

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Ивановский государственный энергетический университет
имени В.И. Ленина»

На правах рукописи

Филиппов Василий Александрович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ
МАГНИТОЖИДКОСТНЫХ СЕПАРАТОРОВ
НЕМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

**Диссертация на соискание
учёной степени кандидата технических наук**

Научный руководитель:
доктор технических наук
Казаков Юрий Борисович

Иваново 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. ПРОБЛЕМЫ И АНАЛИЗ СПОСОБОВ РАЗДЕЛЕНИЯ НЕМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ. ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МАГНИТОЖИДКОСТНЫХ СЕПАРАТОРОВ	11
1.1. Загрязнение окружающей среды и сепарация немагнитных материалов	11
1.2. Аэро- и гидродинамическая сепарация.....	14
1.3. Электродинамическая сепарация	16
1.4. Магнитные жидкости и эффект выталкивания немагнитных тел из них.	19
1.5. Разделение немагнитных материалов по плотности в электромагнитном магнитожидкостном сепараторе.....	21
1.6. Особенности конструкций и эффективность работы электромагнитных магнитожидкостных сепараторов.....	24
1.7. Сравнительный анализ способов сепарации немагнитных материалов ..	31
1.8. Выводы и постановка задач исследования	34
2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ НЕМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МАГНИТОЖИДКОСТНЫХ СЕПАРАТОРАХ	37
2.1. Давления и силы, действующие на немагнитное тело в магнитной жидкости электромагнитного магнитожидкостного сепаратора.....	37
2.2. Математическое моделирование процесса движения немагнитных частиц в зоне разделения электромагнитного магнитожидкостного сепаратора	39
2.3. Математическое моделирование формы поверхностей полюсных наконечников электромагнитного магнитожидкостного сепаратора, обеспечивающих постоянство сепарирующей силы.....	47
2.4. Методика проектирования электромагнитных магнитожидкостных сепараторов	53
2.4.1. Выбор магнитной жидкости.	54
2.4.2. Выбор геометрии рабочего зазора электромагнитного магнитожидкостного сепаратора.	55

2.4.3. Определение положения магнитной жидкости в рабочем зазоре электромагнитного магнитожидкостного сепаратора.	57
2.4.4. Расчет производительности электромагнитного магнитожидкостного сепаратора.	59
2.4.5. Тепловой расчет обмотки возбуждения электромагнитного магнитожидкостного сепаратора.	62
2.5. Выводы	63
3. КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ, СИЛ И ДАВЛЕНИЯ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МАГНИТОЖИДКОСТНЫХ СЕПАРАТОРАХ НЕМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	65
3.1. Конечно-элементная модель магнитного поля и распределения давления в зазоре электромагнитного магнитожидкостного сепаратора.....	65
3.2. Анализ результатов конечно-элементного моделирования магнитного поля сепаратора	69
3.3. Анализ результатов численного моделирования распределения давления в зазоре электромагнитного магнитожидкостного сепаратора.....	72
3.4. Выводы	78
4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МАГНИТОЖИДКОСТНОГО СЕПАРАТОРА	79
4.1. Описание опытного лабораторного образца сепаратора	79
4.2. Исследование влияния размера и формы немагнитных частиц на на силу сепарации	83
4.3. Исследование влияния размера и формы немагнитных частиц на процесс их сепарации	86
4.4. Исследование влияния плотности частиц на процесс сепарации	91
4.5. Исследование влияния заполнения зазора сепаратора немагнитными частицами на силу сепарации	94
4.6. Экспериментальное исследование процессов разделения немагнитных материалов по плотности	97

4.7. Совершенствование конструкции электромагнитного магнитожидкостного сепаратора для разделения многофракционных смесей	104
4.8. Выводы	109
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	111
Библиографический список.....	113
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	129

ВВЕДЕНИЕ

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 вычленения 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 противоположенная, 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 НПИ (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 проектирования, 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 зазора сепаратора, изменения формы поверхности МЖ, влияния перераспределения магнитного поля вследствие заполнения рабочего зазора 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.

Благодарности. Автор диссертации выражает искреннюю благодарность к.т.н., доценту кафедры электромеханика ФГБОУВО «ИГЭУ» Страдомскому Юрию Иосифовичу. Без его наставлений и непосредственного участия данная работа никогда бы не состоялась.

1. ПРОБЛЕМЫ И АНАЛИЗ СПОСОБОВ РАЗДЕЛЕНИЯ НЕМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ. ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МАГНИТОЖИДКОСТНЫХ СЕПАРАТОРОВ

1.1. Загрязнение окружающей среды и сепарация немагнитных материалов

В настоящее время очень остро встает вопрос вторичного использования материалов. Полигоны для хранения бытовых и промышленных отходов занимают все большие площади, отравляя почву и воздух, и делают невозможным проживание на территории в десятки километров вокруг них [4]. В Российской Федерации начата большая работа по ликвидации свалок, переработке отходов производства и потребления. Если раньше речь шла в первую очередь об уничтожении нежелательных продуктов жизнедеятельности, то сейчас ограниченные природные ресурсы, рост цен на сырье и политическая зависимость некоторых поставщиков сырья привели к новому пониманию окружающей среды. За последние десятилетия использование отходов во многих странах, превратилось в замкнутый хозяйственный цикл. Сегодня эту отрасль называют также промышленностью вторичного сырья. В последние годы в Европе постепенно снижается доля утилизации отходов в пользу их переработки. Причиной этому являются также правовые нормы, например, запрет на организацию свалок. Для всех видов отходов (например, смешанных бытовых отходов, органических отходов, синтетических материалов) существует целый ряд испытанных технологий переработки, начиная с переработки на топливо-заменители до методов переработки для производства новых продуктов [3].

С каждым годом в мире увеличиваются объемы электронных отходов, в 2016 году их было произведено более 40 млн т. В будущем ситуация будет только ухудшаться: предполагается, что в начале следующего десятилетия в мире за год будет выбрасываться не менее 50 млн т электронного лома, представляющего угрозу для человеческого здоровья и окружающей среды.

В докладе, подготовленном Международным союзом электросвязи ООН (International Telecommunication Union) и Международной ассоциацией твердых отходов (International Solid Waste Association, ISWA) [34], отмечается, что больше всего электронного мусора в 2016 г. сгенерировала Азия – 18,2 млн т. На втором месте Европа – 12,3 млн т, а далее следуют Северная и Южная Америка (11,3 млн т), Африка (2,2 млн т) и Океания (0,7 млн т). Хотя Океания замыкает список, здесь отмечены самые высокие объемы производства электронного мусора на душу населения – 17,3 кг на человека (в среднем по миру – 6,1 кг). Чуть ниже показатель в Европе – 16,6 кг, в Северной и Южной Америке – 11,6 кг, в Азии – 4,2 кг, в Африке – 1,9 кг. Из отчета следует, что больше всего в 2016 г. было выброшено небольшой электроники и крупногабаритной техники – 16,8 и 9,1 млн т соответственно. На долю теплообменного оборудования (кондиционеры, холодильники) пришлось 7,6 млн т, дисплеев 6,6 млн т, малой электроники и электрических ламп – 3,9 и 0,7 млн т соответственно. Также отмечается, что в 2016 г. лишь 20 % электронного лома, или 8,9 млн т, было надлежащим образом переработано, а остальное оказалось на свалках или мусоросжигательных заводах [4].

Непригодные для дальнейшего использования приборы и материалы могут содержать ценные природные ископаемые, такие как золото, серебро, медь, платина и др. Их грамотная переработка может приносить тройную пользу:

- снижение загрязнения окружающей среды;
- сохранение природных ресурсов;
- возвращение в производство цветных, драгоценных металлов и других материалов.

Так, например, в россыпных месторождениях содержание золота составляет до 0,1 – 0,5 г/т руды, в коренных рудах 1 – 5 г/т. Во вторичном сырье содержание золота достигает 100 г/т и даже 100 кг/т. Доля благородных металлов, которые удастся получить из вторичного сырья, достигает 20 – 50 %. В 2016 г. стоимость подобных материалов, не извлеченных из выброшенной электроники, составила 55 млрд долл. [4, 35, 108].

Чрезвычайно велик потенциал применения вторичного сырья в старых автомобилях: сталь, алюминий, медь, свинец. В автомобильных катализаторах содержатся платина, палладий, родий. После предварительной обработки старые транспортные средства измельчаются в больших шредерах. После этого цветные металлы отделяются от черных металлов. Основной целью всех установок по переработке металлолома является получение качественного лома с высокой плотностью, чистотой и однородной зернистостью [3]. Поэтому задача сепарации немагнитных материалов является актуальной и значимой.

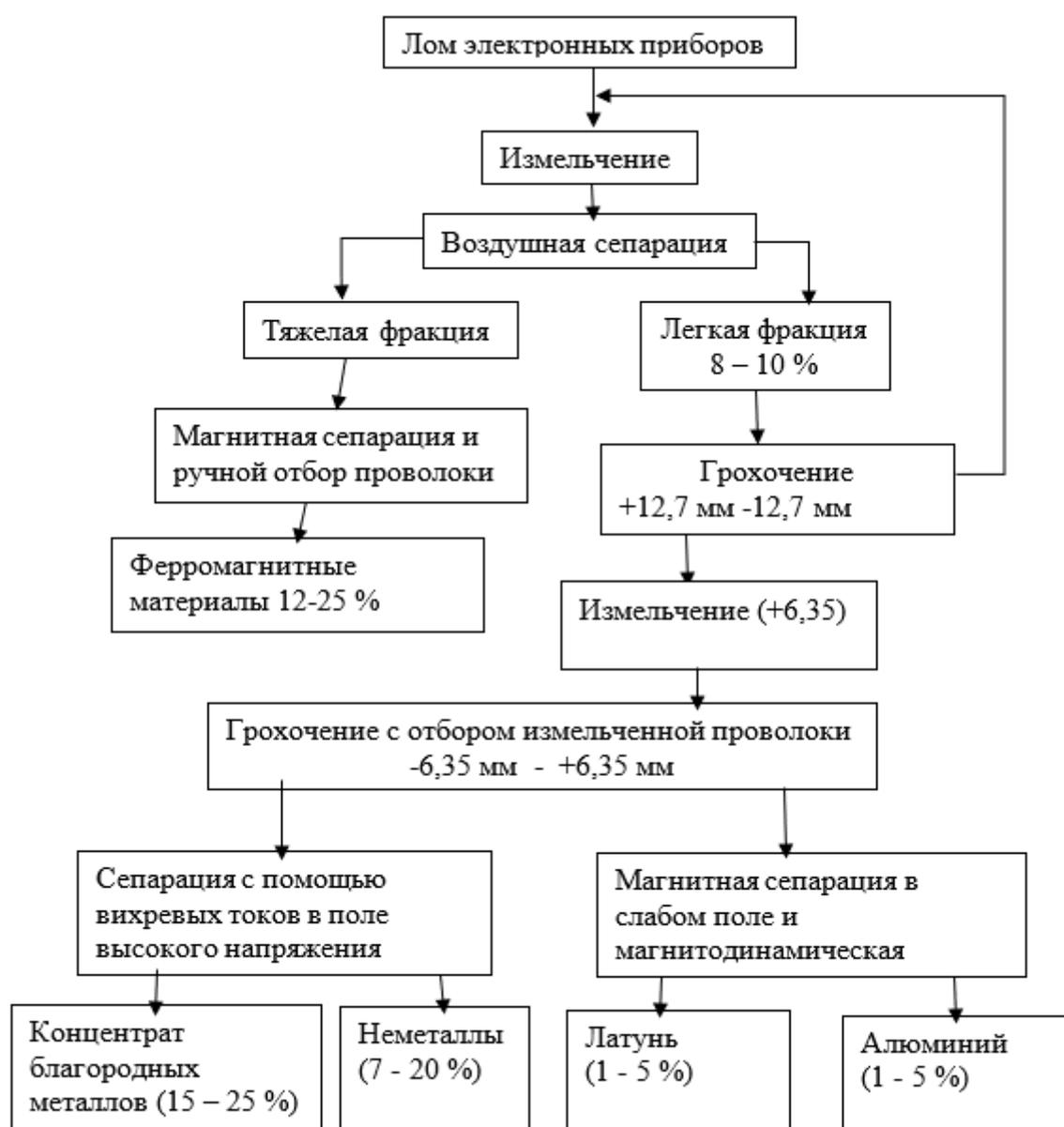


Рисунок 1.1. Технологическая схема переработки электронного лома [1]

В современной практике преимущественно используются предварительное измельчение поступающих на переработку отходов. В результате получается

многокомпонентная смесь, которую необходимо разделить по физическим свойствам - то есть сортировать или сепарировать. Для сортировки применяют грохоты, гидро- и аэродинамические сепараторы, электродинамические сепараторы и др. Магнитная сепарация в схеме переработки зачастую стоит первой, после которой в смеси для переработки отсутствуют магнитные включения. Дальнейшее разделение смеси происходит по различию тех или иных физических свойств материалов [1, 66, 109]. Примерная технологическая схема переработки электронного лома изображена на рисунке 1.1.

