем, что в валковом сепараторе расстояние от поверхности магнитной системы до основания сепарируемого продукта (0,3–0,6) мм, определяемое толщиной ремня. Для оценки возможной производительности валкового сепаратора и качества сепарации совместно с Научно-исследовательским горнорудным институтом были проведены эксперименты по сепарации слабомагнитных, окисленных руд на экспериментальном сепараторе на разных скоростях вращения. В результате установлена оптимальная повышенная скорость вращения, при которой нет ухудшения качества сепарации, а производительность такого сепаратора сопоставима с производительностью барабанного сепаратора. Испытания, проведенные на разработанных для Криворожского горно-обогатительного комбината экспериментальных сепараторах на рудах с разных комбинатов, подтвердили этот вывод. В целом, валковый сепаратор с NdFeB является перспективной, требующей расширения области применения, конструкцией. По результатам проведенной работы составлен план

прединвестиционных проработок целесообразности обогащения бедного минерального сырья Марганецкого ГОКа.

## 2. Применение магнитов в быстродействующих электрических машинах и ветроустановках

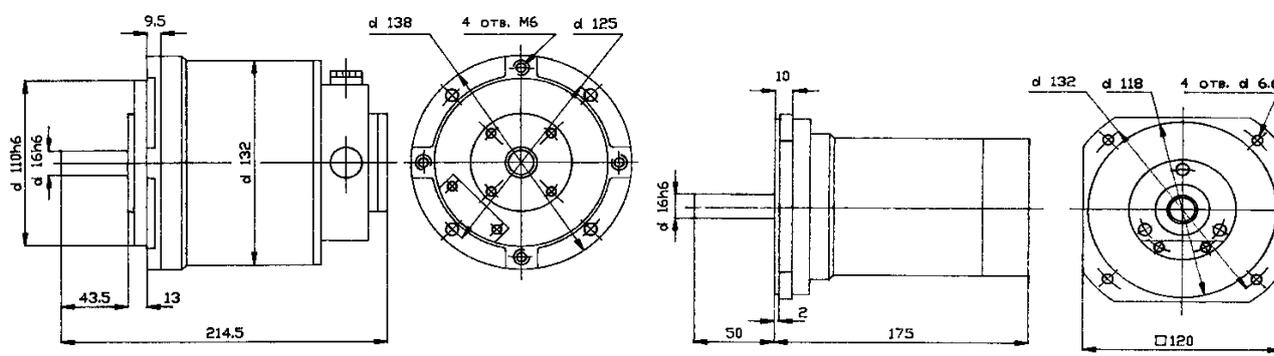
В быстродействующих системах автоматического регулирования получили применение различные электрические машины с возбуждением от постоянных магнитов (рис. 5):

- постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов с полым (рис. 5а) и гладким (рис. 5б) якорем;
- полым якорем и внутренней системой возбуждения (рис. 5в);
- бесконтактные (рис. 5 г, к);
- шаговые (рис. 5д);
- линейные (рис. 5е, ж, з, и);
- бесконтактные двигатели постоянного тока (рис. 5г).



$$M_H = 0,33 \frac{\hat{i} \hat{a}}{\hat{i} \hat{e} \hat{t}}, n_H = 300 \frac{\hat{a}}{\hat{e} \hat{t}}, E_H = 30000 \frac{\partial \hat{a} \hat{a}}{\hat{n}^2}$$

а)

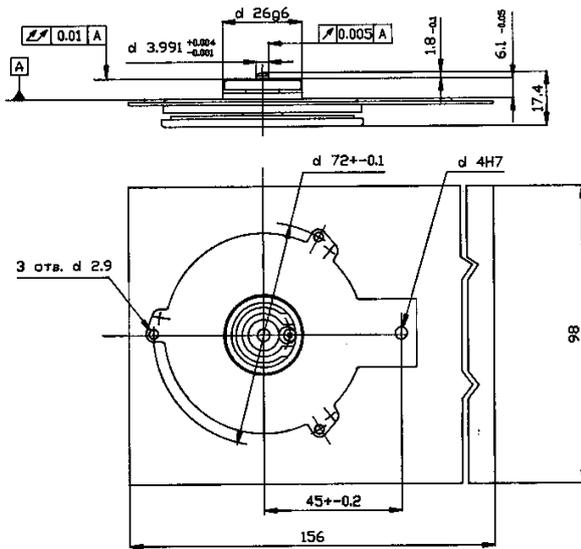


$$M_H = 2,4 \frac{Hm}{мин}, n_H = 300 \frac{об}{мин}, U_H = 18 B$$

б)

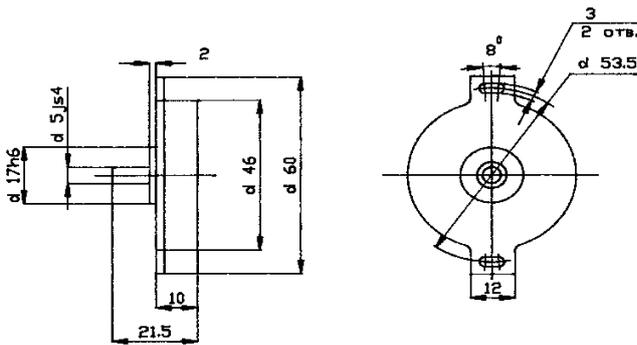
$$M_H = 2,5 \frac{Hm}{мин}, n_H = 150 \frac{об}{мин}, U_H = 8 B$$

в)



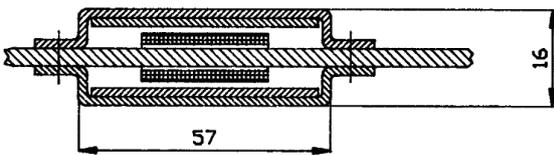
$$M_H = 80 \text{ Гсм}, n_H = 300 \frac{\text{об}}{\text{мин}}, U_H = 12 \text{ В}$$

г)

