

Издается с ноября 2013 года
Выходит один раз в квартал

№ 3 (32)
Сентябрь 2021

ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

**УЧРЕДИТЕЛЬ – САРАТОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ГАГАРИНА Ю.А.**

Журнал включён в перечень ведущих рецензируемых научных журналов,
рекомендованных для публикаций Высшей аттестационной комиссией
Минобрнауки России

Главный редактор	КАЛГАНОВА СВЕТЛАНА ГЕННАДЬЕВНА д.т.н., доцент, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
Зам. главного редактора	БЕКРЕНЕВ НИКОЛАЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
Научный редактор	АРТЮХОВ ИВАН ИВАНОВИЧ д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
Ответственный секретарь	ЮДИНА ВИОЛЕТТА ОЛЕГОВНА ассистент, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

Редакционная коллегия

В.В. ВАХНИНА	д.т.н., профессор, Тольяттинский государственный университет, Тольятти
Ю.В. ГУЛЯЕВ	д.ф.-м.н., профессор, академик РАН, ИРЭ имени В.А. Котельникова РАН, Москва
В.Б. ДЕМИДОВИЧ	д.т.н., профессор, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург
Л.С. ЗИМИН	д.т.н., профессор, СамГТУ, Самара
А.А. ЗАХАРОВ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
Ю.Б. КАЗАКОВ	д.т.н., профессор, ИГЭУ, Иваново
А.Н. МАКАРОВ	д.т.н., профессор, ТвГТУ, Тверь
Г.А. МОРОЗОВ	д.т.н., профессор, КНИТУ-КАИ имени А.Н. Туполева, Казань
Ю.П. ПЕРЕЛЫГИН	д.т.н., профессор, ПГУ, Пенза
А.Ф. РЕЗЧИКОВ	д.т.н., профессор, член-корреспондент РАН, ИПТМУ РАН, Саратов
И.В. РОДИОНОВ	д.т.н., доцент, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
Ф.Н. САРАПУЛОВ	д.т.н., профессор, УрФУ, Екатеринбург
Ю.Б. ТОМАШЕВСКИЙ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
А.А. ФОМИН	д.т.н., СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
В.Н. ХМЕЛЕВ	д.т.н., профессор, БТИ, Бийск
В.А. ЦАРЕВ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

Since November 2013
Published Quarterly

№ 3 (32)
September 2021

JOURNAL OF ELECTROTECHNICS

Scientific and Technical Publication

The journal is founded by Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

The journal is included in the List peer-reviewed scientific publications, recommended for publication by the Higher Attestation Commission of the Ministry of education and science Russia

Editor-in-Chief	KALGANOVA SVETLANA GENNADIEVNA Dr.Sc., Associate Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
Assistant to the Editor-in-Chief	BEKRENEV NIKOLAY VALERIEVICH Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
Scientific editor	ARTYUKHOV IVAN IVANOVICH Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
Chief Executive Officer	YUDINA VIOLETTA OLEGOVNA Assistant, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

Editorial Board Members

V.V. VAKHNINA	Dr.Sc., Professor, Togliatti State University, Togliatti
Yu.V. GULYAEV	Dr.Sc., Professor, Academician of RAS, Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Moscow
V.B. DEMIDOVICH	Dr.Sc., Professor, Saint Petersburg State Electrotechnical University «LETI», St. Petersburg
L.S. ZIMIN	Dr.Sc., Professor, Samara State Technical University, Samara
A.A. ZAKHAROV	Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
Yu.B. KAZAKOV	Dr. Sc., Professor, Ivanovo State Power University, Ivanovo
A.N. MAKAROV	Dr.Sc., Professor, Tver State Technical University, Tver
G.A. MOROZOV	Dr.Sc., Professor, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan
Yu.P. PERELIGIN	Dr.Sc., Professor, Penza State University, Penza
A.F. REZCHIKOV	Dr.Sc., Professor, Corresponding Member of RAS, Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, Saratov
I.V. RODIONOV	Dr.Sc., Associate Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
F.N. SARAPULOV	Dr.Sc., Professor, Ural Federal University, Ekaterinburg
Yu.B. TOMASHEVSKY	Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
A.A. FOMIN	Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
V.N. KHMELEV	Dr.Sc., Professor, Biysk Technological Institute, Biysk
V.A. TSAREV	Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

УДК 621.31.042

УТОЧНЕННЫЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ АНАЛИЗ МАГНИТОЖИДКОСТНЫХ СЕПАРАТОРОВ НЕМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ю.Б. Казаков, Ю.И. Страдомский, В.А. Филиппов, С.А. Нестеров

UPDATED ELECTROMAGNETIC ANALYSIS OF SEPARATORS WITH MAGNETIC FLUIDS FOR NON-MAGNETIC MATERIALS

Yu.B. Kazakov, Yu.I. Stradomsky, V.A. Filippov, S.A. Nesterov

Магнитожидкостная сепарация является перспективным способом разделения смесей немагнитных материалов на фракции по плотности с возможностью электромагнитной регулировки границ сепарации. Точность разделения материалов в электромагнитных магнитожидкостных сепараторах определяется применяемой конструкцией и режимом работы. Электромагнитные процессы в таких сепараторах недостаточно исследованы, особенно при разделении частиц малых размеров, многокомпонентных и многофракционных смесей частиц разнородных материалов. Не в полной мере рассмотрены вопросы влияния формы немагнитных частиц, степени заполнения рабочего зазора сепаратора частицами. В связи с этим является актуальным уточненный электромагнитный анализ электромагнитных магнитожидкостных сепараторов немагнитных материалов с учетом распределения магнитного поля и влияния гидродинамических свойств магнитной жидкости на движение частиц в зоне разделения. Для достижения цели используются численные методы анализа электромагнитных процессов в магнитожидкостных сепараторах. Полученные результаты позволяют разрабатывать усовершенствованные конструкции электромагнитных сепараторов с повышенной точностью сепарации.

Ключевые слова: сепарация немагнитных материалов, магнитная жидкость, электромагнитный магнитожидкостный сепаратор, уточненный электромагнитный анализ

Magnetic fluids separation is a promising method for separating mixtures of non-magnetic materials into density fractions with a possibility for electromagnetic separation control. The accuracy of material separation in electromagnetic magnetic fluid separators is determined by their design and operating mode. Electromagnetic processes in such separators have not been sufficiently studied, especially when separating small particles, multicomponent and multifractional mixtures of particles of dissimilar materials. The issues relating the influence of the shape of non-magnetic particles, the degree of filling the working gap of the separator with particles are not fully considered. In this regard, an updated electromagnetic analysis of electromagnetic magnetic fluid separators of non-magnetic materials, taking into account the distribution of the magnetic field and the influence of hydrodynamic properties of the magnetic fluid on the movement of particles in the separation zone is urgent. To achieve this goal, numerical methods for analyzing electromagnetic processes in magnetic fluids separators are used. The results obtained make it possible to develop improved designs of electromagnetic separators with enhanced separation accuracy.