1.2. Аэро- и гидродинамическая сепарация

В аэродинамических сепараторах (рисунок 1.2, а) несущей средой является газ. В основе процесса сепарации лежит движение частиц в зоне разделения под действием противоположно направленных сил, по-разному зависящих от размера и плотности этих частиц. Одной из этих сил является сила аэродинамического сопротивления при относительном движении частиц в потоке газа:

$$F_{AD} = k_{AD} \cdot v^{\alpha} \cdot d^2, \quad (1.1)$$

другой сила тяжести:

$$F_T = k_T \cdot \rho \cdot d^3. \quad (1.2)$$

Здесь k_{AD} , k_T – коэффициенты пропорциональности, v – скорость относительного движения частицы в потоке газа, ρ – плотность частицы, d – диаметр частицы, α – коэффициент степени скорости, зависящий от формы частицы, относительной скорости потока газа и его плотности.

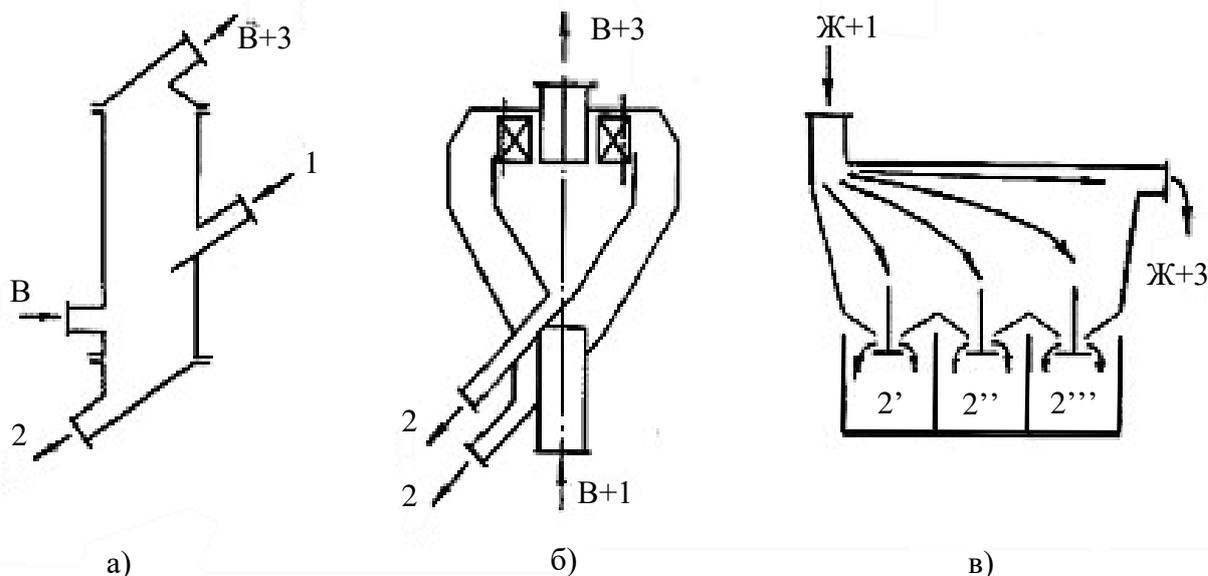


Рисунок 1.2. Основные типы сепараторов: а – аэродинамический, б – центробежный, в – гидравлический. 1 – исходный продукт, 2 – крупный (тяжёлый) продукт, 3 – мелкий (лёгкий) продукт, В – воздух, Ж – жидкость.

На рисунке 1.2, а представлена принципиальная схема типичного аэродинамического сепаратора: 1 – загрузка исходного продукта, В – подача воздуха, средняя часть – зона сепарации, 2 – выход крупного (тяжёлого) продукта, В+3 – выход мелкого (легкого) продукта с воздухом.

Центробежные сепараторы (рисунок 1.2, б) относятся к той же группе, что и аэродинамические сепараторы. Здесь: В+1 – загрузка исходного продукта вместе с несущим газом, средняя часть – зона сепарации, 2 – выход крупного (тяжёлого) продукта, В+3 – выход мелкого (легкого) продукта с воздухом.

В центробежных сепараторах роль силы тяжести играют центробежные силы:

$$F_{ЦБ} = k_{ЦБ} \cdot \omega^2 \cdot \rho \cdot d^3, \quad (1.3)$$

где $k_{ЦБ}$ – коэффициент пропорциональности, ω – круговая скорость движения частиц в области разделения.

Гидравлические сепараторы (рисунок 1.2, в) построены на тех же принципах, что и аэродинамические сепараторы, но в них в качестве несущей среды используется жидкость. Здесь: Ж+1 – подача исходного материала с потоком жидкости, 2', 2'', 2''' – крупный (тяжёлый) продукт различный по крупности (плотности) соответственно, Ж+3 – мелкий (легкий) продукт с потоком жидкости.

К недостаткам данного типа сепараторов можно отнести следующее:

- с уменьшением размеров сепарируемых частиц эффективность установок сепарации снижается;
- зависимость развиваемых усилий от размера сепарируемых частиц, и как следствие необходимость предварительной сортировки материала по крупности.

1.3. Электродинамическая сепарация

При электродинамической сепарации в движущихся электропроводящих частицах наводятся вихревые токи, которые взаимодействуя с полем возбудителя создают электродинамические усилия (ЭДУ). Принцип разделения базируется на разном соотношении ЭДУ и сил сопротивления движению у различных материалов.

Первые теоретические работы по электродинамической сепарации были выполнены Сермонсом Г.Я. и Лапицким В.Н. Сегодня занимаются разработкой, изготовлением сепараторов и внедрением в производство в Санкт-Петербурге (Шнеерсон Г.А.), в Екатеринбурге (Сарапулов Ф.Н., Коняев А.Ю., Назаров С.Л., Багин Д.Н.) [59-64, 67], в Москве (Соколова Е.М., Шубов Л.Я.). Разработкой электродинамических сепараторов активно занимались Bauer J., Lengfelder W. и Neubert K. в Германии; Wells J. и Rano R. в США. В России электродинамические сепараторы применялись для извлечения мелкого металла Звегинцевым А.Г. (г. Красноярск), Афанасенко С.И. (г. Новосибирск), Сочуговым Н.С. (г. Томск), Мязиным В.П. и Дядиным В.И. (г. Чита) [45, 80].

В электродинамическом сепараторе с пульсирующим полем высокой частоты (рисунок 1.3) [70, 97] разделяемая смесь лентой конвейера подается в зону сепарации. ЭДУ, действующие на частицы, выталкивают их из поля. Не проводящие электрический ток частицы остаются неподвижными.

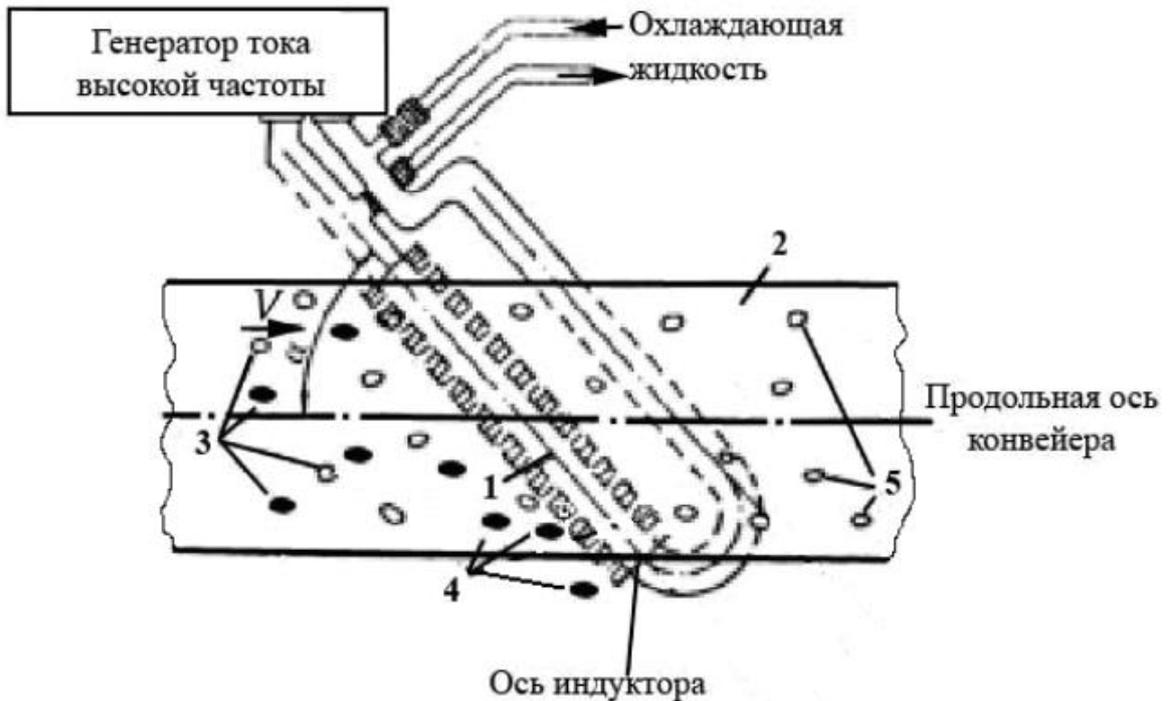


Рисунок 1.3. Электродинамический сепаратор с пульсирующим полем высокой частоты СЭД1-100/8:

1 – электромагнитная система, включающая в себя индуктор с водяным охлаждением и магнитопровод; 2 – лента конвейера; 3 – сепарируемая смесь, состоящая из электропроводных 4 и неэлектропроводных 5 частиц. [33, 70, 97]

На рисунке 1.4 [14] схематично представлен статический электродинамический сепаратор с возбуждением от постоянных магнитов, который представляет из себя наклонную поверхность с вмонтированными постоянными магнитами, направление намагниченности которых чередуется.

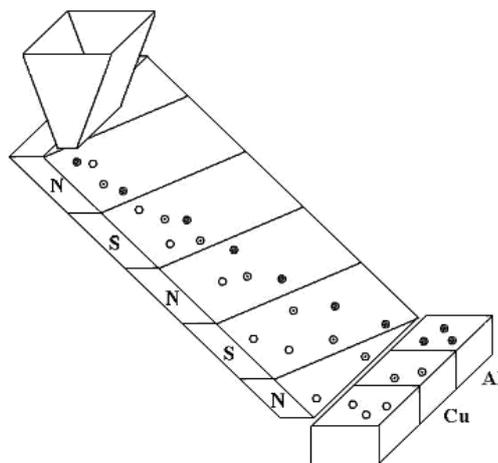


Рисунок 1.4. Сепаратор с неоднородным полем [14, 33]

Подаваемый сверху материал, который предварительно измельчается и разделяется по крупности, движется в зоне разделения под действием силы

тяжести. Поперечная направлению движения составляющая ЭДУ выносит электропроводные частицы из потока разделяемой смеси. На траекторию частицы основное влияние оказывает отношение удельного сопротивления к плотности этой частицы.

Возможно применение электродинамических сепараторов с бегущим магнитным полем (рисунок 1.5). Источниками такого поля могут быть одно- или двухсторонние линейные индукторы (рисунок 1.5, а-б), вращающиеся магнитные системы (рисунок 1.5, в), а также возбуждители с изменением величины магнитного поля путем вращения ротора с неоднородной магнитной проводимостью (рисунок 1.5, г) [8, 11-13, 15, 16, 39, 40, 65, 73, 77].

