

На правах рукописи

Филиппов Василий Александрович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ
МАГНИТОЖИДКОСТНЫХ СЕПАРАТОРОВ
НЕМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара – 2020

Работа выполнена на кафедре «Электромеханика» ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

Научный руководитель: **Казаков Юрий Борисович**
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электромеханика» ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

Официальные оппоненты: **Коняев Андрей Юрьевич**
доктор технических наук, профессор кафедры «Электротехника и электротехнологические системы» ФГБОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург

Рандин Дмитрий Геннадьевич
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», г. Самара

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ", г. Москва

Защита диссертации состоится «22» декабря 2020 г. в 13 ч. в диссертационном совете Д 212.217.04 по адресу г. Самара, ул. Первомайская, 18, Самарский государственный технический университет, корпус 1, ауд. 4а.

С авторефератом и диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СамГТУ (ул. Первомайская, 18) и на сайте <https://samgtu.ru>

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенных печатью) просим направлять по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская 244, СамГТУ, Главный корпус, ученому секретарю диссертационного совета Д212.217.04; факс: (846) 278-44-00, e-mail: a-ezhova@yandex.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

к.т.н.



Е.В. Стрижакова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Бытовые и промышленные отходы занимают большие площади, отравляют воду, почву и воздух. С каждым годом увеличиваются объемы выбрасываемой бытовой техники, автомобилей, электронных приборов. Промышленные отходы содержат ценные материалы. В 2016 г. стоимость не извлеченных ценных материалов только из более чем 40 млн т. произведенного в мире электронного лома достигала 55 млрд долл. Эффективная переработка отходов снижает загрязнение окружающей среды, возвращает в производство цветные и драгоценные металлы, сохраняет природные ресурсы. Доля благородных металлов, которую можно получить из вторичного сырья, составляет 20-50 %. В России инициирована программа по переработке отходов производства.

Магнитожидкостная сепарация является перспективным способом выделения материалов. Магнитные жидкости (МЖ) - это коллоид из нанодисперсных ферромагнитных частиц 10-40 нм, покрытых поверхностно-активным веществом 2-4 нм, и жидкости-носителя. Используются МЖ с концентрацией магнитных частиц $0,05 \div 0,14$. МЖ изменяют магнитные, вязкостные, электрические и теплофизические свойства при воздействии магнитного поля. ИГЭУ производит и исследует разные МЖ, устройства на их основе.

Электромагнитные магнитожидкостные сепараторы (ЭМЖС) позволяют разделять немагнитные материалы из смеси на фракции по плотности. МЖ располагается в зазоре между полюсными наконечниками электромагнита ЭМЖС, создающих градиентное магнитное поле. На МЖ действует магнитная сила F_M , направленная в сторону максимальной напряженности магнитного поля, возникает т.н. «псевдоутяжеление» МЖ. На немагнитное тело, погруженное в МЖ и замещающее ее объем V , действует противонаправленная, выталкивающая, по аналогии с силой Архимеда, сила F_C - сила сепарации. Изменение магнитного поля в ЭМЖС путем регулирования тока электромагнита изменяет F_M и F_C . Электромагнитные магнитожидкостные сепараторы относятся к классу электромагнитных аппаратов.

Степень разработанности проблемы. Электромеханические устройства с МЖ описаны учеными МЭИ (Копылов И.П.) и МАИ (Алиевский Б.Л.). Электротехническая виброзащита с магнитореологическим демпфером развивается в СамГТУ (Абакумов А.М., Рандин Д.Г.). Электромеханический преобразователь с управляемым движением ферромагнитных частиц в нефти разрабатывают в НИИ (Павленко А.В., Куимов Д.Н.). Магнитожидкостную смазку для двигателя-маховика применяют в «ВНИИЭМ» (Геча В.Я., Захаренко А.Б.).

Для сепарации металлов применяются электродинамические сепараторы. Ими занимались Bauer J., Lengfelder W. и Neubert K. в Германии; Wells J. и Rano R. в США. В РФ разработкой электродинамической сепарацией занимаются в Екатеринбурге (Коняев А.Ю., Назаров С.Л., Багин Д.Н., Абдуллаев Ж.О.), Москве (Соколова Е.М., Шубов Л.Я.), С.-Петербурге (Шнеерсон Г.А.).

В ЭМЖС, в отличие от электродинамических сепараторов, нет ограничений по различию электропроводящих свойств материалов и однородности по крупности частиц. Теоретические работы по магнитожидкостной сепарации выполнены Орловым Д.В., Страдомским Ю.И., Казаковым Ю.Б., Гогосовым В.В., Смолкиным Р.Д., Берковским Б.М., Медведевым В.Ф., Краковым М.С.

В настоящее время в промышленности применяются разные конструкции ЭМЖС. Но наличие многокомпонентных смесей, их высокая стоимость, например, при очистке от шлиха мелкого золота, золотосодержащих отходов, требует повышенной функциональности и точности сепарации, не обеспечиваемой в используемых образцах. Электромагнитные процессы в ЭМЖС недостаточно изучены, особенно для условий разделения частиц с размерами менее миллиметра, многофракционных смесей, при повышенной точности сепарации, производительности процесса. Практически не изучены вопросы влияния размера, формы и плотности немагнитных частиц, степени заполнения рабочего зазора ЭМЖС немагнитными частицами. Нет методик расчета и проектирования ЭМЖС. В связи с этим целесообразно уточненное моделирование распределений магнитных полей, сил и давлений в ЭМЖС, исследование их характеристик, разработка методик расчета и проектирования. Таким образом, повышение эффективности, разработка и исследование усовершенствованных ЭМЖС немагнитных материалов на основе уточненного анализа электромагнитных процессов является актуальной научно-технической задачей, что подтверждает выполнение в ИГЭУ с участием автора проектов РФФИ №09-08-97575-р_центр_а «Разработка научных основ технологии сепарации немагнитных материалов с использованием нанодисперсных магнитных жидкостей» и №2.1.2/11623 РФ «Разработка методологии сепарации немагнитных металлов с применением магнитных жидкостей» программы Минобрнауки «Развитие научного потенциала высшей школы».

Цель диссертационной работы – повышение эффективности электромагнитных магнитожидкостных сепараторов немагнитных материалов на основе расширения функциональности и точности разделения немагнитных материалов путем совершенствования конструкции, разработки и применения уточненных моделей, методик расчетов и проектирования.

Объект исследования - электромагнитный магнитожидкостный сепаратор немагнитных материалов.

Предмет исследования - электромагнитные процессы при разделении движущихся частиц немагнитных материалов в ЭМЖС.