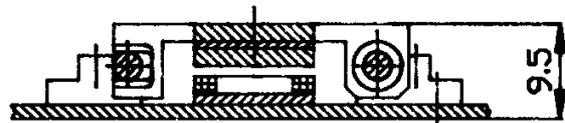


$$M_{\max} = 200 \text{ А} \cdot \tilde{n} \tilde{i}, \text{ } \phi \tilde{a} \tilde{a} = 1,8^\circ, \text{ } \tilde{i} \tilde{\delta} \tilde{a} \tilde{i} \tilde{\epsilon} \tilde{n} \tilde{\delta} \tilde{i} \tilde{n} \tilde{\delta} \tilde{i} = 700 \frac{\phi \tilde{a} \tilde{a}}{\tilde{n}}$$

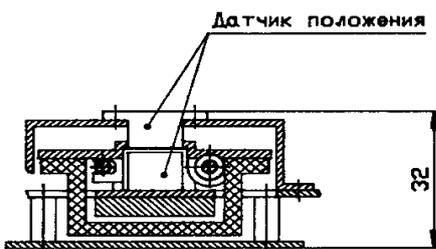
д)



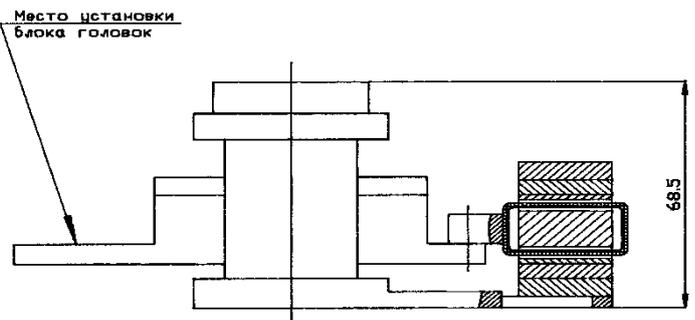
е)



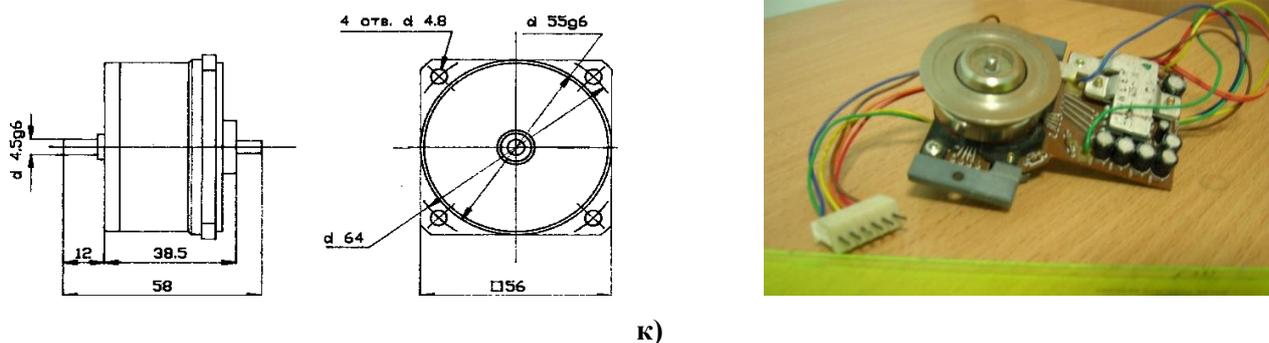
ж)



з)



и)



**Рис. 5.** Быстродействующие исполнительные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов.

**Fig. 5.** Fast-acting executive motors with excitation from permanent magnets.

Применение машин постоянного тока предпочтительно в связи с линейностью механической характеристики. Быстродействие машин постоянного тока характеризуется номинальным ускорением:

$$E_H = \frac{M_H}{J}; \quad (1)$$

или электромеханической постоянной

$$T_M = \frac{J_x \cdot R}{K_e^2}, \quad (2)$$

где  $J_x$  – момент инерции якоря;

$R$  – сопротивление якоря;

$$K_e = \frac{P \cdot N}{2\pi \cdot a} \cdot \Phi_o - \text{коэффициент Э.Д.С.},$$

где  $P$  – число пар полюсов;

$N$  – число проводников обмотки;

$a$  – число пар параллельных ветвей обмотки;

$\Phi_o$  – полезный магнитный поток.

Очевидно, что для повышения быстродействия, в частности, номинального ускорения –  $E_H$ , необходимо увеличение номинального момента –  $M_H$  и снижение момента инерции якоря –  $J$ . Номинальный момент определяется произведением объема якоря на удельные электромагнитные нагрузки:

$$M_H = 0,5 \cdot \alpha_i \cdot (A \cdot B_o) \cdot \pi \cdot D_a^2 \cdot l_a, \quad (3)$$

где  $A = \frac{I_H \cdot N}{2a \cdot \pi \cdot D_a}$  – линейная нагрузка (А/м); (4)

$B_\delta$  – индукция в рабочем зазоре (Тл);

$(\pi \cdot D_a^2 \cdot l_a)$  – объем якоря,

где  $D_a$  – диаметр якоря;

$l_a$  – активная длина якоря.

$$A = \frac{j \cdot 2a \cdot q_M \cdot N}{\pi \cdot D_a} \text{ – линейная нагрузка,} \quad (5)$$

где  $j$  – плотность тока в обмотке (А/мм<sup>2</sup>);

$q_M$  – сечение провода (мм<sup>2</sup>);

$$I_H = j \cdot 2a \cdot q_M \text{ – номинальный ток в обмотке.} \quad (6)$$

Произведение  $(A \cdot j)$  – обуславливает удельный тепловой поток и нагрев машины.

Момент инерции якоря:

$$J = \frac{\gamma \cdot \pi \cdot D_a^4 \cdot l_a}{32}, \quad (7)$$

где  $\gamma$  – удельный вес якоря, зависящий от удельных весов обмотки и ярма якоря.