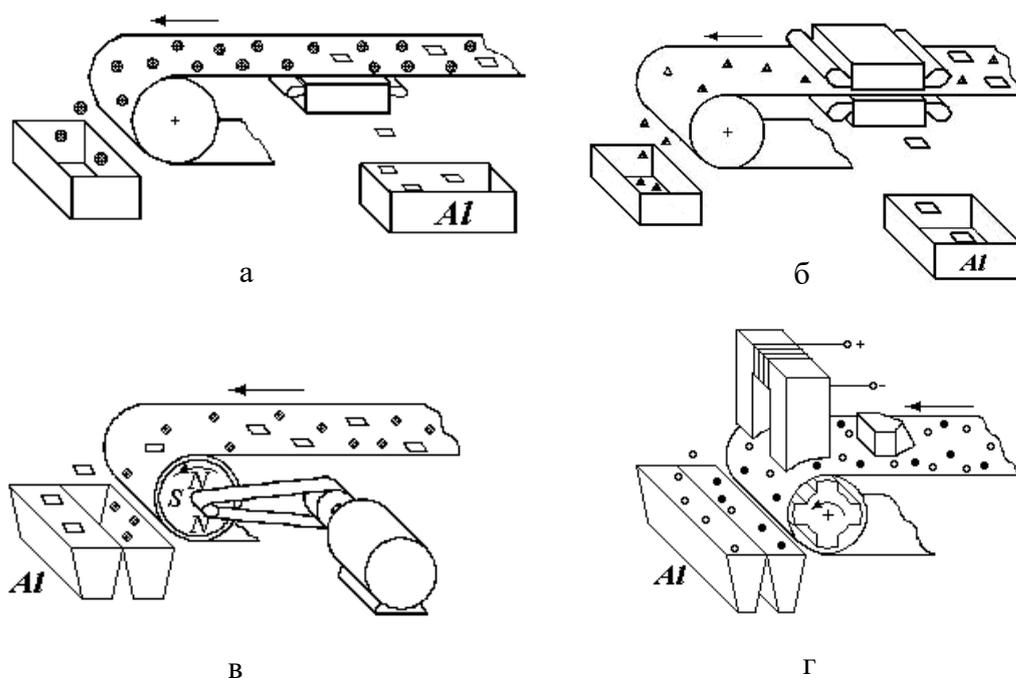


Рисунок 1.5. Электродинамические сепараторы с бегущим магнитным полем

Из анализа вышеперечисленных способов следует, что в основе процесса электродинамической сепарации лежит движение частиц в зоне разделения под действием разнонаправленных сил, по-своему зависящих от размера, плотности и электропроводности этих частиц. Одной из этих сил является электродинамическая сила при относительном движении электропроводящих частиц в магнитном поле:

$$F_{\text{ЭД}} = k_{\text{ЭД}} \cdot \gamma \cdot d^3, \quad (1.4)$$

другой сила трения:

$$F_{\text{ТР}} = k_{\text{ТР}} \cdot \rho \cdot d^3. \quad (1.5)$$

Здесь $k_{ЭД}$, $k_{ТР}$ – коэффициенты пропорциональности, γ – удельная электропроводность частицы.

К недостаткам данного типа сепараторов можно отнести следующее:

- Некоторые типы электродинамических сепараторов не способны отделять диэлектрики от проводящих материалов, и как следствие невозможность разделения одних материалов от других.

- Существенная зависимость ЭДУ от скорости движения сепарируемого материала в зоне разделения.

- Зависимость эффективности установок от размеров разделяемых частиц. Эффективность обычно тем ниже, чем мельче частицы [86].

- Зависимость развиваемых усилий от размера сепарируемых частиц, и как следствие необходимость предварительной сортировки материала по крупности.

- Не возможность разделения материалов с электропроводностью ниже критической.

- Неоднозначность разделения материалов – для разных материалов результирующая сила может быть одинакова.

1.4. Магнитные жидкости и эффект выталкивания немагнитных тел из них

Нанодисперсные магнитные жидкости (МЖ) представляет собой устойчивый коллоидный раствор супердисперсного ферромагнитного материала (дисперсная фаза) в какой-либо жидкости (дисперсионная среда). Коллоидный раствор получается устойчивым, если диаметр твердых магнитных частиц составляет менее 10 нм. В качестве магнитного материала чаще применяются магнетит Fe_3O_4 и карбонильное железо Fe . Вид дисперсионной среды зависит от назначения МЖ. Это может быть вакуумное масло, кремнийорганические жидкости, минеральные масла, керосин, вода и др. МЖ должна быть устойчивым коллоидным раствором, т.е. твердые магнитные частицы не должны слипаться друг с другом, образуя агрегаты и выпадать в осадок. Для этого магнитные частицы покрывают

молекулярным слоем поверхностно-активного вещества (ПАВ) толщиной порядка 2 нм (рисунок 1.6). Магнетитовые МЖ имеют объемную концентрацию магнетита $0,1 \div 0,14$, магнитные свойства (рисунок 1.7) с нелинейной характеристикой намагничивания и намагниченность насыщения $M_S = 25 \div 40$ кА/м.

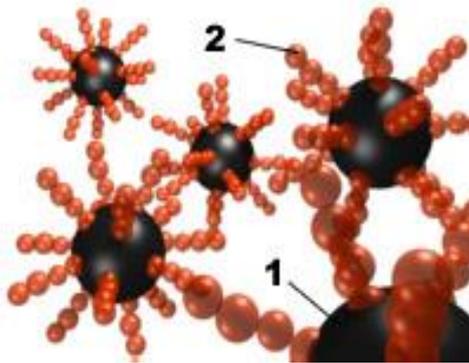


Рисунок 1.6. Структура магнитной жидкости: 1 - ферромагнитные частицы 10-40 нм; 2 - поверхностно-активное вещество 2-4 нм; в жидкости-носителе

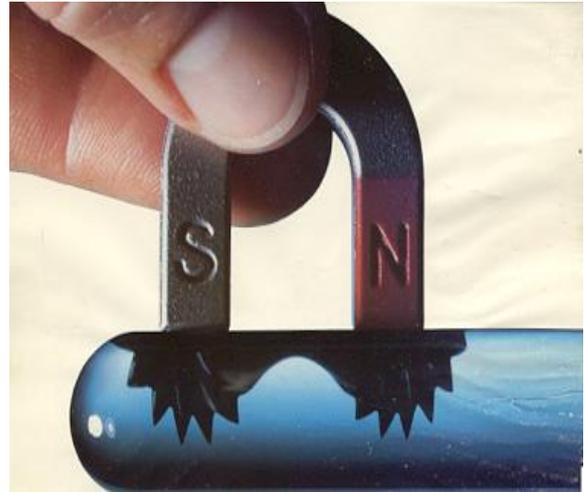


Рисунок 1.7. магнитные свойства магнитной жидкости

Исследованиями МЖ занимаются в МГУ, УрФУ, СКФУ, ЮзГУ, ЯрГТУ, ИГЭУ [17, 18, 31, 32, 37, 58, 72, 74, 76, 81, 82, 88, 90-93, 105].

МЖ обладают рядом уникальных свойств: намагниченностью и текучестью; реагированием на влияние магнитного поля вязкостных, электрических, тепловых, акустических, оптических и других физических свойств МЖ; в неоднородном магнитном поле на немагнитные тела, погруженные в МЖ, действует дополнительная Архимедова сила. Последний из вышперечисленных физических эффектов является основой для создания сепараторов, разделяющих немагнитные материалы по плотности.

Путем воздействия на МЖ неоднородным магнитным полем можно обеспечить всплывание на ее поверхность самых тяжелых немагнитных металлов вплоть до золота, плотность которого $19,3 \cdot 10^3$ кг/м³. В МЖ при наличии неоднородного магнитного поля на немагнитное тело с объемом V_T действует дополнительная сила – сила сепарации F_c , выталкивающая тело в область более слабого поля,

$$\bar{F}_C = -\mu_0 M_{cp} V_T |\text{grad}H| \quad (1.6)$$

Величина и направление этой силы могут широко варьироваться и определяются соотношением (1.6). Рассмотренный физический эффект нашел применение на практике для разделения немагнитных материалов по плотностям.

1.5. Разделение немагнитных материалов по плотности в электромагнитном магнитожидкостном сепараторе

Перспективным методом регулируемого разделения немагнитных материалов по плотностям является магнитожидкостная сепарация. Теоретические работы по магнитожидкостной сепарации были 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 [6, 36, 41, 43, 79, 110].

Основную часть электромагнитного гравитационного магнитожидкостного сепаратора составляет электромагнит постоянного тока (рисунок 1.8). Между полюсными наконечниками (поз.1) создается рабочий зазор, куда помещается МЖ (поз.4). За счет специального профиля полюсных наконечников в рабочем зазоре создается неоднородное магнитное поле, обеспечивающее дополнительную магнитную силу, действующую на немагнитное тело и выталкивающую его из МЖ. Электромагнитный гравитационный магнитожидкостный сепаратор относится к классу электромагнитных аппаратов.

В верхней части зазора, являющейся основной, градиент напряженности магнитного поля ∇H совпадает по направлению с ускорением свободного падения \bar{g} . Положение МЖ согласно уравнению Бернулли, определяется соотношением

$$\rho_{МЖ} \cdot g \cdot (y_C - y_E) = \mu_0 \int_{H_E}^{H_C} M \cdot dH, \quad (1.7)$$

где $\rho_{МЖ}$ – плотность магнитной жидкости, y_C, y_E – положение поверхности МЖ в верхней и нижней точках, H_C, H_E – напряженность магнитного поля в этих точках, M – намагниченность магнитной жидкости.

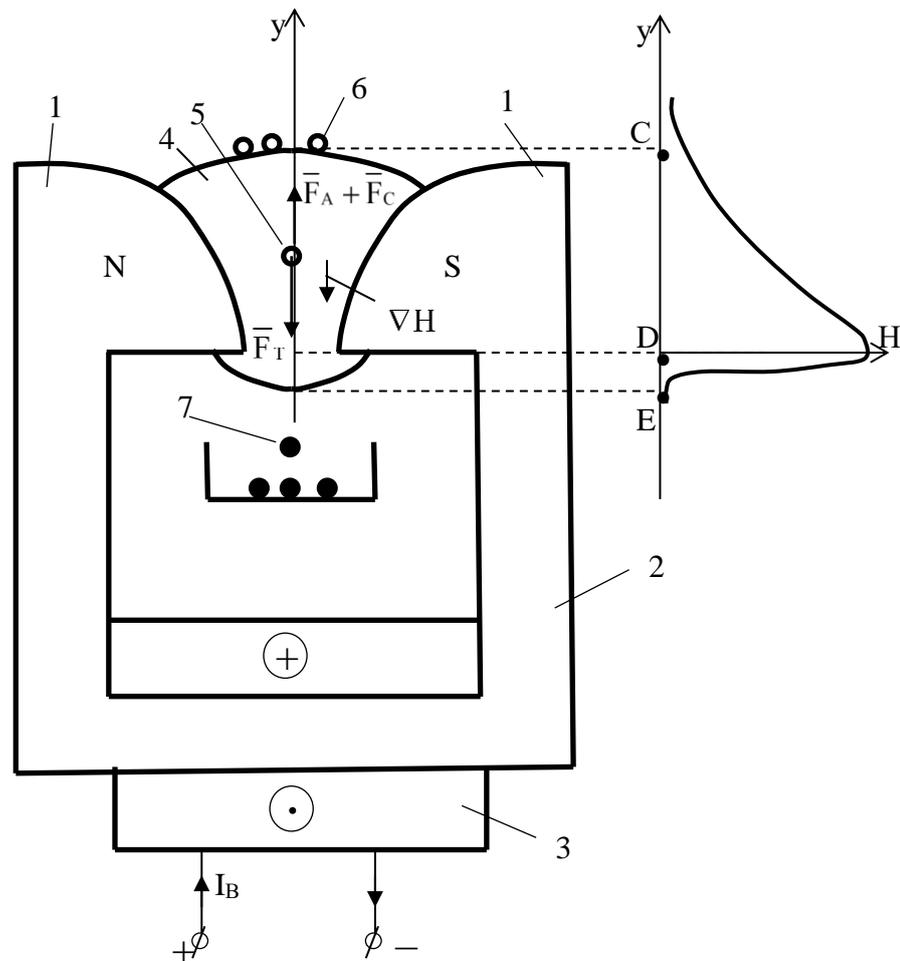


Рисунок 1.8. Принципиальная конструкция электромагнитного магнитожидкостного сепаратора. 1 – полюсные наконечники, 2 – магнитопровод, 3 – обмотка возбуждения, 4 – магнитная жидкость, 5 – частица в магнитной жидкости, 6 – частицы легкой фракции, 7 – частицы тяжелой фракции

При воздействии магнитного поля возникает “псевдоутяжеление” МЖ и на погруженные в МЖ немагнитные тела, действует дополнительная Архимедова сила. Таким образом в МЖ на немагнитную частицу поз. 5 (рисунок 1.8) с плотностью ρ и объемом V в неоднородном магнитном поле действуют три силы: сила тяжести F_T , выталкивающая Архимедова сила F_A и сила сепарации F_C . На рисунке 1.8 представлена схема действия сил на немагнитную частицу в электромагнитном магнитожидкостном сепараторе (ЭМЖС) с разделением исходного материала на две фракции, условно принимаемые за лёгкую 6 и выпадающую в осадок тяжёлую 7.