Keywords: separation of non-magnetic materials, magnetic fluid, electromagnetic magnetic fluid separator, updated electromagnetic analysis

Введение

Развитие производства и потребления товаров приводит к увеличению бытовых и промышленных отходов. Многие современные изделия разрабатываются на срок функционирования, совпадающий со сроком гарантии. Производителям часто выгоднее изготовить новое изделие, чем заниматься переработкой устаревших изделий. В то же время эффективная сортировка отходов и извлечение фракций материалов, пригодных для вторичного использования, снижает загрязнение окружающей среды, сохраняет природные ресурсы [1-3]. Совершенствование технологий утилизации и промышленной переработки отходов - важнейшая эколого-экономическая задача. В РФ принята стратегия по переработке отходов промышленного производства на период до 2030 года [4]. В стратегии развитие научно-исследовательских и опытно-конструкторских инновационных

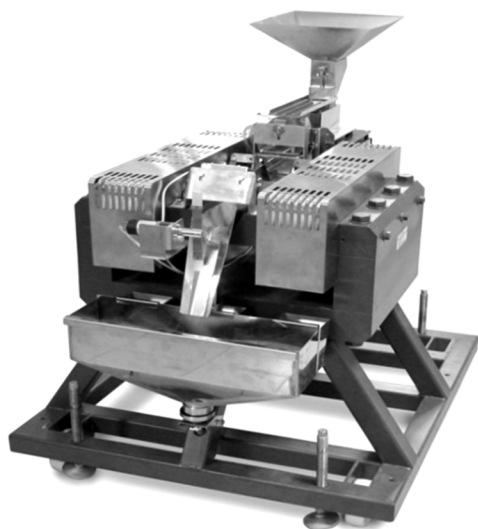


Рис. 1. Электромагнитный магнитожидкостный сепаратор

МЖ в ЭМЖС удерживается между возбужденными полюсами электромагнита в зазоре. МЖ стремиться втянуться в зону максимальной напряженности магнитного поля H_{max} , возникает действующая на нее магнитная сила и т. н. «псевдоутяжеление» МЖ. При увеличении магнитной проницаемости МЖ и градиента напряженности ∇H

технологий утилизации отходов объявлены приоритетным направлением.

Перспективной технологией сортировки твердых немагнитных материалов является их разделение в электромагнитных магнитожидкостных сепараторах (ЭМЖС) [5] (рис. 1). ЭМЖС содержит магнитопровод с обмоткой возбуждения и магнитную жидкость (МЖ) в зазоре электромагнита. МЖ – устойчивый жидкий коллоид в составе жидкости-носителя (вода, масла, фторорганика) и наноразмерных (10-40 нм) ферромагнитных частиц, покрытых поверхностно-активным веществом [2] (рис. 2). Чем выше концентрация магнитных частиц в МЖ, тем сильнее она проявляет магнитные свойства, выше ее магнитная проницаемость $\mu_{ж}$, нелинейнее магнитная характеристика. Применяют МЖ с плотностью $\rho_{ж} = (1,0 \div 1,5) \text{ г/см}^3$, относительной магнитной проницаемостью $1.05 \div 2$, намагниченностью насыщения $M_s = (10 \div 40) \text{ кА/м}$.

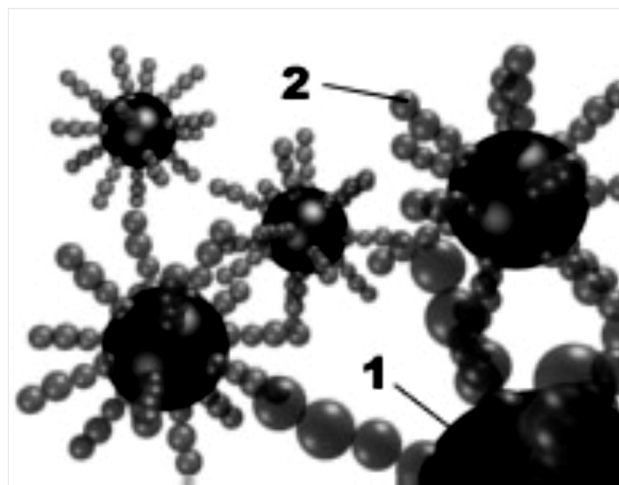


Рис. 2. Магнитная жидкость содержит ферромагнитные частицы (1), покрытые поверхностно-активным веществом (2), в жидкости-носителе

усиливается степень «псевдоутяжеления» МЖ. При погружении в МЖ немагнитной частицы на него будет действовать выталкивающая из МЖ по аналогии с силой Архимеда F_a сила магнитной сепарации F_s . Изменением тока возбуждающей обмотки I_v возможно бесконтактным электромагнитным путем изменять в зазоре H , ∇H , степень

«псевдоутяжеления» МЖ, F_c и, соответственно, порог плотности материалов при регулировке сепарации немагнитных частиц. Управляемые ЭМЖС способны сортировать смеси частиц на фракции при плотностях ρ_q от 1,5 до 20 г/см³ в ЭМЖС. Отличие электропроводящих свойств частиц не влияет на точность их сепарации, нет обязательности к одинаковой крупности частиц.

Опыт исследований и эксплуатации сепараторов показывает, что их целесообразно применять при обогащении природных ископаемых и минерального сырья; для проведения фракционного экспресс-анализа материалов; при выделения свободного золота из шлиховых россыпей и доводки алмазосодержащих руд; при отбраковке изделий по плотности; для сепарации дробленого автомобильного и кабельного лома, лома бытовой техники, электротехнического и электронного оборудования при выделении цветных металлов [6-13]. Это имеет большой экономический эффект, так как стоимость только цветных металлов, содержащихся в 40 млн т ежегодного электронного десятков лома в мире, достигает миллиарда долларов.

Перспективные свойства ЭМЖС вызывают повышенный интерес к ним. Но используемые образцы ЭМЖС не отвечают современным требованиям по функциональности, производительности и точности сепарации. Электромагнитные процессы в ЭМЖС недостаточно исследованы при разделении частиц малых размеров, многокомпонентных и многофракционных смесей частиц разнородных материалов. Не в полной мере рассмотрены вопросы влияния формы немагнитных частиц, степени заполнения рабочего зазора ЭМЖС частицами. В целом недостаточное исследование ЭМЖС технологического назначения сдерживает их практическое применение. В связи с этим уточненный электромагнитный анализ электромагнитных магнитожидкостных сепараторов немагнитных материалов является актуальным.

Моделирование

По схеме работы ЭМЖС [14] (рис. 3) с лотка подается немагнитная частица объемом V_q с начальной скоростью $\bar{v}_0$. Частица попадает в МЖ с вязкостью η (для сепарации обычно используют маловязкие МЖ). В продольном направлении полюсные наконечники электромагнита ЭМЖС длинной активной части полюсов L наклонены под углом α к горизонту, так чтобы легкие частицы скатывались по поверхности МЖ из зоны сепарации.