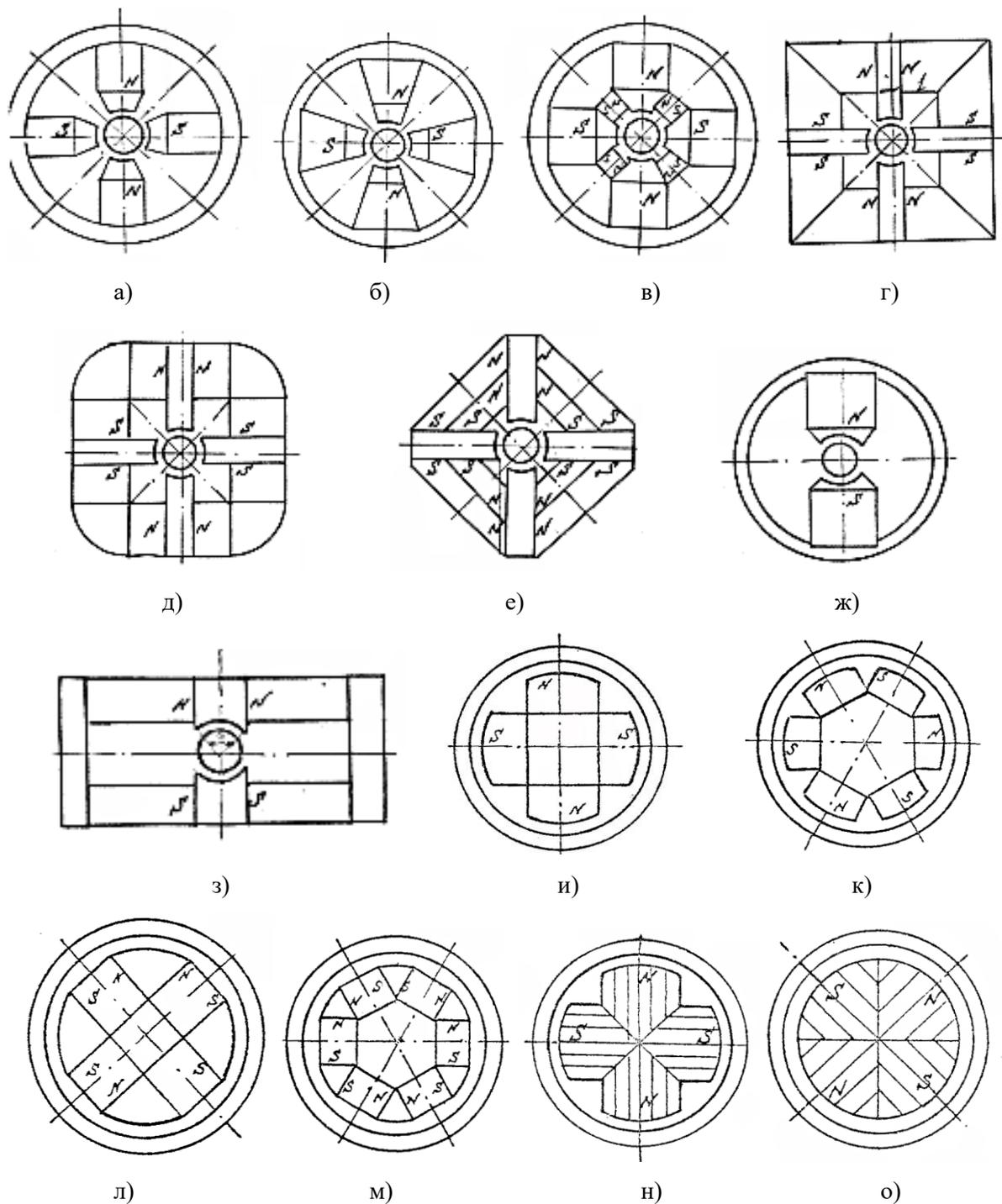
Равные моменты могут быть получены в машинах с большим и меньшим отношением активной длины якоря к его диаметру –  $\frac{l_a}{D_a}$ , но момент инерции «удлиненного» якоря будет

значительно меньше, поэтому номинальное ускорение  $E_H = \frac{M}{J} = \frac{1}{D_a^2}$  будет значительно выше.

Технологически сложно изготовить якорь с отношением  $\lambda = \frac{l_a}{D_a} > 4$ . Уменьшение момента инерции якоря возможно за счет применения алюминиевого провода, удельный вес которого в 3 раза меньше, чем медного.

В целом, высокое быстродействие может быть получено в машинах с высокими удельными электромагнитными нагрузками  $(A \cdot B_\delta)$  и малым моментом инерции якоря. Увеличение линейной нагрузки  $A$  возможно за счет, в частности, продува машины воздухом, для этого исследовались варианты продува: аксиальный и радиальный.

Уровень индукции оценивается по сравнению магнитных систем различных конструкций (рис. ба, б, в, г, д, е, ж, з) с использованием магнитов с высокой удельной энергией – NdFeB, SmCo<sub>5</sub>, ЮНДК35Т5БА, причем в некоторых конструкциях (рис. бе, о) требуется комбинация этих магнитов.



**Рис. 6.** Магнитные системы быстродействующих исполнительных двигателей.

**Fig. 6.** Magnetic systems of high-speed executive motors.

Исследование магнитных систем различных конструкций, вариантов продува воздухом, решение технологических задач и вопросов оптимального проектирования, позволило разработать и изготовить машины с номинальным ускорением  $E_H = (30 \div 100) \cdot 10^3 \text{ рад/с}^2$ . Нижний предел – для малоинерционных машин с гладким якорем. Верхний предел – для машин с полым якорем, которые при равных моментах имеют значительно меньший момент инерции якоря.

При разработке исполнительных двигателей для промышленных роботов помимо высоких динамических характеристик необходимо учесть требование по минимально возможной массе и габаритам машин, т.к. в этом случае необходимо быстроедействие всей механической системы, в которой могут использоваться несколько взаимосвязанных машин. В результате выполнения работ по этому направлению были определены как наиболее эффективные машины с полым якорем и магнитными системами, расположенными внутри якоря (рис. би, к, л, м, н, о), что позволяет повысить удельный момент, определяемый отношением момента к массе или габаритам двигателя.