Сила тяжести

$$\bar{F}_T = \rho \cdot \bar{g} \cdot V. \quad (1.8)$$

Выталкивающая сила Архимеда

$$\bar{F}_A = -\rho_{\text{МЖ}} \cdot \bar{g} \cdot V \quad (1.9)$$

Магнитная сила со стороны МЖ, обусловленная наличием у МЖ магнитных свойств

$$\bar{F}_M = \mu_0 M V \cdot \overline{\nabla H} = -\bar{F}_C \quad (1.10)$$

В выражении (1.10): M – намагниченность МЖ в точке расположения центра объема частицы при условии, что частица отсутствует; $\overline{\nabla H}$ – вектор градиента напряженности в той же точке. Выражение (1.10) справедливо, если немагнитная частица (или совокупность таких частиц) не изменяют картину поля в рабочем зазоре магнитожидкостного сепаратора.

Если направления силы тяжести ($\rho_{\text{МЖ}} \cdot g$) и магнитной силы F_M совпадают, то возникает «псевдоутяжеление» МЖ и эффективная плотность МЖ

$$\rho_{\text{эфМЖ}} = \rho_{\text{МЖ}} + F_M/g$$

превышает плотность $\rho_{\text{МЖ}}$ МЖ при отсутствии магнитного поля.

Изменение интенсивности магнитного поля в зазоре ЭМЖС путем регулирования тока в обмотке электромагнита изменяет эффективную плотность МЖ и силу выталкивания немагнитных тел из МЖ.

При выполнении условия

$$F_T < (F_A + F_C) \quad (1.11)$$

частица всплывает на поверхность МЖ,

при условии

$$F_T > (F_A + F_C) \quad (1.12)$$

она падает вниз.

Тяжелые частицы (поз. 7 на рисунке 1.8) попадают в специальный контейнер, расположенный под полюсными наконечниками. Для сбора легких частиц создается наклон полюсов сепаратора и, как следствие поверхности МЖ, в направлении, перпендикулярном плоскости рисунка 1.8. Легкие частицы скатываются по наклонной поверхности МЖ в соответствующий контейнер.

При использовании выражений (1.8÷1.10) условия разделения частиц будут следующими:

- условие всплывания частиц

$$\mu_0 \cdot M \cdot |\nabla H| > (\rho - \rho_{\text{МЖ}}) g,$$

- условие погружения частиц

$$\mu_0 \cdot M \cdot |\nabla H| < (\rho - \rho_{\text{МЖ}}) g.$$

С использованием магнитожидкостной сепарации возможная технологическая схема переработки электронного лома представлена на рисунке 1.9.

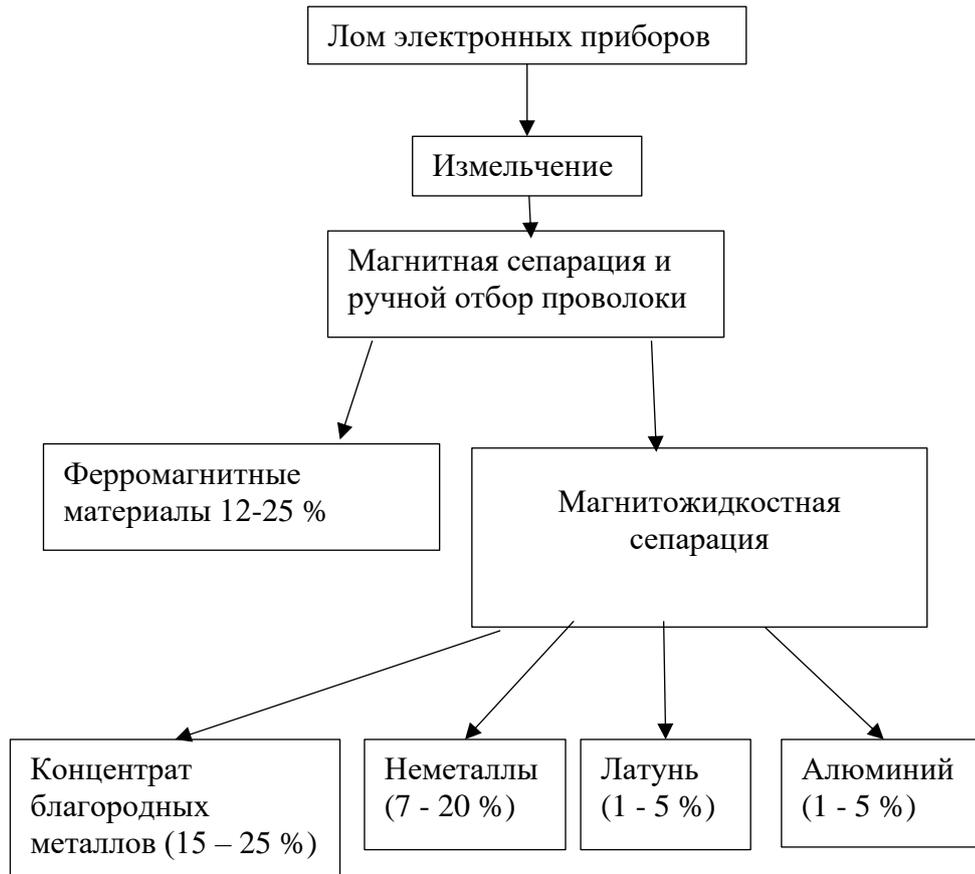


Рисунок 1.9. Возможная технологическая схема переработки электронного лома при применении магнитожидкостной сепарации

1.6. Особенности конструкций и эффективность работы электромагнитных магнитожидкостных сепараторов

В настоящее время существуют опытные и полупромышленные образцы электромагнитных магнитожидкостных сепараторов. Одной из областей промышленного применения ЭМЖС в настоящее время является разделение

минерального сырья, в частности, гравитационных концентратов россыпных месторождений (ГКРМ). Возможности использования здесь ЭМЖС ограничиваются требованием предварительной магнитной сепарации исходного материала. Таким образом, для проведения доводочных операций по извлечению шлихового золота методом магнитожидкостной сепарации потребовалось создание оборудования (КСЗ - комплекс оборудования для селекции золота), состоящего из трёх типов сепараторов: для извлечения сильномагнитных минералов, слабомагнитных минералов и магнитожидкостная сепарация. Первый такой комплекс был установлен и пущен в постоянную эксплуатацию в 1989 году на горно-обогатительном комбинате (ГОК) «Алданзолото».

Для заключительной стадии обогащения из немагнитного продукта сепаратора ССМ разработан типоразмерный ряд ЭМЖС различной производительности (10 – 35 кг/час). Эти сепараторы различаются формой полюсных наконечников, производительностью в названных пределах, различными схемами подачи сепарируемого материала в рабочую зону и разгрузки лёгкой и тяжёлой фракций и т.д. В связи с большой разницей плотностей шлихового золота и остальных минералов ГКРМ в ряде сепараторов отказались от постоянства выталкивающей силы в рабочей зоне магнитожидкостного сепаратора, а основное внимание уделялось способу подачи сепарируемого материала в рабочую зону, позволяющему минимизировать потери золота, а также проводить сепарацию при минимальной плотности магнитной жидкости, т.е. уменьшить потери мелких классов золота. На ГОК «Алданзолото» установлен сепаратор типа СМЖ-1А.

Сепараторы типа СМЖ используют магнитные жидкости на основе керосина в диапазоне плотностей 940 – 1020 кг/м³. Использование магнитной жидкости на основе керосина обусловлено малой вязкостью, а также олеофильностью золота. Гидрофобность золота приводит к его потерям, особенно мелких классов (менее 0,15мм) при сепарации в магнитной жидкости на основе воды, что в определённой степени ограничивает её применение. Ширина наиболее узкой части межполюсного зазора сепараторов СМЖ составляла для разных типоразмеров 40 –

70 мм при длине полюсных наконечников 350 – 450 мм; масса сепараторов в зависимости от типоразмера составляла 1900 – 4500 кг. Извлечение золота на всех сепараторах типа СМЖ не ниже 99,2% (максимальное извлечение 99,9% было достигнуто на Берелёхском ГОК). Сепараторы СМЖ при необходимости могут быть снабжены автоматической системой поддержания постоянной во времени выталкивающей силы и уровня магнитной жидкости в межполюсном зазоре. Сквозное извлечение золота на комплекс КСЗ составляло 98,5 - 99,5%, что на 0,5 - 1,5 % превышает извлечение золота при амальгамации. При этом чистота извлечённого шлихового золота составляет 99,9 %. Схема технологической переработки ГКРМ приведена на рисунке 1.10.

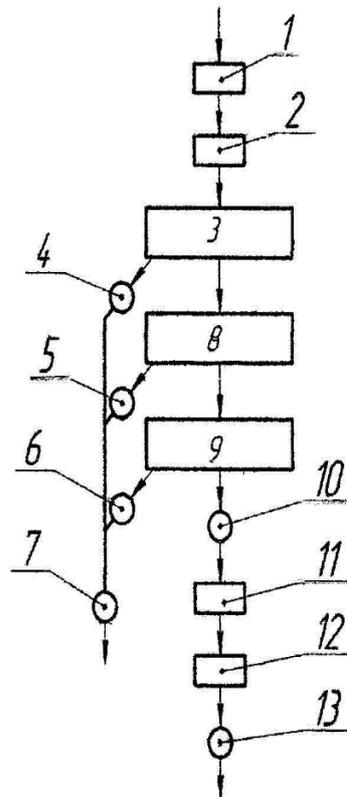


Рисунок 1.10. Общая схема технологического процесса сепарации для получения золота при переработке ГКРМ способом с использованием МЖ сепарации: 1 - питание; 2 - сушка; 3 - магнитная сепарация на МСЗ-1; 4 - магнитная фракция 1; 5 - магнитная фракция 2; 6 - остатки; 7 - на гидromеталлургический передел; 8 - магнитная сепарация на ССМ-1; 9 - сепарация в МЖ на СМЖ-1; 10 - золото; 11 - отмыв; 12 - сушка; 13 - шлиховое золото

На ряде приисков существует проблема разделения золота и платиноидов. Для разделения золота и осмистого иридия, составляющего около 30 % от общей массы, на прииске Южно-Заозерский комплекс КСЗ был снабжён дополнительным специальным сепаратором СМЖ-2Т (рисунок 1.11), позволяющим разделять

материалы с размерами частиц 70 – 150 мкм, различающихся по плотности на 3%. Использование комплексов КСЗ в золотодобывающей промышленности позволило сделать технологический процесс доводки золота экологически чистым, исключив амальгамацию, сократив время переработки ГКРМ в 1,8 раза и повысить процент извлечения золота. Потери магнитной жидкости, возникающие из-за её уноса сепарируемым материалом, составили на одном из объектов (без учёта регенерации) до 0,1 литра плотностью 1,4 г/см³ на каждый 1 кг извлечённого при магнитожидкостной сепарации золота. Регенерация снижала эти потери на 60%. Экономический эффект от внедрения нового метода неодинаков и составляет на различных ШОФ 100 – 300 тысяч долларов в год [42, 89].