В МЖ на частицу действуют:

– сила тяжести

$$\bar{F}_T = \rho_q \bar{g} V_q, \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения;

– сила Архимеда

$$\bar{F}_A = \rho_{жс} \bar{g} V_q; \quad (2)$$

– сила вязкостного сопротивления движению частицы диаметром d в МЖ

$$\bar{F}_B = -3\pi\eta d_q \bar{v}; \quad (3)$$

– сила магнитной сепарации

$$\bar{F}_C = -\mu_0 M_s V_q \nabla \bar{H} = -M_s V_q \nabla \bar{B}. \quad (4)$$

Вертикальная удельная сила магнитной сепарации

$$\begin{aligned} \frac{\bar{F}_C}{V_q} &= f_m = g(\rho_q - \rho_{жс}) = \\ &= \mu_0 M_s \frac{\partial H}{\partial y} = M_s \frac{\partial B}{\partial y}. \end{aligned} \quad (5)$$

Немагнитная частица всплывает на поверхность МЖ при выполнении в статике условия

$$\begin{aligned} \bar{F}_C + \bar{F}_A &> \bar{F}_T \\ \text{или } \mu_0 \frac{\partial H}{\partial y} &= \frac{\partial B}{\partial y} > \frac{\rho_q - \rho_{жс}}{M_s}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\partial B/\partial y$ – составляющая градиента магнитной индукции по вертикальной оси.

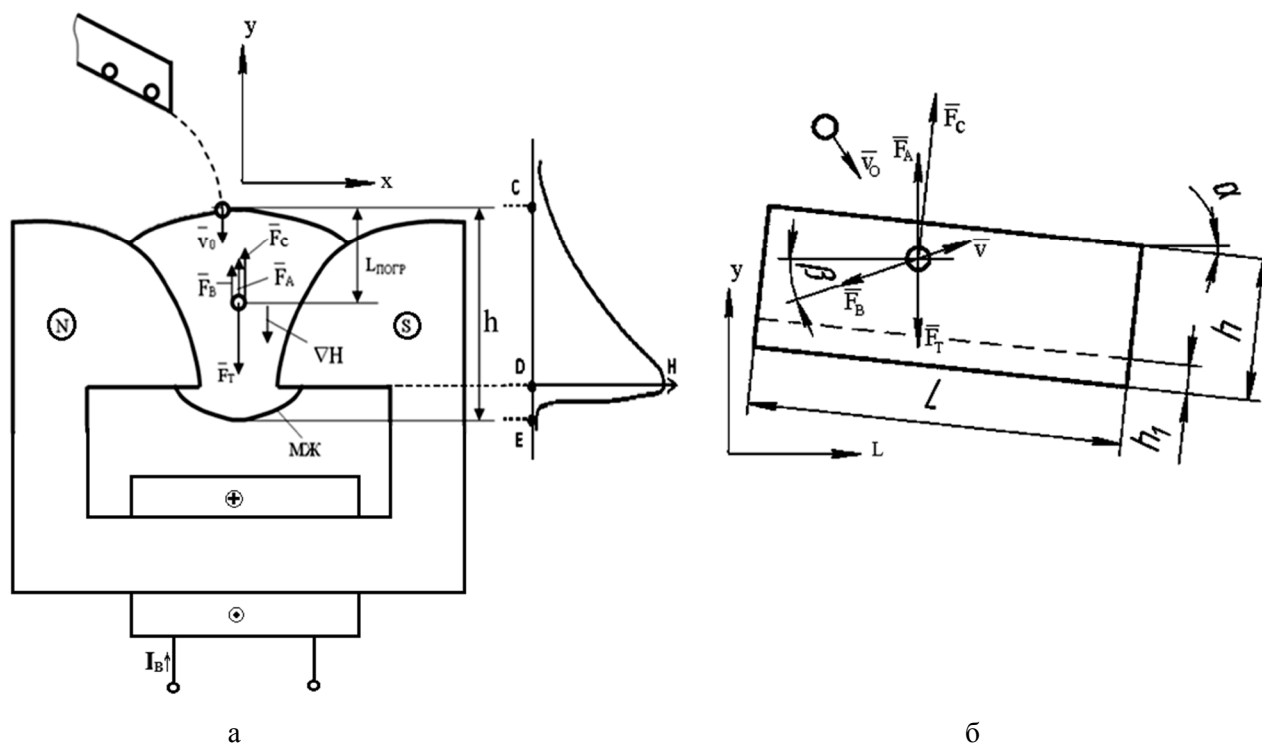


Рис. 3. Схема работы ЭМЖС в поперечном (а) и продольном (б) сечениях

Немагнитная частица выпадает из МЖ при невыполнении условия (6).

Таким образом, при заданных M_s , ρ_c и $\rho_{ж}$ требуемое для сепарации значение $\partial B / \partial y$ определяется величиной $g(\rho_c - \rho_{ж})$.

На линии D в магнитной жидкости высотой столба h (рис. 3 а) $\partial B / \partial y$ меняет знак, поэтому будет меняться направление $\vec{F}_C$. На участке CD $\vec{F}_C$ способствует всплытию немагнитной частицы. На участке DE (высота расположения минимального зазора относительно нижней поверхности МЖ h_1) $\vec{F}_C$ способствует погружению частицы и выпадению ее из МЖ. Направление $\vec{F}_C$ определяется вектором $\nabla \vec{H}$, поэтому $\vec{F}_C$ не всегда направлена по оси y (рис. 3 б).

Магнитная жидкость удерживается в зазоре магнитным полем электромагнита. Высота столба h , удерживаемой МЖ (рис. 3 а), определяется из равенства удельных энергий МЖ в гравитационном и магнитном полях

$$\rho_{ж} g h = \mu_0 \int_0^h M_s dH. \quad (7)$$

Форма поверхности МЖ определяется распределением магнитного поля и поверхностным натяжением жидкости. МЖ располагается по линии равной напряженности магнитного поля. Поэтому рассчитывается магнитное поле, находятся линии равной напряженности в зонах С и Е и по заданному объему МЖ определяется ее положение и форма.