Задачи исследования:

- разработка методик расчета, аналитических и численных математических моделей ЭМЖС;
- анализ движения немагнитных частиц в зоне разделения ЭМЖС;
- исследование характеристик и свойств ЭМЖС на основе уточненных математических моделей;
- совершенствование конструкции, разработка методик расчета и проекти-

рования, расчета производительности ЭМЖС;

- разработка опытной установки сепарации и экспериментальные исследования усовершенствованного ЭМЖС.

Методы исследования. Для решения задач выполнены теоретические исследования с использованием математических методов моделирования электромагнитных процессов, реализованных в средах Mathcad, Matlab, Excel, численных методов расчетов электромагнитных полей в системах Elcut и Ansoft Maxwell, экспериментальные исследования с использованием методов физического моделирования и натурального эксперимента.

Научная новизна работы

1. Разработаны методики анализа, математические модели ЭМЖС, устанавливающие зависимость сил сепарации от параметров магнитного поля, отличающиеся учетом распределений магнитного поля и поля избыточного давления в сепараторе, плотности, размеров и формы сепарируемых частиц.

2. Разработаны программы моделирования, регулируемого электромагнитным способом, процесса разделения немагнитных частиц по плотности в ЭМЖС, отличающиеся уточненным расчетом силы сепарации, действующей на частицы в неоднородном магнитном поле ЭМЖС, расчетом траектории движения частиц, вязкости МЖ, начальной скорости и плотности частицы.

3. Разработаны методики расчета и проектирования ЭМЖС, отличающиеся учетом конфигурации рабочего зора сепаратора, изменения формы поверхности МЖ, влияния перераспределения магнитного поля вследствие заполнения рабочего зора сепарируемыми немагнитными частицами.

Практическая ценность работы

1. Разработанные математические модели, методики и программы анализа ЭМЖС немагнитных материалов, полученные результаты теоретических и экспериментальных исследований позволяют повысить точность расчета сепарации материалов в ЭМЖС.

2. Предложенные методики, программы расчета и проектирования ЭМЖС позволяют разрабатывать ЭМЖС с повышенной точностью сепарации, имеют практическую ценность при создании систем регулируемой сепарации немагнитных материалов, могут использоваться в учебном процессе ВУЗов.

3. Предложенную конструкцию усовершенствованного ЭМЖС, обладающего функциональными преимуществами при сепарации многокомпонентных смесей, рекомендуется использовать в перспективных системах регулируемой сепарации немагнитных материалов.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Методики анализа, математические модели и программы моделирования ЭМЖС с регулируемой электромагнитным способом сепарацией по плотности частиц немагнитных материалов, с использованием результатов моделирования магнитных полей, учетом плотности, размеров и формы сепарируемых частиц, расчетом сил сепарации, действующих на частицы в неоднородном магнитном поле ЭМЖС и их траекторий.

2. Методики расчета и проектирования ЭМЖС немагнитных материалов с учетом конфигурации рабочего зазора сепаратора, влияния на форму поверхности МЖ перераспределения магнитного поля вследствие заполнения рабочего зазора сепарируемыми немагнитными частицами.

3. Результаты разработки, теоретических и экспериментальных исследований ЭМЖС.

Диссертация соответствует паспорту специальности: в части формулы специальности: «... специальность, объединяющая исследования по физическим и техническим принципам создания и совершенствования силовых ... устройств, ... электрических ... аппаратов. Исследования научно-технических ... и технологических проблем проводятся с целью повышения ... эффективности, технологичности ... аппаратов ...»; **в части области исследования:** п.1 «Анализ и исследование физических явлений, лежащих в основе функционирования электрических ... аппаратов»; п.4 «Разработка методов анализа и синтеза электрических аппаратов»; п.5 «Разработка подходов, методов, алгоритмов и программ, обеспечивающих проектирование ... электрических аппаратов ...»; так как посвящена повышению эффективности ЭМЖС на основе совершенствования конструкции, разработки и применения уточненных моделей, методик расчетов и проектирования.

Обоснованность и достоверность результатов и выводов диссертации обеспечена строгим выполнением математических преобразований, принятием признанных допущений, использованием современных математических моделей и лицензированного программного обеспечения. **Адекватность результатов и выводов** подтверждается согласованностью с опубликованными результатами, удовлетворительным совпадением экспериментальных результатов с результатами расчетов.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы обсуждены на Международных научно-технических конференциях: «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (Иваново, ИГЭУ, 2009, 2011, 2013, 2015, 2017, 2019 гг.), «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, МЭИ, 2009, 2011 гг.), «Электромеханика, Электротехнологии, Электротехнические материалы и Компоненты» (Крым, 2010 г.), «Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий» (Екатеринбург, 2011 г.), Плесских конференциях по нанодисперсным магнитным жидкостям (Плес, 2008, 2010, 2012, 2014, 2016, 2018 гг.), Всероссийских научных конференциях «Физико-химические и прикладные проблемы магнитных дисперсных наносистем» (Ставрополь, 2009, 2011, 2013, 2015 гг.), «International Conference on Magnetic Fluids» (New Delhi, India, 2013 г.) и др.

Внедрение результатов работы. Основные положения, выводы и рекомендации внедрены в ОАО «Вторцветмет», в учебном процессе ИГЭУ по дисциплине «Электромеханические магнитожидкостные устройства».

По материалам диссертации опубликованы 22 работы, из них 4 статьи в журналах рекомендованных ВАК РФ, 1 статья индексирована в БД Scopus,

1 патент на изобретение и 2 свидетельства на программы для ЭВМ.

Структура диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы из 124 наименований, приложений и содержит 128 страниц основного текста, 73 рисунка и 14 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, определены цель и задачи, сформулированы научная новизна и практическая значимость.

В первой главе рассмотрены проблемы сепарации немагнитных материалов. Отмечено, что промышленные отходы (бытовая техника, автомобили, электронные приборы и др.) могут содержать ценные материалы. Перспективна сепарация таких отходов для вторичного использования извлеченных материалов. Промышленные отходы обычно предварительно измельчают с получением многокомпонентных смесей. Проанализированы способы сепарации таких смесей. Высокая стоимость разделения материалов, например, цветных и драгоценных металлов, на фракции требует повышенной точности сепарации, не всегда обеспечиваемой в применяемых устройствах. Показана целесообразность использования ЭМЖС немагнитных материалов с плотностями 1,5 - 20 г/см³.