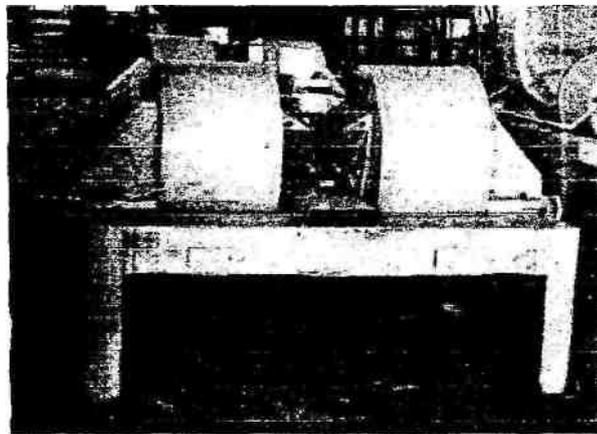


Рисунок 1.11. Сепаратор для разделения золота и платиноидов типа СМЖ-2Т

Магнитожидкостные сепараторы, нашедшие промышленное применение, можно условно разбить на два типа: гравитационные и центробежные. Для обоих типов сепараторов характерно наличие постоянного во времени неоднородного магнитного поля, создающего в магнитной жидкости магнитную выталкивающую силу F_M . В сепараторах первого типа величина F_M направлена в сторону, противоположную ускорению силы тяжести g , а в сепараторах второго типа эта сила противоположна центробежной силе $F_{Ц}$. Помимо этих сил на частицу сепарируемого материала действуют архимедова сила F_A .

Необходимым условием магнитожидкостной сепарации является выполнение соотношения

$$V_{лр} \rho_l g < F_M + F_A < V_{тр} \rho_t g, \quad (1.13)$$

где ρ_l, ρ_t, V_l, V_t - плотности и объёмы, соответственно, лёгкой и тяжёлой частиц сепарируемого материала.

Очевидно, что для центробежного магнитожидкостного сепаратора соотношение будет имеет вид:

$$V_{лрл}\omega^2R < F_M < V_{трт}\omega^2R, \quad (1.14)$$

где ω^2R - центробежное ускорение.

На движущиеся в магнитной жидкости частицы сепарируемого материала, кроме рассмотренных сил, будут действовать сила лобового сопротивления и сила Бассе, накладывающие определённые ограничения на размеры сепарируемых частиц, производительность сепаратора, плотность используемой магнитной жидкости и т.д.

Принцип действия магнитожидкостного центробежного сепаратора поясняется на

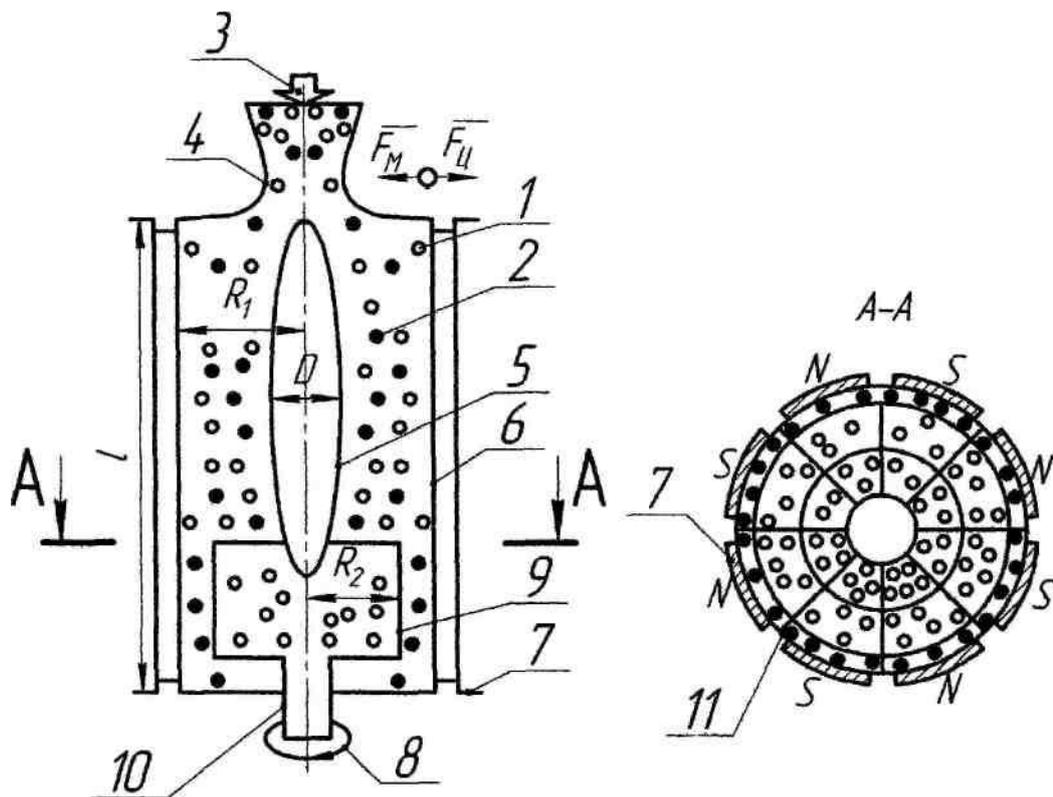


Рисунок 1.12. Схема центробежного МЖС.

рисунке 1.12. Пульпа, представляющая собой смесь магнитной жидкости на основе воды с сепарируемым материалом (содержание твёрдых частиц в пульпе по объёму $\approx 10\%$), состоящим из частиц лёгкой 1 и тяжёлой 2 фракций, поступает в направлении 3 в кольцевой трубопровод 4 на направляющее устройство 5, расположенное внутри сепарационной камеры 6. Камера вращается в магнитном поле, образованном полюсами

многополюсного магнита 7. При вращении камеры с магнитной жидкостью и сепарируемым материалом в направлении 8 лёгкие и тяжёлые частицы при соответствующем подборе скорости вращения под действием сил F_M и F_C при перемещении пульпы вниз (со скоростью порядка 10 м/мин) расходятся по разным сторонам цилиндрической перегородки 9, откуда выводятся через специальные патрубки, например, 10 для лёгкой фракции. Скорость вращения камеры 6 зависит от вида материала и составляет порядка 250 об/мин. Для снижения вихреобразования в пульпе и облегчения вращения магнитной жидкости с камерой внутри камеры 6 установлены перегородки 11, разбивающие всё сепарационное пространство на автономные сепарационные отсеки.

В качестве примера приведём геометрические параметры сепарационной камеры центробежного сепаратора «Модель 1000Е»:

- высота сепарационной камеры 0,9 м;
- диаметр сечение сепарационной камеры 734 мм²;
- $R_1 = 25,7$ мм;
- $R_2 = 23,8$ мм (направляющее устройство $D = 41,2$ мм);
- камера разделена перегородками 11 на 18 сепарационных отсеков.

Магнитное поле создаётся системой постоянных магнитов, хотя авторами запатентованы технические решения с применением электромагнитов постоянного тока и сверхпроводящих магнитных систем. Для сепарации применяются магнитные жидкости на основе воды плотностью до 1,1 г/см³ с намагниченностью насыщения до 3,25 кА/м.

Первый промышленный образец ЭМЖС находится в постоянной эксплуатации с 1982 года и служит для разделения материала сферической формы крупностью 0,5 – 2 мм. Шарики представляют собой немагнитные частицы в диапазоне плотностей 2,7-12,0 г/см³. Сепаратор разделяет частицы, различающиеся по плотности на 0,15 г/см³. Конфигурация полюсного наконечника позволяет реализовать в рабочей зоне ЭМЖС постоянную по значению выталкивающую силу F_C . Её отклонение от номинального значения в рабочей зоне не превышает 1 %. Конструкция узла подачи сепарируемого материала в рабочую зону ЭМЖС предотвращает слипание частиц разной плотности. Для стабилизации процесса

разделения сепаратор снабжён системой термостатирования магнитной жидкости. Сепаратор работает до 12 часов в сутки. За время промышленной эксплуатации (с 1982 года) сепаратора случаев засорения и лёгкой, и тяжёлой фракцией не отмечено. Сепаратор служит надёжным средством контроля качества изделий производства. Внедрение ЭМЖС позволило исключить из технологического процесса токсичную жидкость - малоновокислый талий. Производительность магнитожидкостного сепаратора составляет 0,5 – 2 кг/час [42]. С целью повышения процесса сепарации, магнитную жидкость имеет смысл нагревать до температуры $35 \div 60^\circ\text{C}$ и вести сепарацию при этой температуре [26, 28].

Представляет интерес роторный сепаратор (рисунок 1.13) [27].

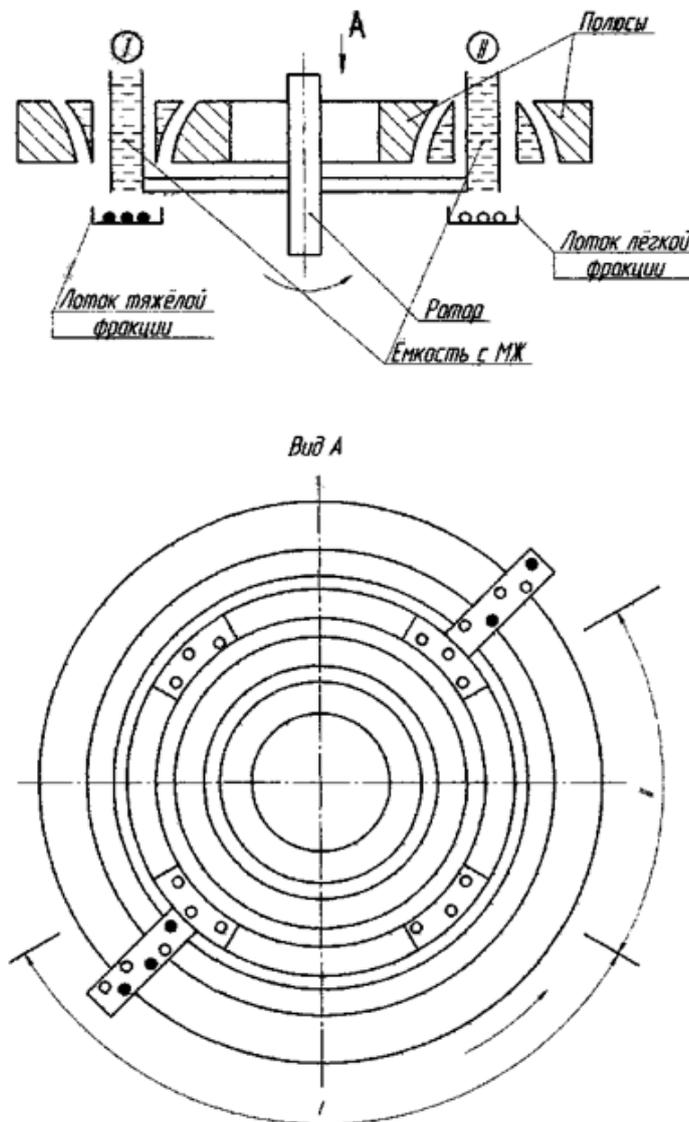


Рисунок 1.13. Феррогидростатический роторный сепаратор.

Для сокращения потерь ферромагнитной жидкости, сепаратор снабжается дополнительным индукционным полюсом, установленным под ёмкостью с магнитной жидкостью, с возможностью возвратно-поступательного движения в вертикальной плоскости (рисунок 1.14) [21].

Резюмируя, можно отметить, что основным преимуществом электромагнитных магнитожидкостных сепараторов является высокая селективность в широких диапазонах плотностей и размеров частиц сепарируемых материалов [19-29]. Разработанный метод выделения свободного золота в ГКРМ получил промышленное использование для выделения золота и платины. Он может быть рекомендован для процессов, связанных с обработкой и выделением алмазов из алмазосодержащих концентратов, рубинов, а также полудрагоценных камней (пиропов, хризолитов и т.д.), а также для разделения любых других немагнитных материалов, при условии различия их плотностей.