Для точного разделения частиц по плотности должно оставаться $\vec{F}_C = \text{const}$ по высоте столба МЖ на участке CD, т.е. должно сохраняться условие $\nabla \vec{B} = \text{const}$. Это обеспечивается соответствующим выбором минимального зазора и формы поверхностей полюсных наконечников (рис. 4). Минимальная ширина зазора $2x_{no}$ должна превышать максимальный диаметр «тяжелых» немагнитных частиц $d_{ч_{max}}$, которые будут проходить сквозь зону сепарации. Форма поверхностей наконечника рассчитывается для заданной интенсивности поля. Если по условиям сепарации требуется обеспечение максимальной индукции (в минимальном зазоре) в диапазоне $B_{max} x_{no} = (0,7-1,0)$ Тл и минимальной индукции (в максимальном зазоре) – $B_{min} = 0,4$ Тл, то в таких полях МЖ

находится в магнитном насыщении и ее намагниченность составляет $M = M_s$. В предположении горизонтальных линий равной напряженности между точками на поверхности полюсных наконечников с одинаковой вертикальной координатой (рис. 4) зазор x_n на высоте y_n определяется соотношением

$$x_n = x_{no} \frac{1}{1 - \frac{\partial H}{\partial y} \frac{(y_n - y_{no})}{H_{no}}} = x_{no} \frac{1}{1 - \frac{g(\rho_q - \rho_{жс})}{\mu_0 M_s} \frac{(y_n - y_{no})}{H_{no}}} \quad (8)$$

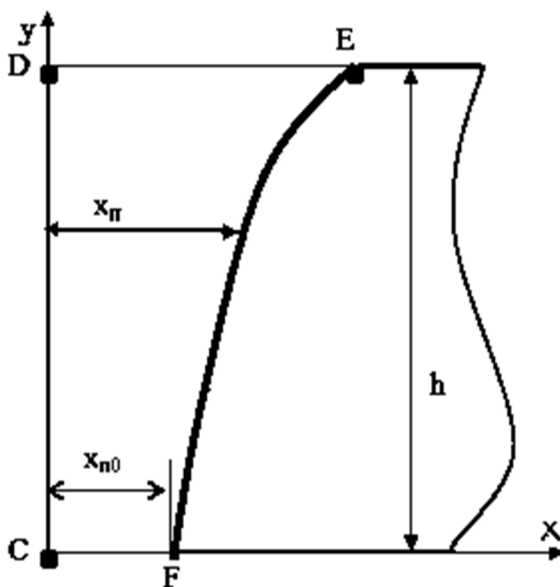


Рис. 4. Профиль полюсов ЭМЖД, обеспечивающих постоянство F_C

Обозначим

$$A = \frac{g(\rho_q - \rho_{жс})}{M_s B_{\max}}, \quad (9)$$

тогда

$$x_n = x_{no} \frac{1}{1 - A(y_n - y_{no})}. \quad (10)$$

Такое формирование наконечников полюсов сепаратора, заданные A и x_{n0} позволяют определить высоту зоны сепарации в зазоре $h_C = h - h_1$ (рис. 3) – зону, где сила

сепарации немагнитной частицы из МЖ F_C постоянна.

Процесс движения немагнитной частицы в МЖ, условие всплытия или погружения частицы в МЖ определяются из уравнения векторной суммы сил

$$\frac{dv}{dt} \rho_q V_q + 3\pi \eta v d_q = g(\rho_q - \rho_{жс}) V_q - \mu_0 M V_q \nabla H. \quad (11)$$

Из (11) получены соотношения для времени t_{noz} и уровня h_{noz} погружения частицы. По значениям h_{noz} , зависящей от A , определяется форма профиля наконечников полюсов ЭМЖС, минимальный зазор и др.

Магнитная проницаемость МЖ $\mu_{жс}$ больше магнитной проницаемости немагнитной частицы. В связи с этим, помещение немагнитной частицы в МЖ приводит к перераспределению магнитного поля полюсов электромагнита. Поэтому величина объема V_q и форма немагнитной частицы будут влиять на величину $\bar{F}_C$. Очевидно, что точность расчета сепарации определяется точностью расчета силы магнитной сепарации $\bar{F}_C$ и, следовательно, точностью расчета магнитного поля и $\nabla \bar{H}$. Для повышения точности расчета сепарации проводилось конечно-элементное моделирование магнитных полей в ЭМЖС, затем избыточных давлений и сил на немагнитные частицы. Численный расчет двухмерного магнитного поля выполнялся в системах ELCUT и Ansys Maxwell. Использовались неоднородные конечно-элементные сетки с размерами элементов много меньше размеров немагнитных частиц, но крупнее нанодисперсных магнитных частиц МЖ. Распределение избыточных давлений на частицы определялось по результатам анализа магнитных полей, программно экспортированных в систему MS Excel,

Анализ результатов

Наибольшее требуемое значение $\partial B / \partial y$ можно оценить по (6) из условия всплытия из МЖ на поверхность наиболее плотных частиц, например, золота с $\rho_q \approx 20 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

При использовании МЖ с $M_s = 20$ кА/м и $\rho_{жс} \approx 10^3$ кг/м³ $\partial B / \partial u$ должно составить 9,5 Тл/м. Анализ показывает, что это требование достижимо в рассматриваемых конструкциях. Также определено, что для удовлетворительной сепарации целесообразно выбирать такие M_s и H , чтобы рассчитанная по (7) h составляла (0,05÷0,1) м.

Диапазоны изменения величин при сепарации могут составлять: различие плотностей частиц металлов ρ_c (от алюминия до свинца) с плотностью МЖ –

$(\rho_c - \rho_{жс}) = 4000 \div 12000$ кг/м³; используются МЖ с $M_s = 10 \div 40$ кА/м; максимальная индукция в минимальном зазоре $B_{\max} = 0,4 \div 1$ Тл. В этом случае рассчитанные значения A по (9) составляют $1 \div 30$ м⁻¹. Рассчитанные по (10) соотношения координат поверхностей полюсных наконечников для разных значений A представлены на рис. 5. Формирование таких поверхностей полюсов обеспечивает $F_{\text{ВЫТ}} \approx \text{const}$ с погрешностью не более 5 %.

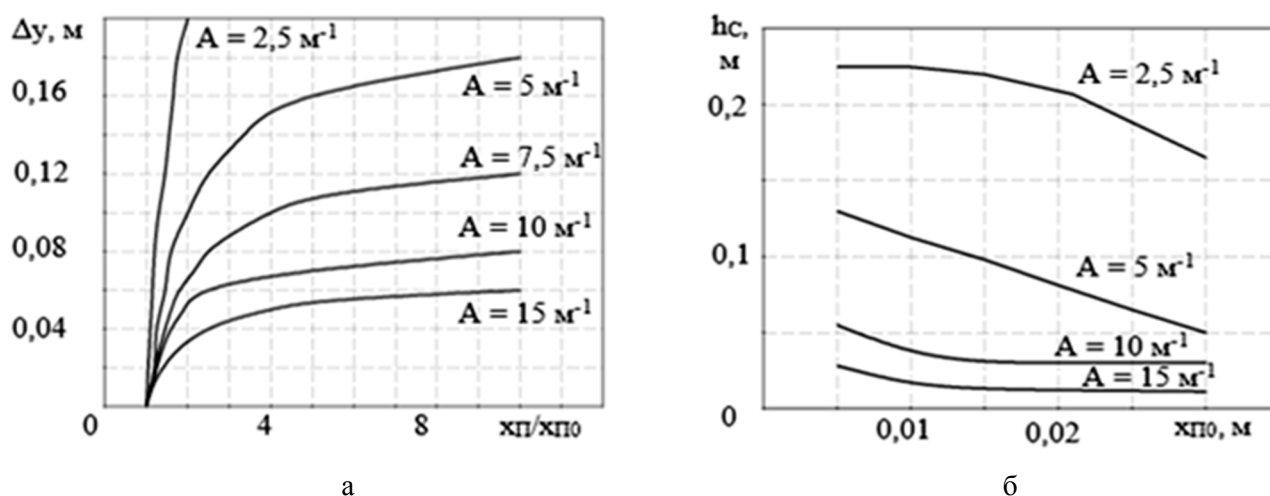


Рис. 5. Необходимые соотношения координат поверхностей полюсных наконечников (а) и изменения высоты зоны сепарации ЭМЖС при разных значениях A

На рис. 6 представлены зависимости глубины погружения немагнитной частицы в МЖ от параметра A . Рабочая часть столба магнитной жидкости $h_p = h_c$ определяется и точкой пересечения графиков магнитной и гравитационной энергий. Зависимости h_p от A и минимального зазора x_{n0} представлены на рис. 7.