Совершенствование технологии изготовления магнитов типа NdFeB, SmCo<sub>5</sub> позволило разработать помимо электрических машин, ряд исполнительных элементов для систем автоматического регулирования с высокими динамическими параметрами при минимизации их габаритов и массы.

Постоянные магниты широко используются в системах возбуждения синхронных генераторов ветроустановок небольшой мощности. В Институте возобновляемой энергетики разработаны и изготовлены генераторы мощностью от 200 Вт до 20 кВт с возбуждением от постоянных магнитов NdFeB, которые приведены на рис. 7, где:

- а) мощностью 200 Вт, частота вращения 300 об/мин, безредукторный [10];
- б) мощностью 2 кВт, частота вращения 1000 об/мин, с мультипликатором [11];
- в) генератор двойного вращения модульной конструкции из 3<sup>х</sup> генераторов в одном корпусе, мощностью 3700 Вт [12];
- г) мощностью 5,5 кВт, частота вращения 750 об/мин, с мультипликатором [13];
- д) генератор модульной конструкции, мощностью 20 кВт, частота вращения 100 об/мин, безредукторный, бескорпусный [14].



а)



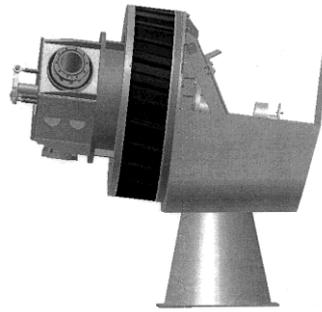
б)



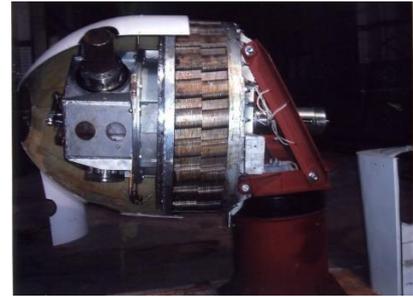
в)



г)



д)



е)

**Рис. 7.** Синхронные генераторы с постоянными магнитами, разработанные и изготовленные в Институте возобновляемой энергетики НАН Украины.

**Fig. 7.** Synchronous generators with permanent magnets designed and manufactured at the Institute of Renewable Energy, NAS of Ukraine.

Наметилась тенденция по использованию магнитов в машинах большой мощности, для этого проведены расчеты ряда машин мощностью до 2 МВт. Применение магнитов позволяет повысить К.П.Д., уменьшить влияние реакции якоря на выходные параметры генератора.

Исполнительные двигатели, приведенные на рис. 5, были спроектированы, изготовлены и применены в различных системах автоматического регулирования, в том числе в периферийных устройствах ЭВМ.

На основе исследований магнитных систем [6, 7, 8, 15, 16] разных конструкций (рис. ба, б, в, г, д, е, ж, з) разработан двигатель с полым ротором, имеющий номинальное ускорение  $E_H = 100000 \text{ рад/с}^2$ .

Результаты исследования магнитных систем (рис. би, к, л, м, н, о) использованы при разработке двигателей для промышленных роботов (рис. 5в) и бесконтактных двигателей постоянного тока (рис. 5г, к).

Спроектированы и изготовлены экспериментальные образцы линейных, шаговых двигателей (рис. 5д, е, ж, з, и).

Спроектированы и изготовлены генераторы различных конструкций для ветроустановок (рис. 7).

В процессе выполнения данных работ разрабатывались методики проектирования; решались вопросы оптимального проектирования устройств и др.

### **3. Применение постоянных магнитов для сепарации различных материалов и в других устройствах**

Магниты применяются более чем в 30 отраслях промышленности. В табл. 1 приведены отрасли промышленности где используются магнитные сепараторы.

Таблица 1. Области применения магнитных сепараторов

Table 1. The use of magnetic separators in industry

Отрасль	Барабанные	Шкивные	Стержневые	Пластинчатые	Роликовые	Вихрековые	Колончатые	Фильтры магнитные
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Мукомольная	X	X	X	X			X	
Хлебопекарская	X	X	X	X			X	
Крохмало-патоковая			X				X	
Комбикормовая	X			X			X	
Крупяная			X	X				
Макаронная			X	X			X	
Сахарная	X	X	X	X				
Кондитерская	X		X	X			X	
Масложировая	X	X	X	X			X	
Мясная	X			X				
Спиртовая				X			X	
Ликеро-водочная							X	
Пивоваренная		X	X	X			X	
Чайная	X		X				X	
Соляная	X		X		X			
Табачная	X		X	X				
Стройматериалов	X	X	X	X	X			
Цементная		X	X	X				
Стекольная	X	X	X	X	X	X		
Фарфоро-фаянсовая	X	X	X	X				
Древообрабатывающая	X	X		X				
Целлюлозно-бумажная				X				
Торфяная		X		X				
Резино-техническая	X	X	X					
Горнообогатительная	X	X	X	X	X			X
Черная металлургия	X	X		X				
Цветная металлургия	X	X			X	X		
Переработка отходов:								
твердых быт. отходов	X	X		X		X		
изношенных шин	X	X		X				
электронных плат	X					X		
стеклобоя	X	X		X		X		

Для этого разрабатываются и уже разработаны различные конструкции сепараторов и ряд других изделий с постоянными магнитами, которые показаны на рис. 8, где:

- магнитные барабаны (рис. 8а, б);
- магнитные колонки (рис. 8в);
- магнитные плиты с ручной очисткой (рис. 8г, д, е, ж);
- магнитные плиты с автоматической очисткой (рис. 8ж, з, и);
- магнитные решетки (рис. 8к, л, м, н, и);
- подъемные устройства (рис. 8о, п);

– магнитные системы для ремонта нефтяных и газовых скважин (рис. 8р).