В зазор ЭМЖС, заполненный МЖ (рис. 1) с нелинейными магнитными свойствами (рис. 2) из подающего сверху лотка поступает смесь частиц. Полусными наконечниками ЭМЖС по высоте зазора формируется неоднородное магнитное поле, которое вызывает выталкивание немагнитных тел из МЖ в область с меньшей напряженностью магнитного поля. В минимальном

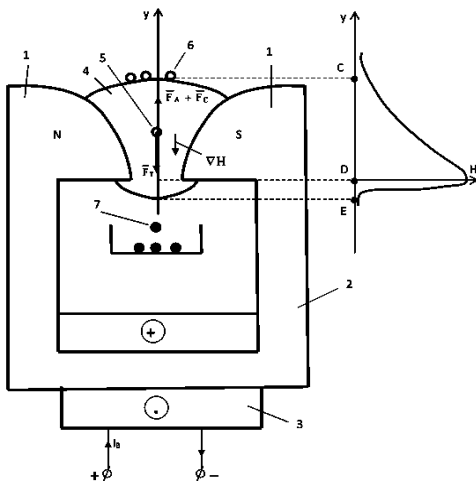


Рис. 1. ЭМЖС: 1 – полусные наконечники, 2 – магнитопровод, 3 – обмотка электромагнита, 4 – магнитная жидкость, 5 – частица, 6 – частицы легкой фракции, 7 – частицы тяжелой фракции

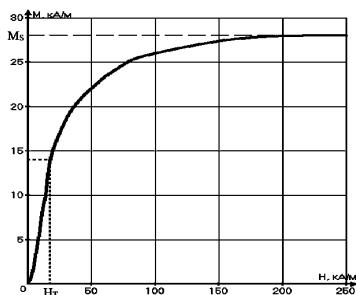


Рис. 2. Характеристика намагничивания магнитной жидкости

зазоре, на линии D, действует максимальная индукция B_{\max} . МЖ располагается в зоне максимальной индукции в зонах CD и DE. В зоне CD F_C направлена вверх, в зоне DE F_C направлена вниз. В ЭМЖС возможно эффективное управление сепарацией материалов разной плотности, так как сила сепарации F_C определяется антиградиентом магнитного поля в МЖ, которое регулируется током в обмотке электромагнита. Различие электропроводящих свойств разделяемых частиц в ЭМЖС не влияет на точность сепарации, отсутствуют требования к однородности частиц по крупности.

В выводах первой главы отмечено, что процессы в ЭМЖС недостаточно изучены, особенно для условий разделения частиц с размерами менее миллиметра, многофракционных смесей, при повышенных точности сепарации, технологичности и производительности процесса. Практически не изучены вопросы влияния размера, формы и плотности частиц, степени заполнения рабочего зазора ЭМЖС немагнитными частицами на электромагнитные процессы при сепарации. Нет методик расчета и проектирования ЭМЖС. Целесообразно уточненное моделирование распределений магнитных полей, сил и давлений в ЭМЖС, совершенствование конструкции.

Вторая глава посвящена разработке математических моделей и моделированию процессов разделения немагнитных материалов в ЭМЖС, разработке методик расчета и проектирования ЭМЖС.

Рассмотрены силы и давления, действующие на немагнитное тело в зазоре возбужденного ЭМЖС. Кроме сил тяжести F_t и Архимеда F_A на немагнитную частицу в неоднородном магнитном поле в МЖ действует дополнительная сила сепарации $F_C = -F_m$, которая зависит от распределения удельной магнитной энергии на поверхности частицы. Немагнитная частица объёмом V с магнитной проницаемостью μ_0 , меньшей магнитной проницаемости МЖ $\mu_{ж}$, вызывает перераспределение магнитного поля в зазоре. F_m зависит от распределения напряженности магнитного поля H в МЖ

$$\bar{F}_M = \mu_0 M V \cdot \nabla H = -\bar{F}_C \quad , \quad (1)$$

где M – намагнитченность МЖ, ∇H - градиент напряженности.

Для точности сепарации в ЭМЖС по высоте столба МЖ на участке CD (рис. 1) должно оставаться $F_C = \text{const}$, т.е. должно сохраняться $\nabla H = \text{const}$.

На движущуюся в МЖ со скоростью v частицу плотностью ρ и диаметром d дополнительно действуют сила вязкостного сопротивления F_B , определяемая через вязкость МЖ η формулой Стокса.

Из решения дифференциального уравнения движения частицы в вязкой МЖ с плотностью $\rho_{ж} > 1,0 \text{ г/см}^3$, при $\rho > \rho_{ж}$ и воздействии магнитного поля

$$\frac{dv}{dt} \rho V + 3\pi \eta v d = (\rho - \rho_{ж})gV - \mu_0 M V \nabla H \quad , \quad (2)$$

выведены соотношения для времени $t_{\text{пог}}$ и глубины погружения частицы $L_{\text{пог}}$.

Для $\nabla H = 4000 \text{ кА/м}^2$; $M_S = 25 \text{ кА/м}$; $\eta = 7,5 \text{ мПа}\cdot\text{с}$ на рис. 3 представлены зависимости $L_{\text{пог}}$ от плотности материала частицы при разной высоте лотка.

Моделирование траектории движения частицы, подаваемой в ЭМЖС с начальной скоростью v_0 , с допущением о постоянстве вязкости η и силы F_M , выполнялось по соотношению (2) с учетом длины L и угла наклона α полюсных наконечников, высоты столба МЖ h (рис. 4). При попадании частицы в зону h_1 сила сепарации меняет знак, и частица интенсивнее опускается вниз.

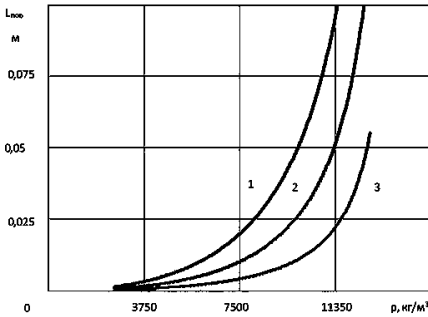


Рис. 3. Зависимость глубины погружения частицы от её плотности при высоте лотка 1 – 0,05 м; 2 – 0,025 м; 3 – 0,01 м

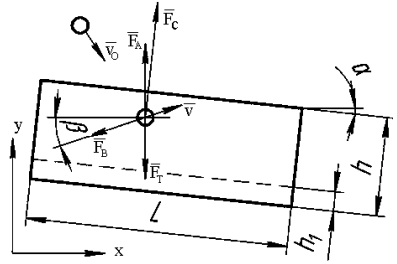


Рис. 4. Схема для расчета траектории движения частицы в зазоре ЭМЖС

Выведены соотношения для скоростей движения частицы по осям

$$v_x = \left(v_{0x} + \frac{c_x}{b} \right) \cdot e^{-\frac{b \cdot t}{a}} - \frac{c_x}{b}, \quad v_y = \left(v_{0y} + \frac{c_y}{b} \right) \cdot e^{-\frac{b \cdot t}{a}} - \frac{c_y}{b}, \quad (3)$$

где $c_y = k_c (-\mu_0 M \cdot |\nabla H| \cdot V \cos \alpha - \rho_{ж} \cdot gV) + \rho \cdot gV$; $c_x = -k_c \cdot \mu_0 M \cdot |\nabla H| \cdot V \sin \alpha$; $a = \rho V$; $b = 3\pi \cdot \eta \cdot d \cdot k_b$; k_b, k_c – коэффициенты, учитывающие степень погружения частицы по диаметру и объёму в МЖ.