По результатам расчетов в программе [15] для заданной v_o частицы установлены диапазоны возрастания глубины ее погружения в МЖ с повышением плотности частицы. Частица с большей кинетической энергией при входе в МЖ может проскочить зону сепарации (участок CD). Это может приводить к снижению точности сепарации (в тяжелую фракцию будут попадать частицы легкой фракции). При уменьшении градиента напря-

женности в 3 раза для частиц легкой фракции время движения возрастает в 2–6 раз за счет снижения магнитной силы сепарации и возрастания глубины погружения. Снижение плотности частиц в 4 раза увеличивает время их движения частиц на 20 %. Снижение диаметра частиц уменьшает глубину погружения, силу вязкого сопротивления и время движения. При изменении формы частицы изменяется траектория движения частиц. Результаты расчета магнитного поля в зазоре ЭМЖС с присутствием в МЖ немагнитной частицы представлены на рис. 8. Очевидно, что наличие немагнитной частицы вызывает перераспределение магнитного поля, увеличение размеров частицы снижает максимальную напряженность магнитного поля.

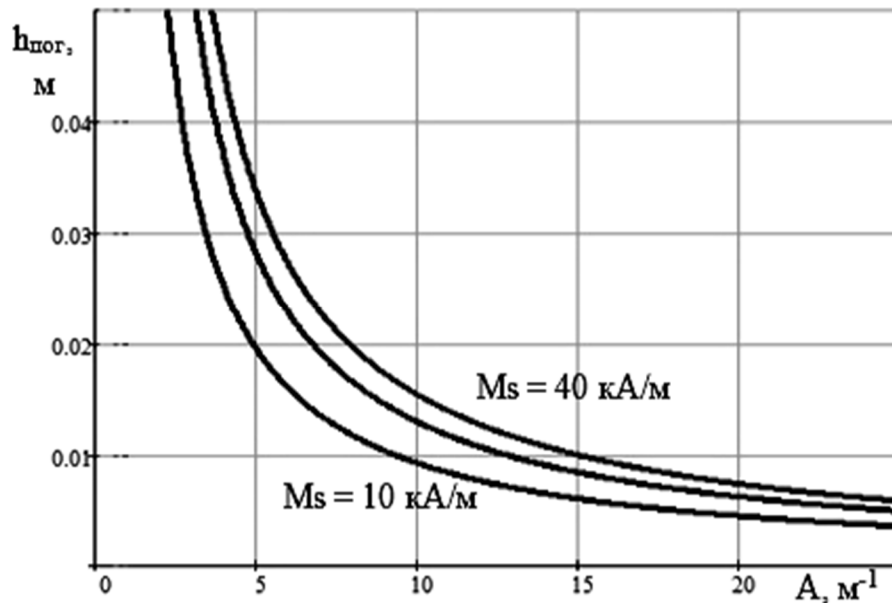


Рис. 6. Глубина погружения немагнитной частицы в зависимости от значений A и M_s

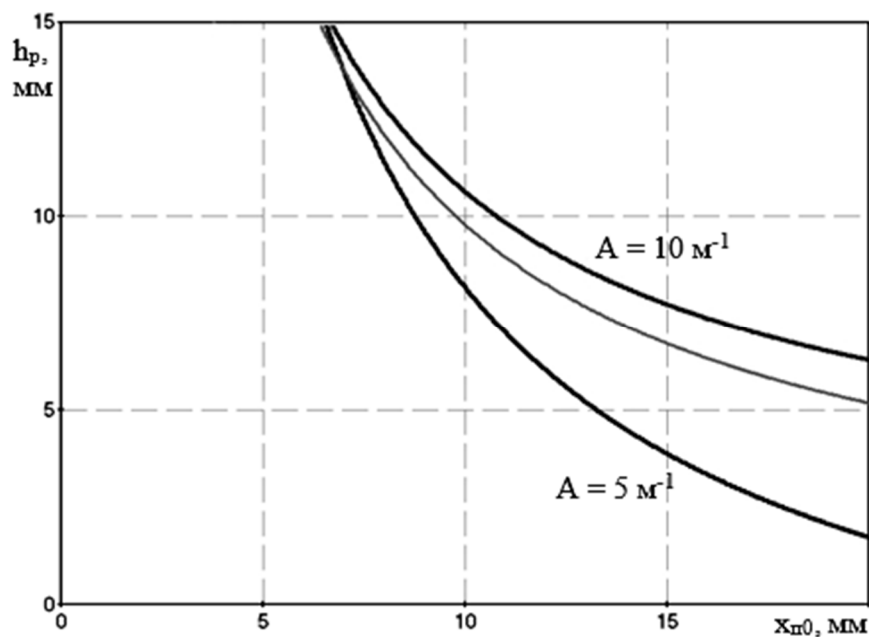


Рис. 7. Зависимость высоты рабочей зоны сепарации от минимального зазора при разных A

Анализ результатов показал, что H меняется линейно с изменением высоты зазора и градиент напряженности постоянен. Так как $H > 230$ кА/м, то МЖ находится в состоянии насыщения и ее намагниченность $M = M_s = \text{const}$. Следовательно, распределение магнитного поля в зазоре в ЭМЖС при таком формировании поверхностей полюсных наконечников удовлетворяет условиям сепарации.

Распределение изобар избыточного

давления $\Delta p = p - p_0$ в МЖ в присутствии немагнитной частицы 6×9 мм² показано на рис. 9. На рис. 10 приведено распределение Δp по оси x на различных координатах y МЖ по нижней и верхней границам немагнитной квадратной частицы. Очевидно различие давлений по границам частицы и возникновение дополнительной выталкивающей силы F_c как разницы давлений. На рис. 11 и в таблице приведены зависимости изменения удельной силы f_m от V_q .