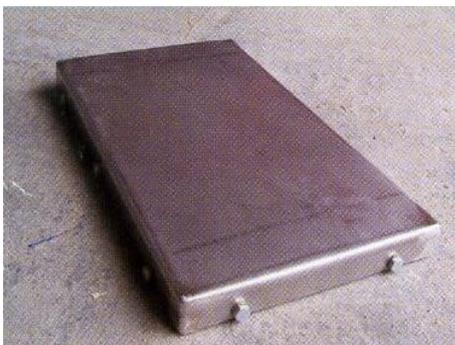
а)



б)



в)



г)



д)



е)



ж)



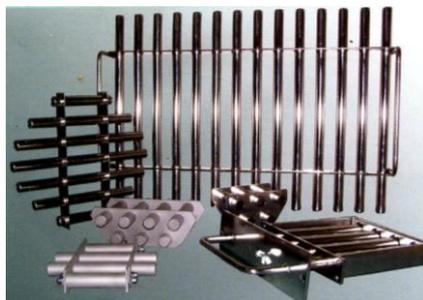
з)



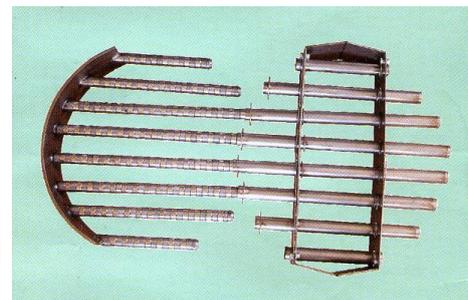
и)



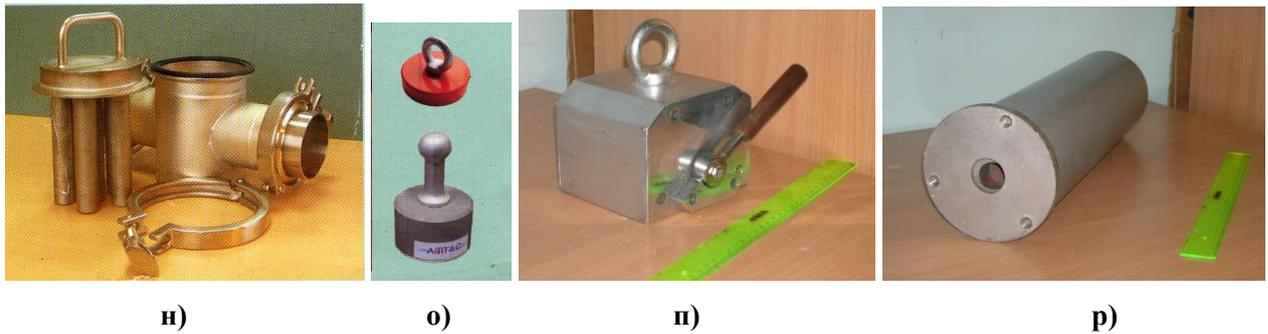
к)



л)



м)



**Рис. 8.** Примеры готовых изделий с постоянными магнитами.

**Fig. 8.** Examples of finished products with permanent magnets.

Перечисленные устройства конструктивно просты, но при их проектировании необходимо учесть следующие требования: насыпную плотность сепарируемого продукта; крупность частиц и их форму; вес и количество ферромагнитных включений в соотношении к сепарируемому продукту; рабочую температуру материала; влажность; наличие агрессивных веществ; место установки и размеры изделия; скорость перемещения; высоту насыпного слоя; желаемую магнитную индукцию; производительность; вес поднимаемого материала и состояние поверхности (для подъемных устройств, (рис. 8о, п); ферромагнитные включения или цветные металлы и т.д.

В процессе перемещения в магнитном поле сепарируемая частица испытывает действие нескольких сил (рис. 2). Сила магнитного тяжения пропорциональна квадрату индукции, площади

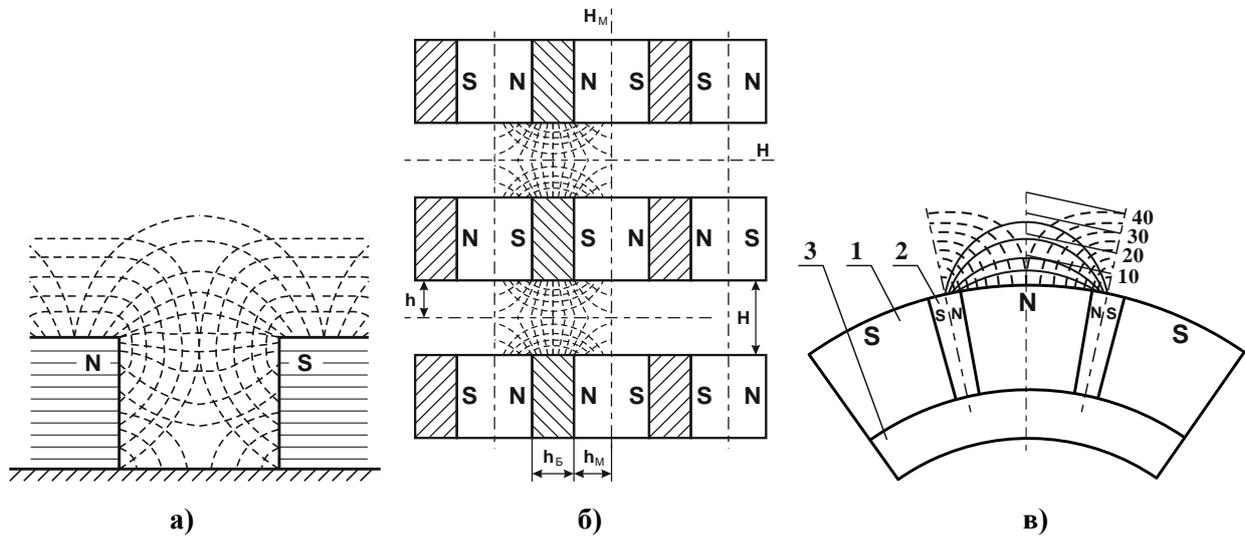
частицы и зависит от магнитной проницаемости среды 
$$\left( F = \frac{B^2 \cdot S}{2 \cdot \mu_0} \right).$$

Все устройства характеризуются трехмерными магнитными полями, поэтому для получения зависимости распределения индукции по толщине сепарируемого слоя или по глубине области, в которой перемещается частица  $B_s = f(h)$  требуется расчет полей, причем с учетом насыщения участков магнитной цепи устройства. Расчеты проводились по картинам полей, полученным на основе физического моделирования с использованием реальных граничных условий.