На основе разработанных моделей реализованы алгоритм и компьютерная программа расчета траектории движения частиц в МЖ при воздействии сил магнитной сепарации, вязкости, тяжести, силы Архимеда. На рис. 5 представлены траектории движения частиц, магнитное поле создавалось током электромагнита $I=2$ А с индукцией $B_{\max}=0,6$ Тл.

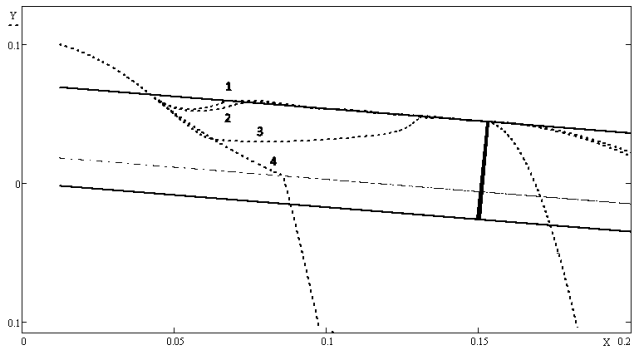


Рис. 5. Траектории движения частиц ($\alpha=10^\circ$, $v_{0x}=0,5$, $v_{0y}=-0,3$ м/с): 1 - алюминиевая частица 2 мм; 2 - алюминиевая частица 5,6 мм; 3 - медная частица 0,8 мм; 4 - медная частица 4,9 мм

Чем выше плотность частицы, тем большая глубина ее погружения в МЖ. Частица с большей энергией при входе в МЖ может проскакивать зону разделения (участок CD), при этом будет снижаться степень разделения (загрязнение тяжелой фракции легкой). При уменьшении в 3 раза градиента напряженности магнитного поля в зазоре ЭМЖС время движения частиц легкой фракции увеличивается в 2-6 раз за счет уменьшения магнитной силы сепарации и увеличения глубины погружения частиц. При уменьшении плотности материала в 4 раза время движения частиц увеличивается до 20 %. Уменьшение диаметра частиц снижает глубину погружения, вязкостную силу и время движения. Изменение формы частиц со сферической на плоскую изменяет траекторию движения частиц.

Для выполнения условия $F_C = \text{const}$ по высоте столба МЖ, соответственно $\nabla H = \text{const}$, профиль полюсных наконечников ЭМЖС должен быть специально подобран. Получено соотношение для расчета формы полюсных наконечников ЭМЖС (рис. 6), обеспечивающих постоянство магнитной силы сепарации F_C в зоне CD с погрешностью не более 7 %,

$$\frac{1}{x_n} = \frac{1}{x_{n0}} - 2 \frac{\partial H}{\partial y} \frac{(y_n - y_{n0})}{\Delta U}, \quad (4)$$

где ΔU – разность магнитных потенциалов между поверхностями наконечников, $\partial H / \partial y$ определяется значением F_C .

На основании развитых математических моделей разработана методика проектирования ЭМЖС с обеспечением постоянства градиента напряженности в зазоре и учетом наличия МЖ. Исходными данными являются плотности частиц легкой ρ_L и тяжелой ρ_T фракций в диапазонах от 2,5 до 12,0 г/см³ (при разделении металлов от алюминия до свинца), максимальный диаметр частиц $d_{ч. \max} < x_{n0}$, производительность для легкой Q_L и тяжелой Q_T фракций, начальная скорость движения частиц v_0 , угол наклона полюсов α (0-45°).

Производительность ЭМЖС определяется как:

$Q_L = \rho_L d_L b v_{\text{хср}} / k_L$ [кг/ч] - для легкой и $Q_T = \rho_T d_T \delta v_{\text{усп}} / k_T$ - для тяжелой фракций, где d_L и d_T - диаметры легкой и тяжелой частиц соответственно, b – длина дуги верхней поверхности МЖ, δ – минимальный зазор ЭМЖС, $v_{\text{хср}}$ и $v_{\text{усп}}$ - средние скорости движения частиц по осям, k_L и k_T - коэффициенты заполнения столба МЖ легкой и тяжелой фракций, соответственно.

Q_T и Q_L зависят от угла наклона полюсных наконечников α . Так для МЖ ($\eta = 7,5$ мПа·с, $\rho_{ж} = 1,15$ г/см³, $M_S = 25$ кА/м) и двухкомпонентной разделяемой смеси с частицами $d = 1,5$ мм и плотностями $\rho_T = 7,26$ г/см³ (олово) и $\rho_L = 2,7$ г/см³ (алюминий) определены изменения Q_T и Q_L в зависимости от α (рис. 7).

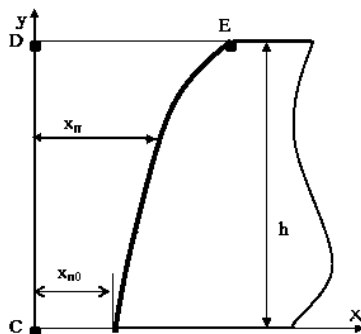


Рис. 6. Профиль полюсов ЭМЖД, обеспечивающих постоянство F_C

Проектный расчет ЭМЖС включает в себя следующие этапы: выбор МЖ с $M_S = 10-40$ кА/м, задание $B_{\text{дmax}} = 0,4 - 1$ Тл, расчет конфигурации полюсных наконечников и зазора, определение положения МЖ в зазоре, расчет магнитной цепи, определение МДС, тока, провода и числа витков обмотки возбуждения, глубин погружения частиц, производительностей для легкой Q_L и тяжелой Q_T фракций. Увеличение высоты зоны сепарации h_c повышает точность сепарации. Это возможно при увеличении M_S и/или $B_{\text{дmax}}$. Рост M_S достигается за счет увеличения объемной концентрации магнитной фазы МЖ, что приводит к увеличению вязкости МЖ и, как следствие, к снижению производительности ЭМЖС. Рост $B_{\text{дmax}}$ возможен при увеличении МДС электромагнита.