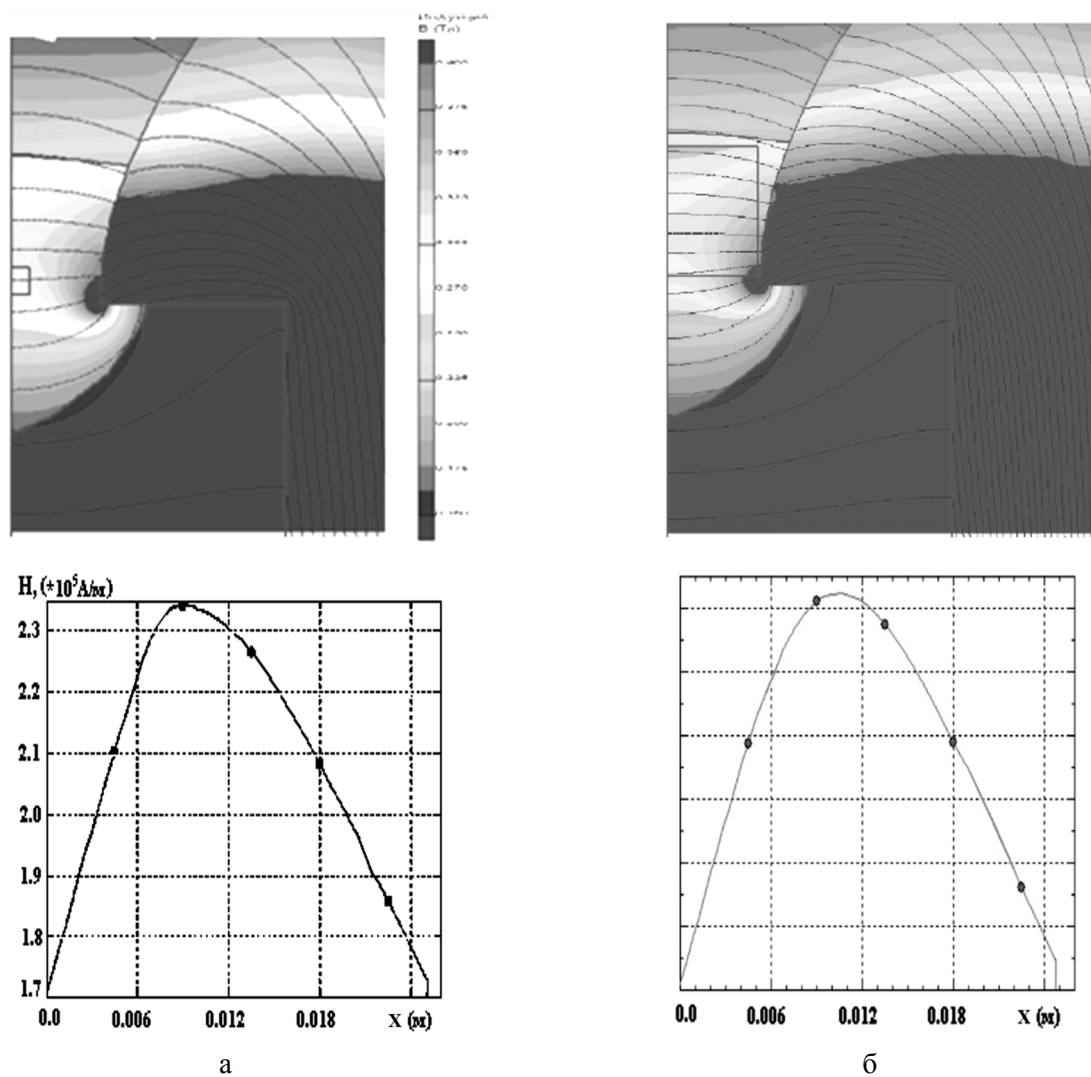


Рис. 8. Распределение линии магнитного потока и изменение H по x в ЭМЖС с квадратной немагнитной частицей малых (а) и увеличенных размеров (б)

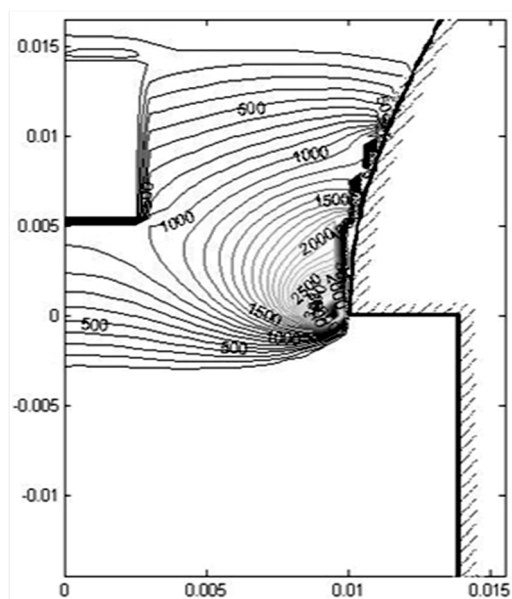
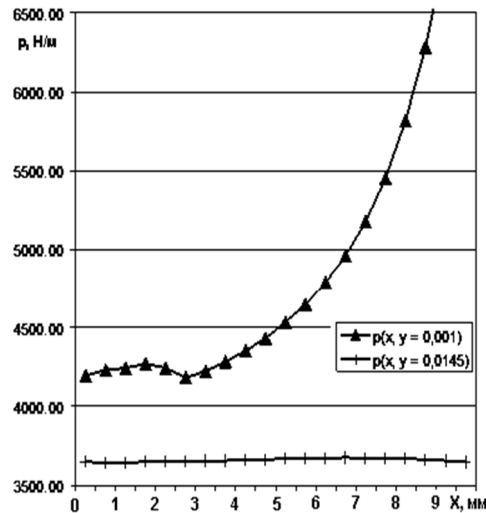
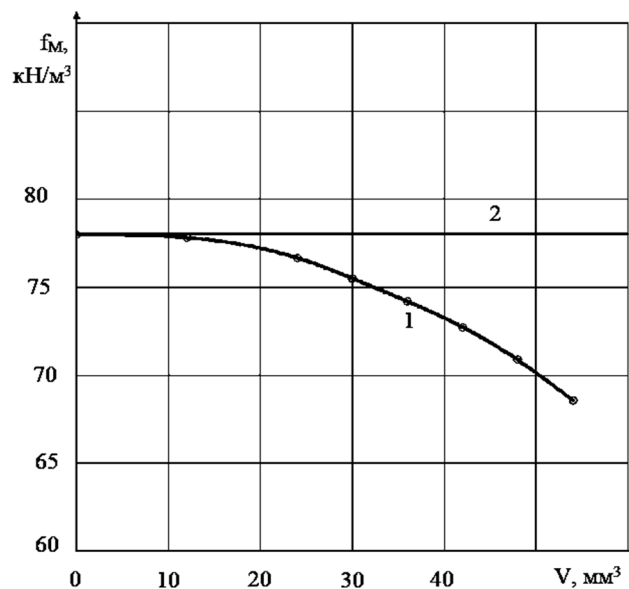


Рис. 9. Распределение $\Delta\rho$ в МЖ с немагнитной частицей $6 \times 9 \text{ мм}^2$


 Рис. 10. Изменение давлений по x для нижней и верхней границ немагнитной частицы

 Рис. 11. Изменение f_m от V_q : 1 – с учетом перераспределения B ; 2 – без учета перераспределения B

 Зависимость f_m от объема немагнитной частицы

$V_q, \text{мм}^3$	24	30	36	42	48	54
$V_q/V_{\text{мжс}}, \%$	6,2	8	9,3	11	12,4	14
$f_m, \text{кН/м}^3$ (с учетом перераспределения B)	76,67	75,19	74,06	72,74	70,88	68,59
$\Delta f_m, \%$	0	-1,9	-3,4	-5,1	-7,5	-10,5

Возрастание заполнения зоны сепарации частицами немагнитных материалов уменьшает градиент напряженности магнитного поля и силы сепарации. Для сферической частицы с $d_q/2 = 0,9 x_{no}$ уменьшение F_C достигает 15 %, по сравнению с частицей с $d_q/2 = 0,1 x_{no}$. Если при том же объеме форму

сферической частицы изменить на дисковую, то снижение F_C достигает (5-7) %. Если При зона сепарации на 49 % заполнена частицами немагнитных материалов, то сила сепарации уменьшается до 34 %.