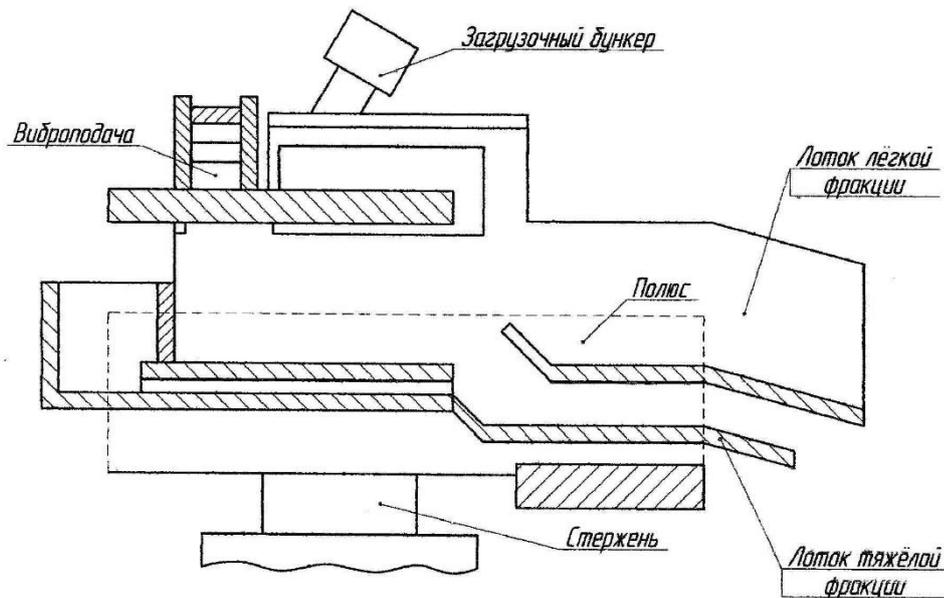


Рисунок 1.14. Конструкция МЖС.

1.7. Сравнительный анализ способов сепарации немагнитных материалов

Для сравнительного анализа рассмотренных способов разделения сепарируемых частиц введем понятие – фактор разделения Φ , который является

результатом суммы альтернативных сил, действующих на частицу в области разделения.

Для аэродинамических сепараторов он составит:

$$\Phi = F_{AD} - F_T = d^2(k_{AD} \cdot v^\alpha - k_T \cdot \rho \cdot d); \quad (1.15)$$

для центробежных сепараторов:

$$\Phi = F_{AD} - F_{CB} = d^2(k_{AD} \cdot v^\alpha - k_{CB} \cdot \omega^2 \cdot \rho \cdot d); \quad (1.16)$$

для гидравлических:

$$\Phi = F_G - F_T = d^2(k_G \cdot v^\alpha - k_T \cdot \rho \cdot d); \quad (1.17)$$

для электродинамических сепараторов:

$$\Phi = F_{ЭД} - F_{ТР} = d^3(k_{ЭД} \cdot \gamma - k_{ТР} \cdot \rho); \quad (1.18)$$

для магнитожидкостных:

$$\Phi = (F_A + F_M) - F_T = V [(\rho_{МЖ} g + \mu_0 M |\nabla H|) - \rho g] \quad (1.19)$$

Для лёгких частиц фактор разделения должен иметь положительный знак ($\Phi > 0$), а для тяжёлых отрицательный ($\Phi < 0$). Как видно из формул (1.15 – 1.19) знак фактора разделения зависит от размеров частицы в аэро- и гидродинамических сепараторах. В отличие от них знак фактора разделения магнитожидкостного и электродинамического сепараторов не зависит от размера разделяемых частиц.

Из соотношения (1.18) можно сделать вывод о неоднозначности фактора разделения у электродинамических сепараторов, так как он зависит от нескольких физических параметров разделяемых частиц (плотность и электропроводность).

Из анализа рассмотренных способов сепарации немагнитных материалов следует отметить, что плотность материалов, как свойство, наиболее точно характеризующее компоненты разделяемой смеси [57], практически не применяется в используемых на практике разделителях. В то же время отличительной особенностью электромагнитных магнитожидкостных сепараторов является то, что фактор разделения зависит исключительно от плотности разделяемых частиц.

Это заключение дает право утверждать о том, что магнитожидкостная сепарация является наиболее перспективной, при разделении немагнитных веществ по плотностям. Магнитожидкостный сепаратор обладает рядом

преимуществ по сравнению с применяемыми сейчас устройствами для разделения, как с энергетической точки зрения, так и с точки зрения чистоты и точности разделения [75]. Для любых плотностей веществ в разделяемых фракциях можно подобрать градиент магнитного поля, приводящий к всплытию нужной фракции и, тем самым, обеспечить требуемое разделение фракций. Может быть реализован эффективный способ регулирования процесса сепарации. Магнитное поле может создаваться и регулироваться разными способами. Например, путем изменения тока в обмотке электромагнита можно изменять силу выталкивания немагнитных тел из МЖ и таким образом можно проводить их управляемую сепарацию по плотности. Магнитожидкостная сепарация может как дополнять существующие линии по переработке, так и заменять на этих линиях некоторые установки. Результаты, положенные в основу данной главы, были опубликованы в соавторстве в работах [112, 115, 116].

1.8. Выводы и постановка задач исследования

1. Проблемы загрязнения окружающей среды бытовыми и промышленными отходами, автомобильным хламом, отходами бытовой техники, в том числе ломом электрических и электронных устройств, и др. стоит очень остро во всем мире.

2. Промышленные отходы, отходы бытовой техники, металлолом, лом электрических и электронных устройств могут содержать ценные материалы, такие как золото, серебро, медь, платина и др. Грамотная переработка этих отходов позволяет снизить загрязнение окружающей среды, сократить добычу природных ресурсов, вторичное использование ценных материалов.

3. При переработке немагнитных материалов предварительно осуществляется измельчение отходов с получением многокомпонентной смеси, которая затем разделяется по физическим свойствам, то есть сепарируется.

4. Высокая стоимость сепарируемых смесей, разделения немагнитных материалов на фракции, например, при очистке от шлиха мелкого золота, золотосодержащих отходов, требует повышенной точности сепарации, не обеспечиваемой в используемых сепараторах.

5. Эффективная сепарация немагнитных материалов на фракции может быть реализована в электромагнитных магнитожидкостных сепараторах, к достоинствам которых можно отнести следующее:

- Электромагнитные магнитожидкостные сепараторы позволяют эффективно разделять смесь немагнитных частиц на фракции.
- Фактор разделения частиц в электромагнитных магнитожидкостных сепараторах зависит только от плотности частиц. Путем регулирования тока в обмотке возбуждения электромагнита можно изменять условия сепарации и исключать влияние различных факторов на ее точность.
- Магнетитовые нанодисперсные магнитные жидкости, обладающие намагниченностью насыщения $M_S=10\div 40$ кА/м и используемые в магнитожидкостных сепараторах, позволяют разделять немагнитные материалы в широком диапазоне плотностей - от 1,5 до 20 г/см³.

- Различие электропроводящих свойств разделяемых частиц не влияет на точность сепарации.

- Для электромагнитной магнитожидкостной сепарации отсутствуют требования к однородности смеси по крупности частиц.

6. Процессы, происходящие в процессе сепарации в электромагнитном магнитожидкостном сепараторе, 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 немагнитных частиц, степени заполнения рабочего зазора электромагнитного магнитожидкостного сепаратора немагнитными частицами на силу, выталкивающую частицы из МЖ. Нет методик расчета таких сепараторов.

7. Целесообразно уточненное моделирование распределений магнитных полей, сил и давлений в электромагнитных магнитожидкостных сепараторах, процессов в МЖ, находящейся в градиентном магнитном поле, энергетическим способом.

8. Отсутствуют методики разработки и проектирования усовершенствованных конструкций электромагнитных магнитожидкостных сепараторов.

Таким образом, разработка и усовершенствование электромагнитных магнитожидкостных гравитационных сепараторов немагнитных материалов на основе уточненного анализа электромагнитных процессов и технологии сепарации является актуальной научно-технической задачей.

Работа выполнялась в рамках гранта РФФИ № 09-08-97575-р_центр_а «Разработка научных основ технологии сепарации немагнитных материалов с использованием нанодисперсных магнитных жидкостей» и темы № 2.1.2/11623 «Разработка методологии сепарации немагнитных металлов с применением магнитных жидкостей» аналитической целевой программы Минобрнауки РФ «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 электромагнитных магнитожидкостных сепараторах.

Задачи исследования:

- разработка методик расчета, аналитических и численных математических моделей электромагнитных магнитожидкостных сепараторов;
- анализ движения немагнитных частиц в зоне разделения электромагнитного магнитожидкостного сепаратора;
- исследование характеристик и свойств электромагнитных магнитожидкостных сепараторов на основе уточненных аналитических и численных математических моделей;
- совершенствование конструкции, разработка методик расчета и проектирования, расчета производительности электромагнитных магнитожидкостных сепараторов;
- разработка опытной установки сепарации и экспериментальные исследования усовершенствованного электромагнитного магнитожидкостного сепаратора.

2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ НЕМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МАГНИТОЖИДКОСТНЫХ СЕПАРАТОРАХ

2.1. Давления и силы, действующие на немагнитное тело в магнитной жидкости электромагнитного магнитожидкостного сепаратора

В зазоре возбужденного электромагнитного магнитожидкостного сепаратора (рисунок 2.1) создается неоднородное магнитное поле за счет специальной формы полюсных наконечников. Между которыми размещается МЖ с плотностью ρ и намагниченностью M . В результате чего возникает эффект выталкивания немагнитных тел из МЖ в область с меньшей величиной напряженности магнитного поля.

Положению МЖ в зазоре ЭМЖС соответствует, согласно уравнению Бернулли, равенство потенциальной энергии в поле силы тяжести Δu_{Γ} и магнитном поле Δu_M на верхней и нижней границах МЖ.

$$\rho \cdot g \cdot (y_2 - y_1) = u_{M2} - u_{M1} \quad (2.1)$$

Удельная потенциальная энергия МЖ в магнитном поле

$$u_M = \mu_0 \int_0^H M dH \quad (2.2)$$

зависит от распределения напряженности H в ее объеме. Значения координат y_1 и y_2 находятся путем параллельного перемещения зависимости $\rho \cdot g \cdot \Delta y = \Delta u_{\Gamma}$ (рисунок 2.1, б) до пересечения с характеристикой $u_M(y)$.

Давление в МЖ на нижней и верхней границах (точки 1 и 2 рисунок 2.1) равно давлению за ее границами

$$P_1 = P_0 \quad , \quad P_2 = P_0 \quad . \quad (2.3)$$

Величину давления в любой точке МЖ можно описать следующим выражением

$$p = p_0 + \Delta p_{\Gamma} + \Delta p_M \quad , \quad (2.4)$$

где $\Delta p_{\Gamma} = \rho \cdot g \cdot (y_2 - y_1)$ и $\Delta p_M = u_{M1} - u_{M2}$ – приращения давлений относительно точки 2 соответственно за счет сил, действующих на МЖ, в гравитационном и магнитном полях.

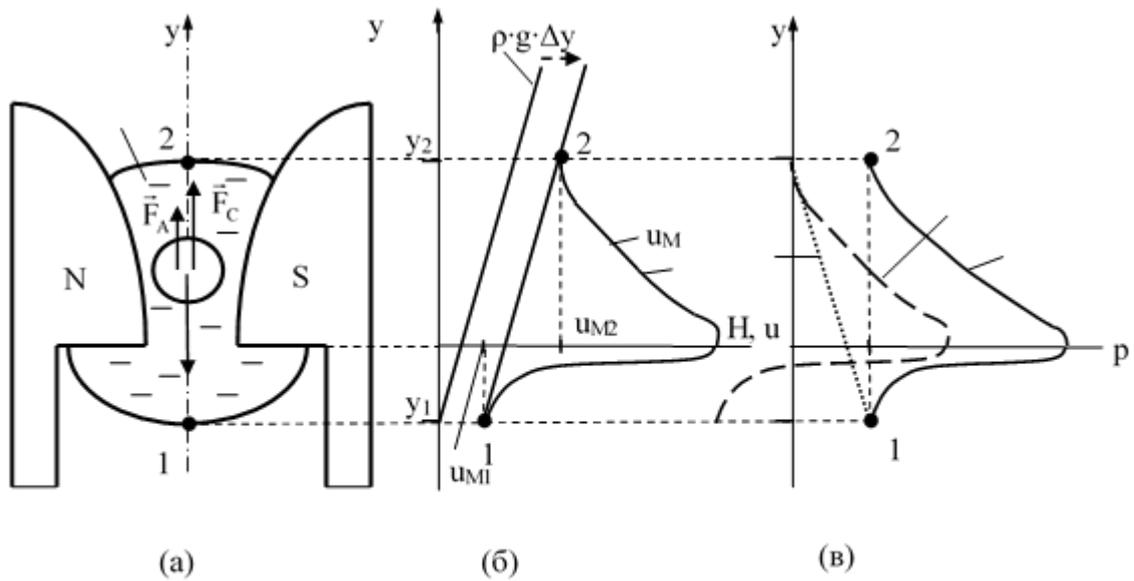


Рисунок 2.1. Рабочий зазор электромагнитного магнитожидкостного сепаратора (а) и изменение по высоте МЖ энергий (б) и давления (в)

Со стороны МЖ на погруженное в нее немагнитное тело с внешней поверхностью σ и объемом V в направлении оси y действует сила

$$F_y = - \oint_{\sigma} p \bar{e}_y d\sigma = F_A + F_{My} \quad (2.5)$$

$$F_A = \rho \cdot g \cdot V, \quad F_{My} = - \oint_{\sigma} u_M \bar{e}_y d\sigma.$$

Сила F_y состоит из двух составляющих: силы Архимеда F_A и магнитной силы F_{My} , которая зависит от распределения удельной магнитной энергии МЖ u_M на поверхности частицы.