Таким образом, разработанные математические модели и расчетные методики позволяют анализировать силы в ЭМЖС с учетом намагниченности и плотности МЖ, градиента напряженности магнитного поля, диаметра и плотности материала частиц. Предложенные модели движения частиц в ЭМЖС позволяют рассчитывать глубину, время погружения, траектории перемещения частиц, условия всплытия или погружения с учетом намагниченности, плотности, высоты столба и динамической вязкости МЖ, диаметра и материала частиц, высоты лотка подачи и начальной скорости частиц, длины и угла наклона полюсов, градиента напряженности магнитного поля. Разработанные модели для расчета формы поверхностей полюсных наконечников ЭМЖС позволяют определять конфигурацию полюсов, обеспечивающих постоянство силы сепарации с учетом намагниченности МЖ, высоты полюсных наконечников, градиента напряженности магнитного поля. Разработаны методики расчета и проектирования размеров активной зоны ЭМЖС с учетом плотности немагнитных частиц, размеров, производительности по легкой и тяжелой фракциям. Применение методик расчета ЭМЖС обеспечивает повышение точности разделения немагнитных материалов по плотности с погрешностью не более 7 %. Отмечено, что недостатком аналитических моделей является привязка к конструктивному исполнению зоны сепарации ЭМЖС, невозможность получения точного решения для нелинейных сред.

В третьей главе проведён численный анализ магнитных полей, сил и давлений на немагнитные частицы в ЭМЖС. Анализ магнитных полей выполнен методом конечных элементов. Использовались сетки с элементами мельче сепарируемых частиц, но крупнее наноразмерных ферромагнитных частиц коллоида МЖ. На рис. 8 представлены результаты расчета магнитного поля в зазоре ЭМЖС с немагнитной частицей квадратного сечения.

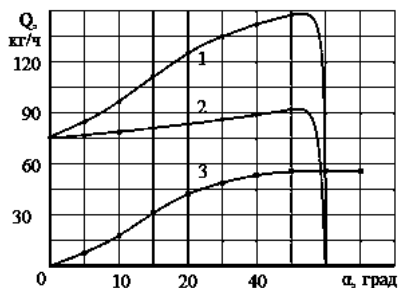


Рис. 7. Зависимость производительности ЭМЖС от α : 1 – суммарная, 2 – Q_T , 3 – Q_L

Результаты расчета в системе ELCUT программно экспортировались в пакет MS Excel, где рассчитывалось распределение давлений (рис. 9). Присутствие немагнитной частицы в зазоре вызывает перераспределение магнитного поля и изменение распределения избыточного давления Δp .

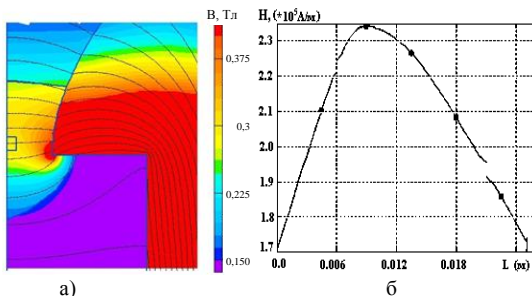


Рис. 8. Магнитное поле в ЭМЖ с квадратной немагнитной частицей: а) – линии магнитного потока и цветовая гамма индукции; б) – изменение напряженности по Y

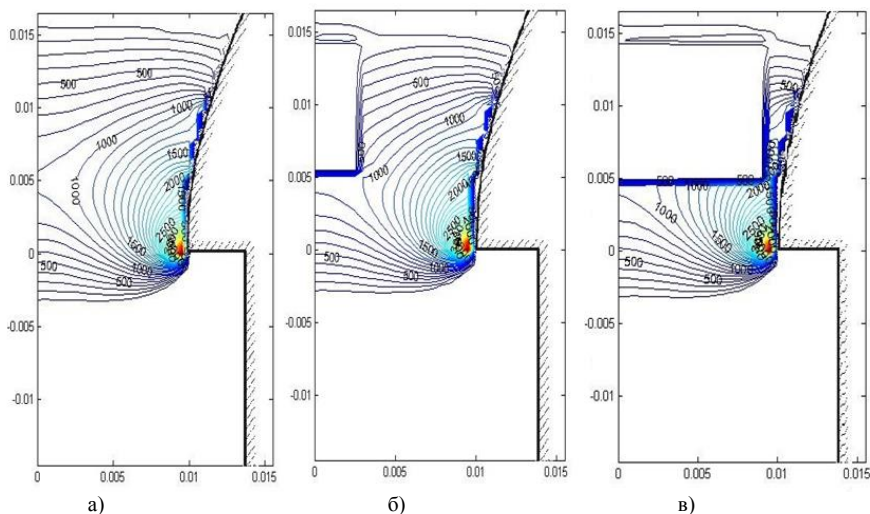


Рис. 9. Распределение избыточного давления ($\Delta p = p - p_0$) в МЖ: (а) – частиц нет; (б) – немагнитная частица $6 \times 9 \text{ мм}^2$; (в) – немагнитная частица $19 \times 10 \text{ мм}^2$

Изменение давлений по X на разных высотах зазора Y по нижней и верхней границам немагнитной частицы квадратного сечения представлено на рис. 10. F_s определялась по разнице давлений в МЖ на верхней и нижней границах тела. На рис. 11 представлены рассчитанные изменения удельной силы сепарации от размеров и объема немагнитной частицы. При увеличении заполнения зазора объемом немагнитной частицы происходит снижение градиента напряженности и соответствующей силы F_s . Для одиночного сферического тела с диаметром 90 % минимального зазора ЭМЖС уменьшение силы сепарации достигает 15 %, по сравнению с более мелкой частицей. Отклонение формы частицы при том же объеме от сферической уменьшает силу сепарации до 4-5 %. При заполнения 49 % всей зоны МЖ немагнитными частицами снижение магнитной силы сепарации достигает 34 %.