Наиболее сложной и практически невозможной для решения расчетным путем, является задача по определению силы сопротивления, действующей на частицу в процессе ее перемещения в сепарируемом слое или объеме, т.к. она определяется многими факторами самой среды. Помимо этого, процесс сепарации зависит от скорости и времени перемещения частицы в магнитном поле, которые зависят от заданной производительности устройства, поэтому в итоге работоспособность каждого устройства определяется результатами сепарации в конкретных условиях в соответствии с требованиями технического задания.

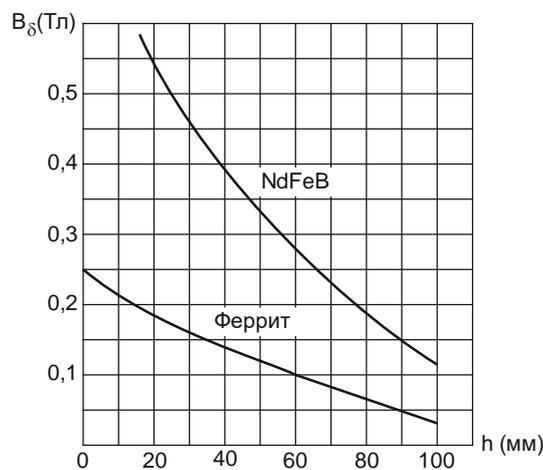
При сепарации сыпучих материалов часто применяются магнитные решетки (рис. 8к, л, м, н), магнитные плиты (рис. 8г, д, е, ж, з, и), магнитные барабаны (рис. 8а, б). В качестве примера на рис. 9а, б, в показаны картины полей в этих устройствах и характеристика изменения индукции по мере

удаления от поверхности магнитной системы  $B_{\delta} = f(h)$  (рис. 10). Исследование полей в этих устройствах позволяет определить их оптимальные геометрические соотношения в зависимости от глубины сепарируемого слоя (магнитные плиты, барабаны) или от заданной производительности и размеров частиц (магнитные решетки).



**Рис. 9.** Картины магнитных полей: а) – магнитная плита; б) – магнитная решетка; в) – магнитный барабан.

**Fig. 9.** Magnetic fields: a) – magnetic plate; б) – magnetic grating; c) – magnetic drum.



**Рис. 10.** Изменение индукции по толщине сепарируемого слоя в магнитной плите.

**Fig. 10.** Change in magnetic induction through the separating layer in a magnetic plate.

Представленные на рис. 8 устройства были изготовлены по техническим заданиям и результаты эксплуатации подтвердили их работоспособность. Накопленный в указанных областях опыт, позволяет оперативно решать задачи по расчету магнитных полей и проектированию изделий с постоянными магнитами.

## **Выводы.**

1. Показаны некоторые области применения постоянных магнитов в горнодобывающей, электротехнической и других отраслях.

2. Обозначена актуальность работ по обогащению слабомагнитных руд, в частности: в Криворожском железорудном бассейне (окисленные железосодержащие); Житомирской области (ильменитовые руды для производства титана); г. Марганец (марганцевые руды). Цель работы по этому направлению – разработка магнитных сепараторов для обогащения слабомагнитных руд. Для решения поставленной задачи были выполнены следующие работы:

– исследовалось магнитное поле в серийном барабанном сепараторе и была определена возможность повышения его уровня благодаря применению магнитного «подпора»;

– разработан магнитный блок для системы серийного барабанного сепаратора, который позволяет вдвое уменьшить расход дорогостоящих магнитов NdFeB и иметь высокие магнитные параметры;

– определена целесообразность конструкции магнитной системы барабанного сепаратора, в которой чередование полярности магнитных блоков – вдоль оси системы;

– по результатам исследования магнитного поля при изменении геометрических соотношений магнитной системы и полученной зависимости изменения индукции по толщине сепарируемого слоя обоснована целесообразность перехода к конструкции валкового сепаратора;

– определены оптимальные геометрические соотношения валка на основе оценки результатов сепарации слабомагнитных руд на разных скоростях вращения валка.

3. Показано применение постоянных магнитов в электротехнической промышленности, в частности, в быстродействующих исполнительных двигателях, для систем автоматического регулирования:

– приведено сравнение машин различных конструкций по быстродействию, для этого исследовались магнитные системы, решались вопросы оптимального проектирования;

– исследовались магнитные системы электрических машин для промышленных роботов;

– исследовались магнитные системы ветрогенераторов различных конструкций с применением магнитов NdFeB, решались вопросы их оптимального проектирования, в результате – изготовлены генераторы мощностью от 200 Вт до 20 кВт.

4. Показано применение постоянных магнитов в устройствах, используемых более чем в 30 отраслях для сепарации различных продуктов и материалов. Отмечено, что одной из основных задач является исследование трехмерных магнитных полей с целью получения зависимости глубины проникновения поля в сепарируемый слой или область сепарации.

1. Вилкул Ю.Г., Азарян А.А., Азарян В.А., Трачук А.А. Проблемы переработки минерального сырья техногенных месторождений Украины // Горная промышленность, специальный выпуск. – М. : 2011. – С. 13 –

15.

2. Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф., Ларионов А.Н. Электрические машины с постоянными магнитами: –М. : Энергия, 1964. – 208 с.
3. Арнольд Р.Р. Расчет и проектирование магнитных систем с постоянными магнитами. – М. : Энергия, 1969. – 260 с.
4. Буль Б.К. Основы теории и расчета магнитных цепей. – М. : Энергия, 1964. – 154 с.
5. Пятин Ю.М. Постоянные магниты, справочник. – М.: Энергия, 1980. – 306 с.
6. Перминов Ю.Н., Рубан Н.С., Рыбка Я.В. Исследование и определение оптимальной геометрии магнитных систем с радиальным расположением полюсов трапецеидальной формы // Сб. статей: Электромашинные средства автоматики, К. : Ин-т автоматики, 1975 г.
7. Васильев Ю.К., Перминов Ю.Н., Рубан Н.С. Выбор магнитных систем для быстродействующих исполнительных двигателей постоянного тока // Сб. статей: Электромашинные средства автоматики, К. : Ин-т автоматики, 1975 г.
8. Перминов Ю.Н., Рубан Н.С., Федотов В.П. Двигатели привода накопителя на магнитной ленте. // Сб. статей: Радиоэлектроника и вычислительная техника, К. : Ин-т автоматики, 1980 г.
9. Перминов Ю.Н., Коханевич В.П., Монахов Е.А., Попков В.С. Разработка методики расчета теплогенератора с постоянными магнитами // Відновлювальна енергетика: – К. : Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2017. – № 1. С. 56 – 61.
10. А.с. 26359 Україна, МПК H02K 21/00. Електричний генератор торцевого виконання / Н.В. Мхітарян, С.О. Кудря, Ю.М. та ін. (Україна). – № у 200706958; заявл. 20.06.07; опубл. 10.09.07, Бюл. № 4.
11. А.с. 21199 Україна, МПК H02K 21/00, H02K 16/00. Торцевий електрогенератор / Ю.М. Перминов, М.С. Ходоррівський, Ю.В. Шевченко (Україна). – № у 200604349; заявл. 18.04.06; опубл. 15.03.07, Бюл. № 3.
12. А.с. 59090 А Україна, МПК F03D 1/02. Вітроелектричний агрегат / В.І. Прібишин, А.В. Шатайло, Ю.М. Перминов та ін. (Україна). – № 2003010283; заявл. 13.01.03; опубл. 15.08.03, Бюл. № 8.
13. А.с. 38530 Україна, МПК H02K 21/00. Вітрогенератор з зубцевим статором / Ю.М. Перминов, В.П. Коханевич, М.О. Шихайлов (Україна). – № у 200809958; заявл. 31.07.08; опубл. 12.01.09, Бюл. № 1.
14. А.с. 106673 Україна, МПК H02K 16/00, H02K 21/22. Вітроелектрична установка модульної конструкції / С.О. Кудря, Ю.М. Перминов, В.П. Коханевич (Україна). – № а 201301473; заявл. 07.02.13; опубл. 25.09.14, Бюл. № 9.
15. Кудря С.А., Перминов Ю.Н., Будьонний В.Ф. Дослідження магнітних систем збудження синхронних вітрогенераторів. // Відновлювальна енергетика: – К. : Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2007. – № 2. С. 55 – 59.
16. Кудря С.А., Перминов Ю.Н., Буденний В.Ф. О методах расчета магнитных систем с постоянными магнитами. // Відновлювальна енергетика: – К. : Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2009. – № 4. С. 40 – 43.

## References

1. *Vilkul Yu.G., Azaryan A.A., Azaryan V.A., Trachuk A.A.* (2011) Problemyi pererabotki mineralnogo syryya tehnogennyih mestorozhdeniy Ukrainyi [Problems of mineral raw materials processing from technogenic deposits of Ukraine]. Moskov, Russia: Gornaya promyshlennost [in Rus].

2. *Balagurov V.A., Galteev F.F., Larionov A.N.* (1964) Elektricheskie mashiny s postoyannyimi magnitami. [Electric machines with permanent magnets]. Moskov, Russia: Energiya [in Rus].

3. *Arnold R.R.* (1969) Raschet i proektirovanie magnitnyih sistem s postoyannyimi magnitami . [Calculation and design of magnetic systems with permanent magnets]. Moskov, Russia: Energiya[in Rus].

4. *Bul B.K.* (1964) Osnovyi teorii i rascheta magnitnyih tsepey. [Fundamentals of the magnetic circuits theory and calculation]. Moskov, Russia: Energiya [in Rus].

5. *Pyatin Yu.M.* (1980) Postoyannyye magnityi, spravochnik. [Permanent magnets, reference book]. Moskov, Russia: Energiya [in Rus].

6. *Perminov Yu.N., Ruban N.S., Ryibka Ya.V.* (1975) Issledovanie i opredelenie optimalnoy geometrii magnitnyih sistem s radialnyim raspolozheniem polyusov trapetseidальной formy. [Investigation and determination optimal geometry of the magnetic systems with a radial arrangement of trapezoidal poles]. Kiev, Ukraine: *Electromachine Automation* [in Rus.].

7. *Vasilev Yu.K., Perminov Yu.N., Ruban N.S.* (1975) Vyibor magnitnyih sistem dlya byistrodeystvuyuschih ispolnitelnyih dvigateley postoyannogo toka. [The choice of magnetic systems for high-speed DC motors]. Kiev, Ukraine: *Electromachine Automation* [in Rus.].

8. *Perminov Yu.N., Ruban N.S., Fedotov V.P.* (1980) Dvigateli privoda nakopatelya na magnitnoy lente. [Drive motors for magnetic tape drives]. Kiev, Ukraine: *Electromachine Automation* [in Rus.].

9. *Perminov Yu.N., Kohanevich V.P., Monahov E.A., Popkov V.S.* (2017) Razrabotka metodiki raschete teplogeneratora s postoyannyimi magnitami. [Calculating method for a heat generator with permanent magnets]. *Vidnovluyana energetika [Renewable energy], 1* [in Rus.].

10. *A.S. 26359 Ukraine, IPC H02K 21/00.* Electrical generator of the end implementation / N.V. Mkhitaryan, S.O. Kudrya, Yu.M. Perminov etc. (Ukraine). – № u 200706958; stated. 20.06.07; published 10.09.07, Bul. № 4.

11. *A.S. 21199 Ukraine, IPC H02K 21/00, H02K 16/00.* Front electrogenerator / Yu.M. Perminov, M.S. Khodorovsky, Yu.V. Shevchenko (Ukraine). – № 200604349; stated. 18.04.06; published 15.03.07, Bul. № 3.