В электромагнитном магнитожидкостном сепараторе для обеспечения высокой точности сепарации профиль полюсных наконечников должен быть выбран из условия $F_y = \text{const}$, которое сводится к условию $F_{My} = \text{const}$. Магнитная сила F_M зависит от распределения напряженности H в объеме МЖ. Немагнитная частица имеет магнитную проницаемость вакуума μ_0 , которая меньше проницаемости МЖ $\mu_{ж}$. Это приводит к изменению картины распределения напряженности H и удельной магнитной энергии u_M вблизи немагнитной частицы. В результате возникает механизм влияния величины объема V и формы

немагнитного тела на значение F_M . Выражение для F_M в (2.5) учитывает эти обстоятельства. Часто для расчета F_M используются соотношение

$$\bar{F}_M = \bar{f}_M \cdot V, \quad \bar{f}_M = \mu_0 \cdot M \cdot \nabla H_{\underline{\quad}} \quad (2.6)$$

в которых намагниченность M магнитной жидкости и градиент напряженности ∇H берутся в точке расположения центра немагнитного тела при условии отсутствия его в МЖ. Это справедливо, если наличие немагнитного тела не изменяет картину распределения напряженности H в рабочем зазоре электромагнитного магнитожидкостного сепаратора, что возможно если объем тела мал или намагниченность МЖ не велика.

2.2. Математическое моделирование процесса движения немагнитных частиц в зоне разделения электромагнитного магнитожидкостного сепаратора

Для анализа движения падающих с высоты лотка $h_{\text{лотка}}$, подающего сепарируемые частицы в зону загрузки сепаратора, для схемы рисунок 2.2 разработана математическая модель процесса погружения частиц в МЖ.

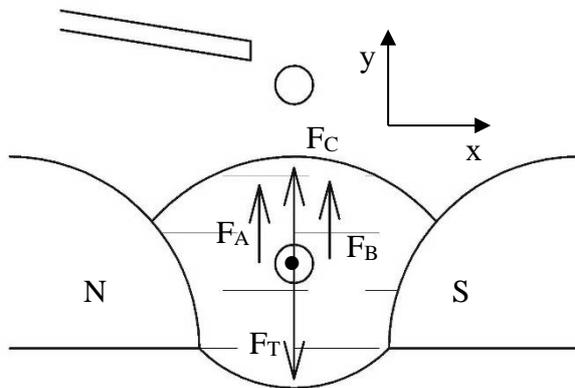


Рисунок 2.2. Силы, действующие на движущуюся немагнитную частицу в зазоре электромагнитного магнитожидкостного сепаратора

Сферические частицы с плотностью ρ , радиусом R , объемом V и массой $m=\rho V$ падают с начальной скоростью v_0 в МЖ с плотностью $\rho_{\text{ж}}$, динамической вязкостью η и намагниченностью M . МЖ удерживается в зазоре магнитным полем электромагнитного сепаратора.

На движущуюся в магнитной жидкости со скоростью \bar{v} частицу в неоднородном магнитном поле с градиентом напряженности магнитного поля ∇H действуют сила тяжести F_T , сила Архимеда F_A , сила сепарации F_C и сила вязкостного сопротивления F_B , определяемая формулой Стокса,

$$\bar{F}_T = \rho \cdot \bar{g} \cdot V,$$

$$\begin{aligned}\bar{F}_A &= -\rho_{\text{ж}} \cdot \bar{g} \cdot V, \\ \bar{F}_M &= -\mu_0 \cdot M \cdot \overline{\nabla H} \cdot V, \\ \bar{F}_B &= -3\pi \cdot \eta \cdot d \cdot \bar{v}.\end{aligned}\quad (2.7)$$

Уравнение второго закон Ньютона при движении частицы:

$$\bar{F}_T + \bar{F}_A + \bar{F}_M + \bar{F}_B = m \cdot \frac{d\bar{v}}{dt}\quad (2.8)$$

или

$$(\rho - \rho_{\text{ж}}) \bar{g} V - \mu_0 M \cdot \overline{\nabla H} \cdot V - 6\pi\eta \cdot R \cdot \bar{v} = \frac{d\bar{v}}{dt} \rho V \quad (2.9)$$

Из решения дифференциального уравнения

$$\frac{dv}{dt} \rho V + 6\pi\eta \cdot R \cdot v = (\rho - \rho_{\text{ж}}) g V - \mu_0 M \cdot |\nabla H| \cdot V,$$

находится уравнение для скорости движения частицы (2.10)

$$v = \left(v_0 + \frac{\mu_0 M d H - (\rho - \rho_{\text{ж}}) g}{\rho} \right) e^{-\frac{6\pi\eta R}{\rho \frac{4\pi R^3}{3}} t} - \frac{\mu_0 M d H - (\rho - \rho_{\text{ж}}) g}{\rho} \quad (2.10)$$

Из соотношения (2.10) выводятся выражения для времени (2.11) и глубины погружения (2.12) частицы:

$$t_{\text{погр}} = \frac{\rho \frac{4\pi R^3}{3}}{6\pi\eta R} \ln \frac{\frac{\mu_0 M d H - (\rho - \rho_{\text{ж}}) g}{\rho}}{v_0 + \frac{\mu_0 M d H - (\rho - \rho_{\text{ж}}) g}{\rho}}, \quad (2.11)$$

$$L_{\text{погр}} = \int_0^{t_{\text{погр}}} v(t) dt \quad (2.12)$$

По полученным соотношениям возможно рассчитать временные изменения скоростей движения легких и тяжелых частиц (рисунок 2.3) в зависимости от начальной скорости подачи v_0 .

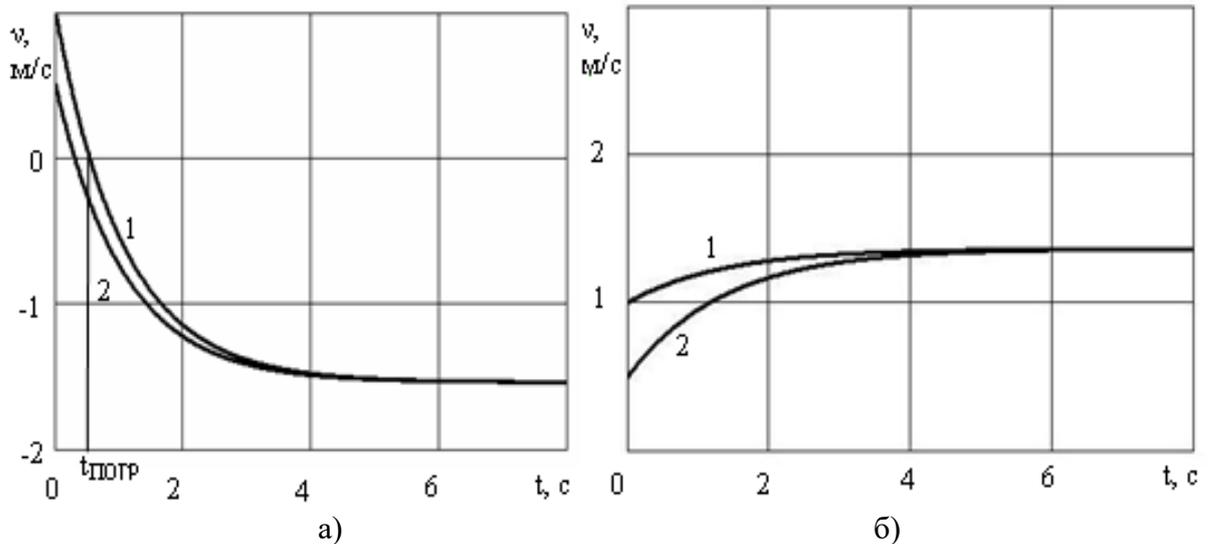


Рисунок 2.3. Временные изменения скоростей движения легких (а) и тяжелых частиц (б) при начальной скорости подачи v_0 : 1 – 1 м/с; 2 – 0,5 м/с

По полученным соотношениям возможно рассчитать зависимости глубины погружения частицы от её диаметра $d=2R$ (рисунок 2.4) и плотности материала частиц (рисунок 2.5) для разных высот лотка.

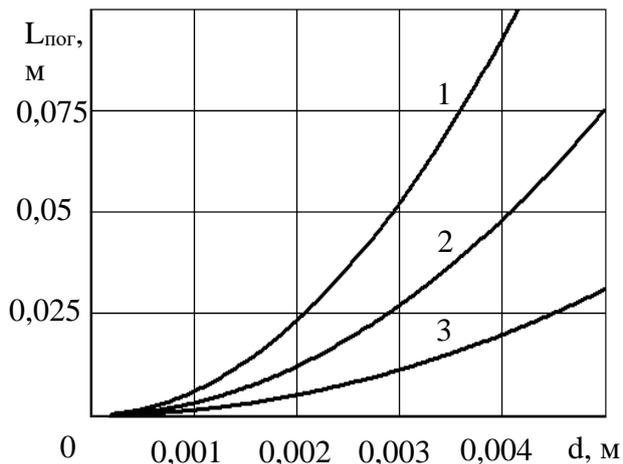


Рисунок 2.4. Зависимость глубины погружения частицы от её диаметра при высоте лотка:
1 – 0,05 м; 2 – 0,025 м; 3 – 0,01 м

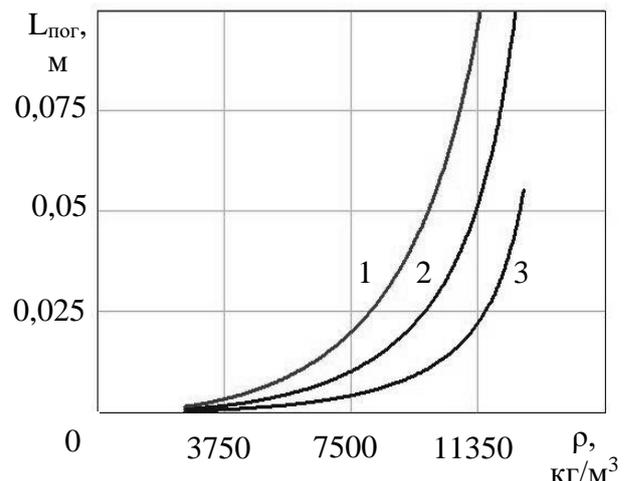


Рисунок 2.5. Зависимость глубины погружения частицы от её плотности при высоте лотка:
1 – 0,05 м; 2 – 0,025 м; 3 – 0,01 м

Полное время подъема T частицы на поверхность можно найти, решив уравнение (2.13), что реализовано в программном комплексе Mathcad

$$0 = \int_0^T v(t) dt, \quad T \neq 0. \quad (2.13)$$

Производительность сепаратора по загрузке можно представить в виде

$$Q = S_{\text{заг}} \cdot k_{\text{зап}} \cdot d \cdot T, \quad (2.14)$$

где $S_{\text{заг}}$ – площадь загрузки; $k_{\text{зап}}$ – коэффициент заполнения площади загрузки; d – диаметр частицы.

На рисунках 2.6 и 2.7 представлены зависимости производительности сепаратора по загрузке от диаметра частиц и плотности материала частиц для разных высот лотка.