Проверка расчетных результатов выполнена путем сравнения опытов на физи-

ческой модели ЭМЖС [16]. Применялась рассчитанная по (10) форма поверхностей полюсных наконечников. Использовалась МЖ с $M_s = 17$ кА/м. Высота столба МЖ составляла $h = 40$ мм, минимальный зазор между полюсными наконечниками – $\delta_{\min} = 2 x_{\text{по}} = 19,5$ мм. Изменением тока электромагнита I_6 изменялась F_C . Экспериментально выявлено изменение $I_{\text{впогр}}$ (при полном погружении в МЖ свинцовой частицы) и $I_{\text{пад}}$ (выпадении из МЖ свинцовой частицы) при изменении $d_q/\delta_{\min}$ (рис. 12). При возрастании отношения $d_q/\delta_{\min}$ в области частицы снижаются градиент магнитного поля и сила сепарации. Что бы обеспечить прежнее значение силы сепарации требуется повышать I_6 .

На основе анализа результатов расчетов установлено, что на немагнитную частицу с $d_q = 18$ мм ($d_q/\delta_{\min} = 0,92$) действует сила сепарации, составляющая 0,87 от магнитной силы, действующую на МЖ такого объема. По экспериментальной зависимости $I_{\text{пад, опыт}}$ (рис. 12) определено, что отношение сил $\sim 0,83$. Различие между экспериментальными и расчетными данными не превышает 5 %. Это характеризует правильность методики исследований.

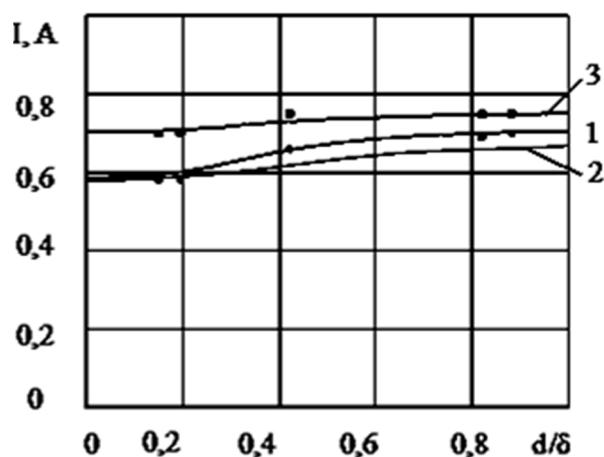


Рис. 12. Изменения токов при изменении d/δ : 1 – $I_{\text{пад, опыт}}$; 2 – $I_{\text{пад, расчет}}$; 3 – $I_{\text{впогр, опыт}}$

Влияние коэффициента заполнения зоны сепарации немагнитными свинцовыми частицами $k = V_q/V_{\text{МЖ}}$ на ток всплытия $I_{\text{вспл}}$ приведено на рис. 13. Увеличение k уменьшает интенсивность магнитного поля, силу

сепарации. Это вызывает необходимость повышения I_B для всплытия этих частиц.

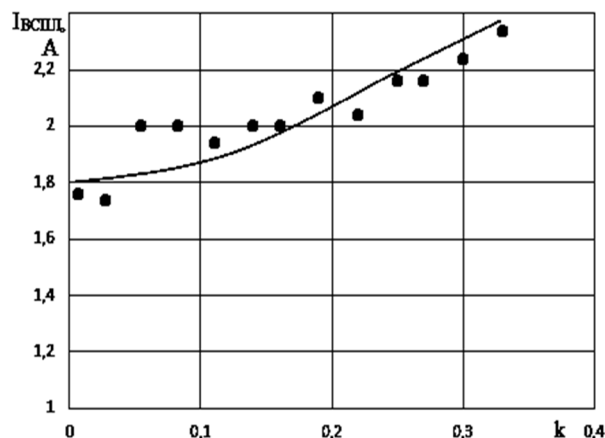


Рис. 13. Влияние коэффициента заполнения зазора ЭМЖС свинцовыми частицами на $I_{\text{вспл}}$

На основе результатов исследований запатентована конструкция усовершенствованного электромагнитного магнитожидкостного сепаратора с улучшенными свойствами по точности сепарации и функциональности [17].

Заключение

Разработанная методика уточненного электромагнитного анализа электромагнитных магнитожидкостных сепараторов немагнитных частиц на основе конечно-элементного расчета распределений магнитных полей с учетом их перераспределения при наличии в МЖ немагнитных частиц, нелинейных характеристик намагничивания магнитопровода ЭМЖС и МЖ, немагнитных частиц разных размеров и форм и, степени заполнения немагнитными частицами магнитожидкостной зоны сепарации позволяет повысить точность расчетов давлений и сил сепарации, действующих на частицы немагнитных материалов в МЖ.

Выявлено влияние изменения коэффициента заполнения зазора немагнитными частицами, отклонения формы частиц от сферической, размеров немагнитных частиц на изменение силы сепарации. Изменением тока возбуждения возможно бесконтактным электромагнитным путем изменять порог плотности материалов при регулировке сепарации немагнитных частиц.

Установлено, что для повышения точности сепарации целесообразно увеличение высоты зоны сепарации за счет применения МЖ с большей M_s и/или увеличения интенсивности магнитного поля. Возрастание M_s возможно путем использования МЖ с большей концентрацией магнитной фазы МЖ, но это вызывает возрастание вязкости МЖ, что замедляет процесс сепарации. Увеличение интенсивности магнитного поля возможно возрастанием тока электромагнита.

Предложен расчет формы поверхностей наконечников полюсов электромагнитного

магнит ожедкостного сепаратора, который позволяет сформировать требуемое распределение магнитного поля. Это позволяет повысить точность сепарации частиц немагнитных материалов с погрешностью не более 7 %. Экспериментальные исследования подтверждают результаты теоретических исследований с погрешностью не более 8 %.