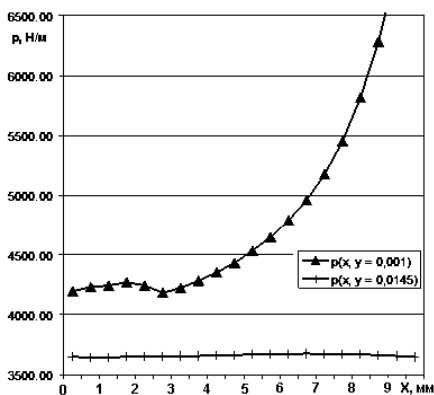


Рис. 10. Изменение давлений по X при разных Y в ЭМЖС с квадратной немагнитной частицей небольших размеров

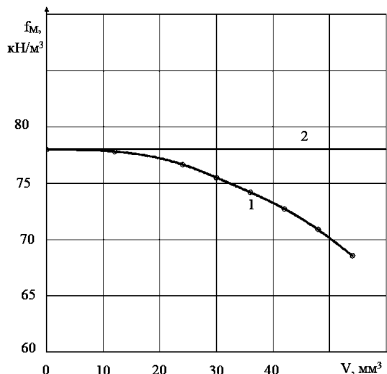


Рис. 11. Изменение расчетной удельной силы сепарации от объема немагнитной частицы: 1 – с учетом перераспределения магнитного поля, 2 – без учета перераспределения магнитного поля

Таким образом, разработанная методика позволяет рассчитывать перераспределение магнитного поля, усилий и давлений в зоне сепарации ЭМЖС по результатам конечно-элементного анализа магнитного поля в ЭМЖС с учетом нелинейностей магнитных характеристик магнитной системы и МЖ, формы и размеров немагнитных частиц, заполнения частицами объема МЖ.

Четвертая глава посвящена экспериментальному исследованию и совершенствованию конструкции ЭМЖС.

Опыты проводились на физической модели ЭМЖС (рис. 12). К полюсам электромагнита прикреплены полюсные наконечники рассчитанной формы. Применялась МЖ производства ИГЭУ с $M_s=17$ кА/м. Минимальный зазор между полюсами $\delta_{\min} = 19,5$ мм, высота столба МЖ $h=40$ мм. Регулировкой тока электромагнита I изменялась магнитная сила сепарации.



Рис. 12. Экспериментальная установка ЭМЖС

На рис. 13 представлены совпадающие, с различием не более 8 %, рассчитанные и измеренные датчиком Холла индукции в зазоре ЭМЖС по высоте столба МЖ.

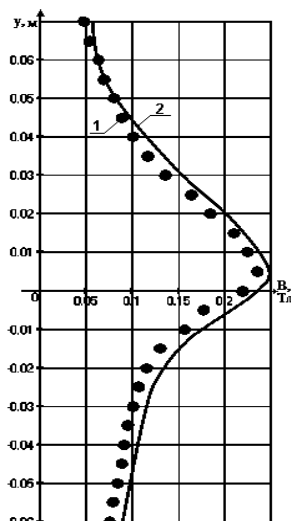


Рис. 13. Индукции по высоте столба МЖ в ЭМЖС: 1 - опыт; 2 - расчет

На рис. 14,а показано, что при $I=3$ А на поверхность МЖ магнитной силой сепарации выталкиваются тяжелая свинцовая (плотность $11,3$ г/см³), менее тяжелая медная (плотность $8,94$ г/см³) и легкая алюминиевая (плотность $2,7$ г/см³) частицы. При $I=1,6$ А (рис. 14,б) свинцовая частица погружается в МЖ, медная и алюминиевая частицы еще выталкиваются на поверхность МЖ. При $I=1,4$ А (рис. 14,в) на поверхности МЖ остается только алюминиевая частица.

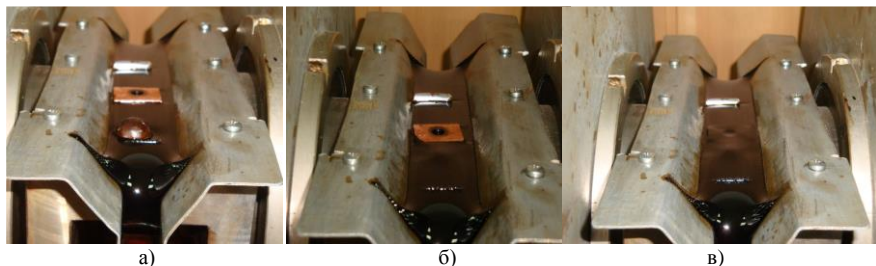


Рис. 14. Фото положений свинцовой, медной и алюминиевой частиц в зазоре ЭМЖС, выталкиваемых на поверхность МЖ при $I=3$ А, 1,6 А и 1,4 А, соответственно

Установлена зависимость $I_{\text{погр}}$ (при полном погружении свинцовой частицы в МЖ) и $I_{\text{пад}}$ (выпадении частицы из МЖ) от объема немагнитной частицы по отношению к объему МЖ, в частности d/δ (рис. 15). При заданном токе I градиент магнитного поля в области погружения меньше, чем в области падения частицы. Поэтому требуется ток погружения $I_{\text{погр}}$ больший, чем ток падения $I_{\text{пад}}$, для получения равных значений $|\nabla H|$. С увеличением d/δ $|\nabla H|$ в области частицы уменьшается и снижается F_C . Для поддержания $F_C = \text{const}$ необходимо увеличивать ток I .

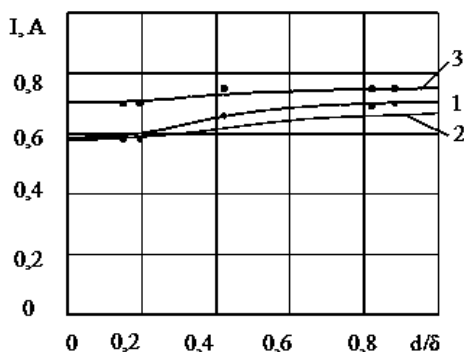


Рис. 15. Изменения токов при изменении d/δ : 1 - $I_{\text{пад}}$, опыт; 2 - $I_{\text{пад}}$, расчет; 3 - $I_{\text{погр}}$, опыт

Из расчетов магнитных полей и усилий выяснено, что F_C , действующая на немагнитное тело с $d=18$ мм ($d/\delta=0,92$), составляет 87% силы, действовавшей бы на такой же объем МЖ. Из эксперимента (рис. 15, график $I_{\text{пад}}$, опыт) следует, что соотношение сил составляет 0,83. Т.е. погрешность расчета F_C в этой точке, по сравнению с экспериментом, составляет 5%. При изменении d/δ во всём диапазоне погрешность расчета $I_{\text{пад}}$ и, соответственно F_C , не превышает 8 %, что свидетельствует об адекватности математических моделей.

Изменение формы частицы от сферической к дисковой, при одном и том же объеме частицы, сопровождается уменьшением F_C в пределах 5-7 %.

На рис. 16 представлено опытно выявленное влияние коэффициента заполнения зазора ЭМЖС свинцовыми частицами

частичными $k = \frac{(n \cdot V_q)}{V_{МЖ}}$ на ток всплытия

$I_{вспл.}$. Повышение заполнения объёма зазора ЭМЖС немагнитными частицами снижает напряженность и градиент напряженности магнитного поля в зазоре и снижение F_c , что требует повышения тока обмотки для всплытия этих частиц.