12. *A.S. 59090 Ukraine, IPC F03D 1/02.* Wind power unit / V.I. Pribyshyn, A.V. Shataylo, Yu.M. Perminov etc. (Ukraine). – № 2003010283; stated. 13.01.03; published 15.08.03, Bul. № 8.

13. *A.S. 38530 Ukraine, IPC H02K 21/00.* Wind-powered generator with toothed stator / Yu.M. Perminov V.P. Kohanevich, M.O. Shikhailov (Ukraine). – № u 200809958; stated. 31.07.08; published 12.01.09, Bul. № 1.

14. *A.S. 106673 Ukraine, IPC H02K 16/00, H02K 21/22.* A modular design wind-driven power plant / S.O. Kudrya, Yu.M. Perminov V.P. Kohanevich (Ukraine). – № 201301473; stated. 07.02.13; published 25.09.14, Bul. № 9.

15. *Kudrya S.A., Perminov Yu.N. Budionnyi V. F.* (2007) Doslidzhennya magnitnih sistem zbudzhennya sinhronnih vltrogeneratoriv. [Magnetic excitation systems of synchronous wind turbines]. *Vidnovluyana energetika [Renewable energy], 2* [in Ukr.].

11. *Kudrya S.A., Perminov Yu.N. Budionnyi V. F.* (2009) O metodah rascheta magnitnyih sistem s postoyannyimi magnitami. [Methods of calculating magnetic systems with permanent magnets]. *Vidnovluyana energetika [Renewable energy], 4* [in Rus.].

## Synopses

Permanent magnets are environmentally friendly, «cold», energy sources with ability to maintain magnetization for a long time. They are often exceeding the electromagnetic energy sources by the magnetic field level, what causes their wide range of applications.

The article contains an overview of the possibilities, practical experience and prospects for the use of permanent magnets in industry, with the focus on their use for enrichment of magnetite and weakly magnetic ores, oxidized iron-containing, ilmenite manganese, etc., as well as usage in the electrical industry, in particular, in electric machines and devices for the separation of various products.

The urgency of the weakly magnetic ores enrichment and processing of wastes of ore-dressing combines is marked. On the example of the situation in Ukraine, it is shown that in dumps of rocks that do not have industrial value under the traditional approach to processing, indicators that meet the requirements of metallurgical enterprises can be achieved by using magnetic enrichment technology. To solve such problems, the following works were performed:

- the magnetic field in a serial drum separator was investigated and the possibility of increasing its level by using a magnetic "backing";
- the magnetic block for the serial drum separator system is developed, which allows to reduce the consumption of expensive NdFeB magnets by two times with the maintaining of the high magnetic parameters;
- the expediency of the magnetic system design of the drum separator in which the alternation of the polarity of the magnetic blocks occurs along the axis of the system was proved;
- based on the results of the of the magnetic field investigation with a change in the magnetic system geometric parameters and the dependence of the induction on the separating layer, the expediency of the roller separator is shown;
- the separator's roll optimum geometrical ratios are determined (on the basis of the results of weakly magnetic ores separation in a different roll rotational speeds).

The use of permanent magnets in the electrical industry is shown, in particular, in high-speed executive engines, for automatic control systems. Comparison of machines with various designs on the basis of magnetic systems research and taking into account the optimal design was performed.

The use of permanent magnets in devices used for more than 30 industries is shown. It is established that one of the key tasks in the use of permanent magnets in separating devices is the investigation of three-dimensional magnetic fields to obtain a dependence of the field penetration depth into the separating layer or separation region.

## Реферат

Постоянные магниты являются экологически чистыми, «холодными», источниками энергии и способны сохранять состояние намагниченности в течение длительного времени. По уровню магнитного поля они не уступают, а часто и превосходят электромагнитные источники энергии, что

обуславливает их необычайно широкий спектр применения.

Статья содержит обзор возможностей, практический опыт и перспективы применения постоянных магнитов в промышленности, при этом особое внимание уделено их использованию при обогащении магнетитовых и слабомагнитных руд, окисленных железосодержащих, ильменитовых марганцевых и т.д., а также использованию в электротехнической промышленности, в частности, в электрических машинах и устройствах для сепарации различных продуктов.

Отмечена актуальность задач по обогащению слабомагнитных руд и переработке отходов горно-обогатительных комбинатов. На примере ситуации в Украине показано, что в отвалах горных пород, не имеющих промышленной ценности при традиционном подходе к переработке, в результате магнитного обогащения могут быть достигнуты показатели, соответствующие требованиям металлургических предприятий. Для решения поставленной задачи были выполнены следующие работы:

- исследовалось магнитное поле в серийном барабанном сепараторе и была определена возможность повышения его уровня благодаря применению магнитного «подпора»;
- разработан магнитный блок для системы серийного барабанного сепаратора, который позволяет вдвое уменьшить расход дорогостоящих магнитов NdFeB и иметь высокие магнитные параметры;
- определена целесообразность конструкции магнитной системы барабанного сепаратора, в которой чередование полярности магнитных блоков – вдоль оси системы;
- по результатам исследования магнитного поля при изменении геометрических соотношений магнитной системы и полученной зависимости изменения индукции по толщине сепарируемого слоя обоснована целесообразность перехода к конструкции валкового сепаратора;
- определены оптимальные геометрические соотношения вала на основе оценки результатов сепарации слабомагнитных руд на разных скоростях вращения вала.

Освещены вопросы применения постоянных магнитов в электротехнической промышленности, в частности, в быстродействующих исполнительных двигателях, для систем автоматического регулирования. Приведено сравнение машин различных конструкций, в т.ч. по быстродействию, выполненное на основании исследований магнитных систем и с учетом вопросов оптимального проектирования.

Показано применение постоянных магнитов в устройствах, используемых более, чем в 30 отраслях для сепарации различных продуктов и материалов. Установлено, что одной из ключевых задач при использовании постоянных магнитов в устройствах для сепарации, является исследование трехмерных магнитных полей с целью получения зависимости глубины проникновения поля в сепарируемый слой или область сепарации.