На основе результатов исследований запатентована конструкция усовершенствованного ЭМЖС повышенной точности сепарации и функциональности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глобальный мониторинг электронных отходов / К.П. Балде, В. Форти, В. Грей, Р. Кюр, П. Стегманн; Университет Организации объединенных наций (УООН), Международный союз электросвязи (МСЭ) и Международная ассоциация по твердым отходам (МАТО), Бонн, Женева, Вена, 2017. 116 с. https://collections.unu.edu/eserv/UNU:6341/GEM_2017-R.pdf (дата обращения: 06.05.2021).
2. An international comparative study of end-of-life vehicle (ELV) recycling systems: REVIEW: End-of-Life Vehicle (ELV) Recycling / Shin-ichi Sakai and etc. // J Mater Cycles Waste Manag. 2014. 16:1-20. DOI 10.1007/s10163-013-0173-2.
3. **Dalmijn W.L.** The Development of Vehicle Recycling in Europe: Sorting, Shredding, and Separation / W.L. Dalmijn, T.P.R. De Jong // JOM. November 2007. P. 52-56.
4. **Распоряжение Правительства РФ** от 25.01.2018 № 84-р «Об утверждении стратегии развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года».
5. Промышленные сепараторы на магнитных жидкостях / В.В. Гогосов, Р.Д. Смолкин, В.С. Крохмаль и др. // Магнитная гидродинамика. 1994. № 1. С. 111-120.
6. Способы переработки электронного лома за рубежом. URL: [www.metal-archive.ru/metallurgiya-zolota-i-serebra/2611-sposoby-pererabotki-elektronnogo-loma-za-](http://www.metal-archive.ru/metallurgiya-zolota-i-serebra/2611-sposoby-pererabotki-elektronnogo-loma-za-rubezhom.html)
7. rubezhom.html (дата обращения: 06.05.2021).
7. Извлечение цветных и благородных металлов из электронного лома: экономические показатели и стратегия ценообразования / Л.С. Стрижко, Ю.Ю. Костюхин, Г.В. Кружкова, Е.А. Иванова // Известия вузов. Цветная металлургия. 2013. № 3. С. 28-33.
8. **Баркан М.** Технология извлечения драгоценных металлов из отходов электротехники / М. Баркан, М. Чиненкова. URL: www.waste.ru/modules/section/item.php?itemid=233 (дата обращения: 06.05.2021).
9. Separation technology. URL: www.cogelme.com (дата обращения: 06.05.2021).
10. **Пелевин А.Е.** Магнитные и электрические методы обогащения. Магнитные методы обогащения: учебник / А.Е. Пелевин; Урал. гос. горный ун-т. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2018. 296 с.
11. **Коняев А.Ю.** Исследование процессов электродинамической сепарации электронного лома / А.Ю. Коняев, Д.Н. Багин, Н.С. Якушев // Экология и промышленность России. 2015. Т. 19. № 4. С. 15-19.
12. **Коняев А.Ю.** Сепараторы для извлечения цветных металлов из ТКО / А.Ю. Коняев, Ж.О. Абдуллаев, И.А. Коняев // Твердые бытовые отходы. 2017. № 3 (129). С. 36-39.
13. Non-ferrous metal separator. URL: www.steinert.de (дата обращения: 05.10.2020).

14. **Казаков Ю.Б.** Моделирование и исследование электротехнической системы регулируемой сепарации немагнитных материалов с использованием нанодисперсных магнитных жидкостей / Ю.Б. Казаков, Ю.И. Страдомский, В.А. Филиппов // Вестник ИГЭУ. 2011. № 2. С. 54-57.

15. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2019616505 «Расчет траекторий немагнитных частиц в зоне разделения магнитожидкостного сепаратора» / В.А. Филиппов // Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 23.05.2019 г.

16. **Kazakov Yu.B.** Calculation of the performance of the electromagnetic magnetic fluid separator non-magnetic materials / Yu.B. Kazakov, V.A. Filippov // Advanced Problems of Electrotechnology: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. October 1-2, 2020. Yekaterinburg, Russian Federation. 2020. Vol. 950. № 012003. 8 p. doi:10.1088/1757-899X/950/1/012003.

17. Патент на изобретение № 2464101. Магнитогидростатический сепаратор / Ю.И. Страдомский, Ю.Б. Казаков, В.А. Филиппов. Зарегистр. в Гос. реестре изобретений РФ 20.10.2012 г. Опубл. 10.10.2012 // Бюл. № 28.

Казаков Юрий Борисович - доктор технических наук, профессор, действительный член Академии электротехнических наук РФ, заведующий кафедрой «Электромеханика» Ивановского государственного энергетического университета имени В.И. Ленина» (ИГЭУ)

Страдомский Юрий Иосифович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электромеханика» Ивановского государственного энергетического университета имени В.И. Ленина» (ИГЭУ)

Филиппов Василий Александрович – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Электромеханика» Ивановского государственного энергетического университета имени В.И. Ленина» (ИГЭУ)

Нестеров Сергей Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электромеханика» Ивановского государственного энергетического университета имени В.И. Ленина» (ИГЭУ)

Yuri B. Kazakov – Dr.Sc. Tech., Professor, Full Member of the Academy of Electrotechnical Sciences of the Russian Federation, Head: Department of Electromechanics, Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin (ISPU)

Yuri I. Stradomsky – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Electromechanics, Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin (ISPU)

Vasily A. Filippov – PhD (Technical Sciences), Senior Lecturer, Department of Electromechanics Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin (ISPU)

Sergei A. Nesterov – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Electromechanics Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin (ISPU)

Статья поступила в редакцию 14.07.21, принята к опубликованию 12.08.21

Редактор Л.А. Скворцова
Компьютерная верстка Ю.Л. Жупиловой
Перевод на английский язык А.Х. Аскаровой

Почтовый адрес: 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77
Телефон: (8452) 99-87-63
E-mail: eltech@sstu.ru

Подписано в печать 24.09.2021
Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.
Усл. печ. л. 13,0 Уч. изд. л. 5,4
Тираж 500 экз. Заказ 62 Цена свободная
Отпечатано в Издательстве СГТУ, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77.
E-mail: izdat@sstu.ru
Полная электронная версия журнала размещена в системе РИНЦ
в открытом доступе на платформе eLIBRARY.RU
Подписной индекс 70841 (каталог «Газеты. Журналы» на 1-е полугодие 2022 г.)
Свидетельство о регистрации СМИ *ПИ № ФС77-54621 от 01.07.2013*

Editor L.A. Skvortsova
Computer-assisted layout by Yu.L. Zhupilova
Translation into English by A.H. Askarova

Address: 77 Politekhnikeskaya Str., 410054, Saratov, Russia
Tel.: (8452) 99-87-63
E-mail: eltech@sstu.ru

Print date: 24.09.2021
Paper size: 60×84 1/8. Offset-Print
Conventional printed sheet 13,0 Publication base sheet 5,4
Circulation: 500 printed copies. Order 62 Subscription and individual copies: open rates
Published by SSTU Publishing, 410054 Saratov, 77 Politekhnikeskaya Str.
Online at www.eLIBRARY.RU
The certificate of media source registration: *PI No. FS77-54621 dated 1 July 2013*