Для повышения функциональности ЭМЖС при сепарации многофракционных смесей немагнитных материалов с увеличенной производительностью разработана патентозащищенная конструкция ЭМЖС (рис. 17) (Золотая медаль 41-го Женевского Международного Салона инноваций «INVENTIONS GENEVA», 2013 г.). По длине наклонной поверхности ЭМЖС вместо одной применены несколько - K пар симметричных и параллельных полюсных наконечников. Межполюсный зазор ступенчатый из K участков и расширяющийся к выходному торцу ЭМЖС определяет число разделяемых фракций. При движения частиц по наклонной поверхности МЖ происходит последовательное разделение фракций по плотности на каждом участке межполюсного зазора. Повышение точности разделения фракций по плотности производится путем дополнительного регулирования напряженности магнитного поля в пределах каждого участка зазора, например, с помощью магнитных шунтов. При однократной загрузке сепарируемой смеси увеличивается количество разделяемых по плотности фракций, т.е. повышение функциональности, точности и производительности ЭМЖС.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования процессов сепарации немагнитных материалов по плотности на созданном опытном ЭМЖС подтвердили адекватность представленных математических моделей и методик расчетов, на основе которых разработана патентозащищенная конструкция ЭМЖС с повышенной функциональностью для сепарации многофракционных смесей немагнитных материалов.

В заключении изложены основные результаты работы.

В приложении приведены копии актов внедрений, диплома выставки.

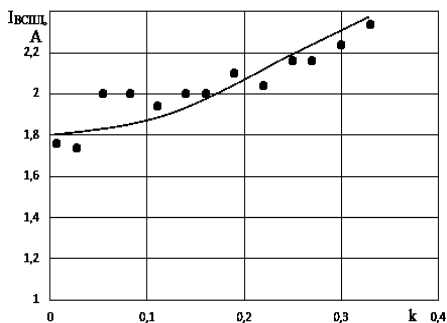


Рис. 16. Влияние коэффициента заполнения зазора ЭМЖС свинцовыми частицами на $I_{вспл.}$

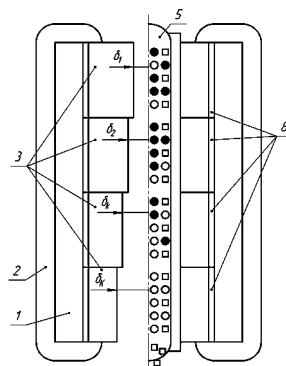


Рис. 17. Конструкция ЭМЖС на $K=4$ фракции

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации получены следующие основные результаты:

1. Конкретизированы требования, предъявляемые к сепарации немагнитных материалов в электромагнитных магнитожидкостных сепараторах (ЭМЖС) в части диапазона изменения плотностей разделяемых частиц, параметров магнитного поля, требуемых свойств магнитных жидкостей.

2. Разработана методика расчета силы сепарации, действующей на немагнитные частицы в неоднородном магнитном поле ЭМЖС.

3. Разработаны уточнённые математические модели ЭМЖС, выполнено конечно-элементное моделирование магнитного поля, позволившие учесть конфигурацию рабочей зоны ЭМЖС, нелинейность магнитных свойств материалов и магнитной жидкости. Получены картины распределений сил и давлений в рабочей зоне ЭМЖС.

4. Разработаны методики и программы расчетов движения немагнитных частиц в рабочей зоне ЭМЖС с учетом распределения магнитного поля, дисперсности, формы и плотности частиц (два Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ), реализованные на основе развитых математических моделей, которые позволяют анализировать процесс сепарации. При уменьшении в 3 раза градиента напряженности магнитного поля в зазоре ЭМЖС время движения частиц легкой фракции увеличивается в 2-6 раз за счет уменьшения магнитной силы сепарации, увеличения глубины погружения частиц. При уменьшении плотности материала в 4 раза время движения частиц увеличивается до 15-20 %. Уменьшение диаметра частиц снижает глубину погружения, вязкостную силу и время движения. Изменение формы частиц со сферической на плоскую изменяет характер движения частиц.

5. Исследована степень влияния заполнения рабочей зоны ЭМЖС немагнитными частицами на распределение магнитного поля, давлений и сил сепарации. При увеличении загрузки ЭМЖС немагнитными частицами уменьшается напряженность магнитного поля и сила сепарации. Для одиночного сферического тела с диаметром 90 % зазора сепаратора уменьшение силы сепарации достигает 15 %, по сравнению с мелкими частицами. Отклонение формы частицы от сферической уменьшает силу сепарации.

6. Разработаны методики формирования необходимого распределения магнитного поля в ЭМЖС, расчета и проектирования размеров активной зоны с учетом плотности немагнитных частиц, размеров, производительности ЭМЖС по легкой и тяжелой фракциям, применение которых обеспечивает повышение точности разделения материалов с погрешностью не более 7%.

7. Разработана патентозащищенная конструкция ЭМЖС повышенной функциональности для сепарации многофракционных смесей немагнитных материалов.

8. Создан опытный ЭМЖС и проведены экспериментальные исследования процессов сепарации немагнитных материалов по плотности. Экспериментальные исследования подтверждают результаты теоретических исследова-

ний с погрешностью не более 8 %.

Таким образом путем совершенствования конструкции, разработки и применения уточненных моделей, методик расчетов и проектирования достигнуто повышение эффективности электромагнитных магнитожидкостных сепараторов в части расширения функциональности (увеличение числа разделяемых фракций сепарируемых частиц) и повышения точности разделения (с погрешностью не более 7%) немагнитных материалов.

Полученные в диссертации результаты целесообразны к дальнейшему использованию в организациях, занимающихся обогащением природных ископаемых, в переработке промышленных отходов с целью извлечения цветных металлов, в учебном процессе ВУЗов.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В журналах, рекомендованных ВАК

1. 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. – № 2, 2011. – С. 54-57.

2. Казаков, Ю.Б. Механика сепарации частиц из концентрированной взвеси при неоднородной массовой силе / Ю.Б. Казаков, В.Е. Мизонов, Е.А. Баранцева, **В.А. Филиппов** // Вестник ИГЭУ - № 3, 2011. – С. 17-19.

3. Казаков, Ю.Б. Анализ движения немагнитных частиц в нанодисперсной магнитной жидкости гидростатического сепаратора / Ю.Б. Казаков, Ю.И. Страдомский, **В.А. Филиппов** // Перспективные материалы. – 2010. № 11. Ч.1 – С. 220-228.

4. Казаков, Ю.Б. Численное моделирование процессов в нанодисперсных магнитожидкостных системах / Ю.Б. Казаков, Ю.И. Страдомский, **В.А. Филиппов** // Перспективные материалы. – 2008, №6. ч.1. – с. 459 – 463.

Статья, индексированная в международной базе цитирования Scopus:

5. Мизонов, В.Е. Нелинейная ячеистая модель осаждения частиц в концентрированной суспензии / В.Е. Мизонов, Ю.Б. Казаков, Е.А. Баранцева, **В.А. Филиппов** // Известия ВУЗов. Химия и химическая технология. – 2011. – Т. 54. – Вып. 12. – С. 104-106.

В виде результатов интеллектуальной деятельности

6. 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. Оpubл. 10.10.2012. Бюл. N 28.

7. 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.

8. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2011617292 «Моделирование сепарации твёрдых частиц из

концентрированной суспензии» / В.Е. Мизонов, Ю.Б. Казаков, **В.А. Филиппов**, Е.А. Баранцева // Зарегистрировано 19.09.2011 г.

В других изданиях

9. **Филиппов**, В.А. Расчет производительности электромагнитного магнитожидкостного сепаратора немагнитных материалов // Вестник ИГЭУ. - № 1, 2020. – С. 45-52.

10. **Филиппов**, **В.А.** Магнитожидкостная сепарация и вторичная переработка электронного лома // Матер. Междунар. науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии». – Иваново, 2019. Т.3.- С. 210-212.

11. Страдомский, Ю.И. Этапы проектирования магнитожидкостного сепаратора дисперсных немагнитных материалов / Ю.И. Страдомский, **В.А. Филиппов** // Сб. научн. трудов 18-ой Междун. Плесской научн. конф. по нанодисперсным магнитным жидкостям – Иваново - Плес, 2018. - С. 178-186.

12. Страдомский, Ю.И. Проектный расчет магнитожидкостного сепаратора дисперсных немагнитных материалов / Ю.И. Страдомский, **В.А. Филиппов** // Материалы Междунар. научн.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (XIX Бенардосовские чтения). – Иваново, 2017. –Т. 3. - С. 211-214.

13. Казаков, Ю.Б. Математическая модель движения немагнитных частиц в рабочем зазоре гидростатического магнитожидкостного сепаратора. / Ю.Б. Казаков, Ю.И. Страдомский, **В.А. Филиппов** // Сб. научн. трудов 17-ой Междун. Плесской научн. конф. по нанодисперсным магнитным жидкостям – Иваново - Плес, 2016. - С. 178-186.

14. **Филиппов**, **В.А.** Исследование влияния заполнения зазора магнитожидкостного сепаратора немагнитными частицами на рабочий процесс / В.А. Филиппов, Страдомский Ю.И., И.М. Арефьев // "Физико-химические и прикладные проблемы магнитных дисперсных наносистем": Сб. трудов V Всеросс. научн. конф. - Ставрополь, 2015. - С. 266-270.

15. Kazakov, Yu.B. Calculation of the Force Operating on the Non-magnetic Body in Magnetic Liquid in the Presence of the Inhomogeneous Magnetic Field / Yu.B. Kazakov, Yu.I. Stradomsky, **V.A. Filippov** // 13th International Conference on Magnetic Fluids (ICMF-13). Abstract Book. – CSIR-National Physical Laboratory Dr. K.S. Krishnan Marg, 2013. New Delhi, India. P. 315-317.

16. Казаков, Ю.Б. Формирование конфигурации рабочей поверхности магнитной жидкости в магнитожидкостном сепараторе / Ю.Б. Казаков, Ю.И. Страдомский, **В.А. Филиппов** // Сб. научных трудов Междун. научно-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XVII Бенардосовские чтения). – Иваново: ИГЭУ, 2013. -Том 3. - С. 116-118.

17. **Филиппов**, **В.А.** Разработка программного комплекса расчета движения разделяемых частиц в магнитожидкостном сепараторе // Сборник научн. трудов 15-ой Междун. Плесской научн. конф. по нанодисперсным магнитным жидкостям. – Иваново - Плес, 2012. - С. 301-306.

18. Страдомский, Ю.И. Исследования на опытном образце магнитожидкостного сепаратора процессов разделения немагнитных материалов по плотности / Ю.И. Страдомский, **В.А. Филиппов**, И.М. Арефьев, Т.А. Арефьева, Ю.Б. Казаков // Сборник научн. трудов 15-ой Междун. Плесской научн. конф. по нанодисперсным магнитным жидкостям. – Иваново-Плес, 2012. - С. 294-300.

19. Казаков, Ю.Б. Моделирование и исследование регулируемой сепарации немагнитных материалов в магнитожидкостных электроустановках / Ю.Б. Казаков, Ю.И. Страдомский, **В.А. Филиппов** // Сб. научн. тр.: Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий. – Екатеринбург, 2011. - С. 171-177.

20. **Филиппов, В.А.** Влияние размера и формы немагнитных частиц на выталкивающую силу, действующую на них в гидростатическом магнитожидкостном сепараторе / В.А. Филиппов, Ю.И. Страдомский, Ю.Б. Казаков // "Радиоэлектроника, электротехника и энергетика": Тез. докл. 17 Междун. научн.-техн. конф. студ. и асп.. Т. 2. - Москва, 2011 г. - С. 23-24.

21. Kazakov, Y. Calculation of the force acting on nonmagnetic body in magnetic liquid in the presence of inhomogeneous magnetic field / Y. Kazakov, Y. Stradomskiy, **V. Filippov** // X International Conf. on Advanced Methods in the Theory of Electrical Engineering – Klatovy, Czech Republic. 2011. – P. II-9-10.

22. Казаков, Ю.Б. Сепараторы немагнитных материалов на основе нанодисперсных магнитных жидкостей / Ю.Б. Казаков, Ю.И. Страдомский, **В.А. Филиппов** // Труды XIII-ой Междун. конф. «Электромеханика, Электротехнологии, Электротехнические материалы и Компоненты» – Алушта, 2010. С. 13.

Личный вклад соискателя: в работах [2, 10, 22] автору принадлежит постановка задач исследования; в работах [1, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 15-17, 19-21] – разработка уточненных математических моделей, методик и программ, проведение расчётных исследований; в работах [14, 18] – разработка экспериментального образца ЭМЖС, проведение экспериментальных исследований и обработка полученных результатов; в работе [6] – обоснование усовершенствования конструкции ЭМЖС.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета Д 212.217.04
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
(протокол № 11 от 19 октября 2020 г.)

Заказ № ____ Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе.

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Отдел типографии и оперативной полиграфии
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244