Все зависимости (рисунки 2.3-2.7) были рассчитаны для следующих параметров: $\nabla H = 4000$ кА/м; $M = 25$ кА/м; $\rho_{\text{ж}} = 1000$ кг/м³; $\eta = 7,5$ мПа·с. Для зависимостей на рисунке 2.5 $\rho = 9000$ кг/м³, а для зависимостей на рисунке 2.6 $R = 1,25$ мм, $S_{\text{заг}} = 0,0002$ м², $k_{\text{зап}} = 0,75$.

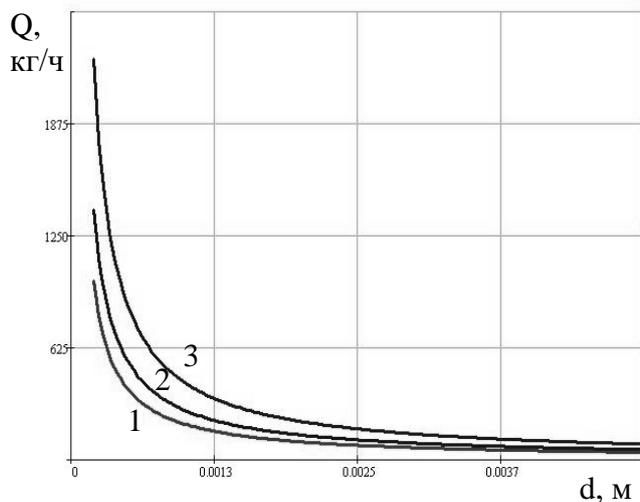


Рисунок 2.6. Зависимость производительности сепаратора от диаметра частиц при высоте лотка: 1 – 0,05 м; 2 – 0,025 м; 3 – 0,01 м

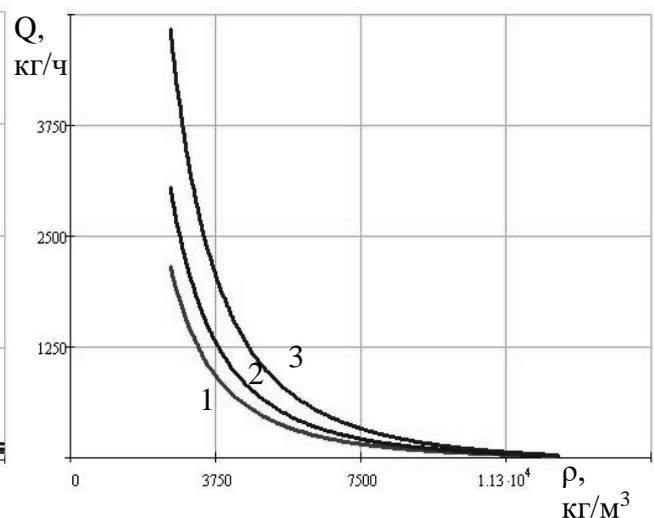


Рисунок 2.7. Зависимость производительности сепаратора от плотности частиц при высоте лотка: 1 – 0,05 м; 2 – 0,025 м; 3 – 0,01 м

Полученные зависимости можно использовать для рекомендательных ограничений высоты загрузочного лотка, размера частиц определенной плотности при различных их сочетаниях.

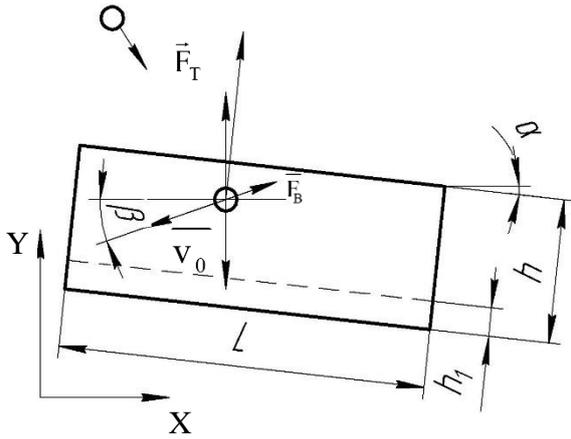


Рисунок. 2.8. Схема для расчета траектории движения немагнитной частицы в зазоре электромагнитного магнитожидкостного сепаратора

При моделировании самой траектории движения немагнитной частицы в зазоре электромагнитного магнитожидкостного сепаратора по соотношению (2.9) с учетом длины L и угла наклона α полюсных наконечников (поверхности магнитной жидкости), высоты столба МЖ h (схема на рисунке 2.8) были приняты следующие допущения:

- МЖ имеет линейную реологическую характеристику и постоянную динамическая вязкость ($\eta = \text{const}$);
- рабочий зазор электромагнитного магнитожидкостного сепаратора спроектирован корректно, в результате чего сила F_M постоянна.

Уравнение (2.9) запишем в виде:

$$a \frac{d\bar{v}}{dt} + b \cdot \bar{v} + c = 0 \quad (2.15)$$

где a , b , c – постоянные величины, не зависящие от величины скорости.

В координатных проекциях на оси x и y уравнение (2.9) имеет вид:

$$\rho g V (-\bar{e}_y) - \rho_{ж} g V (-\bar{e}_y) - \mu_0 M \left[|\nabla H| \sin \alpha (-\bar{e}_x) + |\nabla H| \cos \alpha (-\bar{e}_y) \right] V - 3\pi \eta d (v_x \bar{e}_x + v_y \bar{e}_y) = \rho V \frac{d}{dt} (v_x \bar{e}_x + v_y \bar{e}_y)$$

$$\rho V \frac{dv_x}{dt} + 3\pi \cdot \eta \cdot d \cdot v_x - \mu_0 M |\nabla H| \sin \alpha V = 0 \quad (2.16)$$

$$\rho V \frac{dv_y}{dt} + 3\pi \cdot \eta \cdot d \cdot v_y + \left[-\mu_0 M |\nabla H| \cos \alpha + (\rho - \rho_{ж}) g \right] V = 0 \quad (2.17)$$

В результате интегрирования уравнений получим выражения для скорости движения частицы по осям

$$v_x = \left(v_{0x} + \frac{c_x}{b} \right) \cdot e^{-\frac{b \cdot t}{a}} - \frac{c_x}{b} \quad (2.18)$$

$$v_y = \left(v_{0y} + \frac{c_y}{b} \right) \cdot e^{-\frac{b \cdot t}{a}} - \frac{c_y}{b}, \quad (2.19)$$

где: $a = \rho V$; $b = 3\pi \cdot \eta \cdot d \cdot k_b$; $c_y = k_c (-\mu_0 M \cdot |\nabla H| \cdot V \cos \alpha - \rho_{\text{ж}} \cdot gV) + \rho \cdot gV$;

$$c_x = -k_c \cdot \mu_0 M \cdot |\nabla H| \cdot V \sin \alpha;$$

$k_b = \frac{S_{\pi}}{S} = \frac{h_{\text{ч}}}{d}$, $k_c = \frac{V_{\pi}}{V} = \frac{6(d \frac{h_{\text{ч}}^2}{2} - \frac{h_{\text{ч}}^3}{3})}{d^3}$ – коэффициенты, учитывающие степень погружения частицы в МЖ; $h_{\text{ч}}$ – высота погруженной части частицы.

В реализованной компьютерной программе [96] для расчета траектории движения частицы задаются следующие параметры:

- плотность частицы ρ ;
- плотность жидкости $\rho_{\text{ж}}$;
- угол наклона полюсов (поверхности магнитной жидкости) α ;
- длина активной части полюсов L ;
- высота столба МЖ h ;
- высота расположения минимального рабочего зазора относительно нижней поверхности магнитной жидкости h_1 (граница смены направления магнитной силы F_M);
- Кривая намагничивания магнитной жидкости M ;
- модуль градиента напряженности в зазоре электромагнитного магнитожидкостного сепаратора $|\nabla H|$;
- динамическая вязкость МЖ η ;
- диаметр частицы d ;
- начальное положения частицы X_0, Y_0 ;
- проекции вектора начальной скорости частицы v_{0x}, v_{0y} .

Процесс определения траектории движения немагнитной частицы в компьютерной программе итерационный. По известным координатам частицы на предыдущей итерации определяется, находится ли частица в МЖ. Если нет, то определяется изменение скорости при действии только силы тяжести. Если же частица находится в МЖ, то определяется степень ее погружения в МЖ,

коэффициенты k_b и k_c по, и рассчитывается скорость по приведенным выше формулам (2.18, 2.19). По известным скоростям определяется изменение координат частицы на рассматриваемом шаге изменения времени. Координаты записываются в массив и в итоге отображаются на графиках (рисунки 2.9-2.14). На этих графиках сплошными линиями изображены границы МЖ, штрихпунктирной линией – граница изменения направления действия магнитной силы, пунктирной линией – траектория движения частицы.

В качестве примера рассчитаны траектории движения частиц для характерных случаев. Параметры программы задавались в соответствии с экспериментальными исследованиями, величина градиента была выбрана соответствующей току возбуждения электромагнита $I = 2$ А. На рисунке 2.9 изображены расчетные траектории

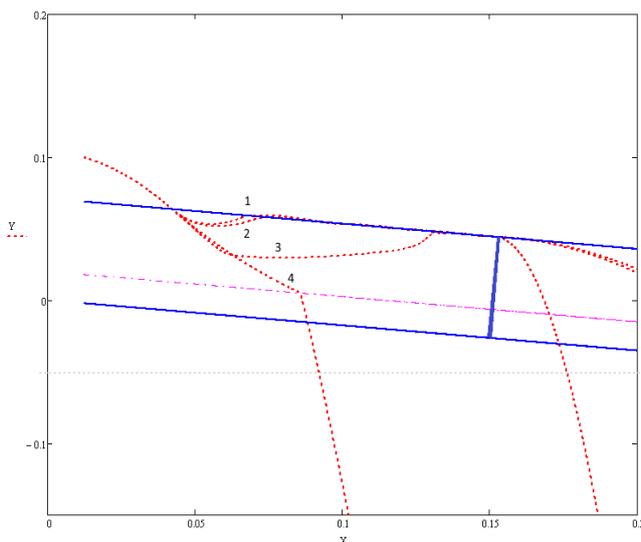


Рисунок 2.9. Расчетные траектории частиц ($\alpha=10^\circ$, $v_{0x}=0,5$, $v_{0y}=-0,3$ м/с):

- 1 - алюминиевая 2 мм;
- 2 - алюминиевая 5,6 мм;
- 3 - медная 0,8 мм;
- 4 - медная 4,9 мм

траектории алюминиевых частиц диаметрами 2 и 5,6 мм соответственно (поз. 1,2) при $v_{0x} = 0,5$ м/с, $v_{0y} = -0,3$ м/с. Из графиков видно, что чем крупнее частица, тем большая у нее глубина погружения в МЖ и более позднее всплытие. Это связано с наличием у нее большей кинетической энергии. На рисунке 2.9 поз. 3,4 изображены

расчетные траектории медных частиц диаметрами 0,8 и 4,9 мм соответственно. Как и в предыдущем случае более крупная частица обладает

большей кинетической энергией при входе в МЖ. Это приводит к «проскакиванию» зоны разделения, из-за чего снижается степень разделения (загрязнение тяжелой фракции легкой и наоборот). На рисунках 2.10-2.11 изображены расчетные траектории свинцовых частиц диаметром 4,5 мм при нулевой начальной скорости с поверхности МЖ и разных углах наклона - 10° и 20°

соответственно. Из графиков видно, что, даже являясь «тяжелой», при неправильном угле наклона полюсов частица может попасть в легкую фракцию.

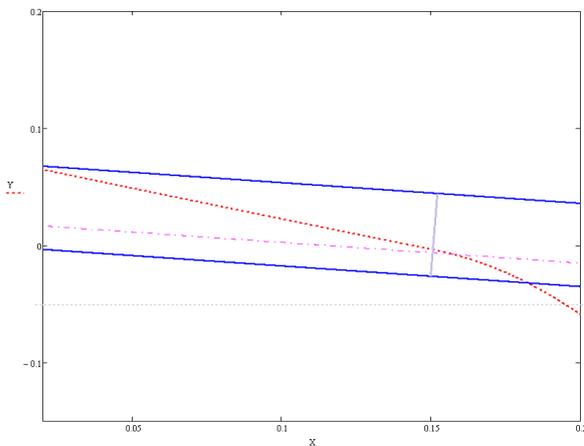


Рисунок 2.10. Расчетные траектории свинцовых частиц диаметром 4,5 мм при $\alpha=10^\circ$, $v_0=0$ м/с

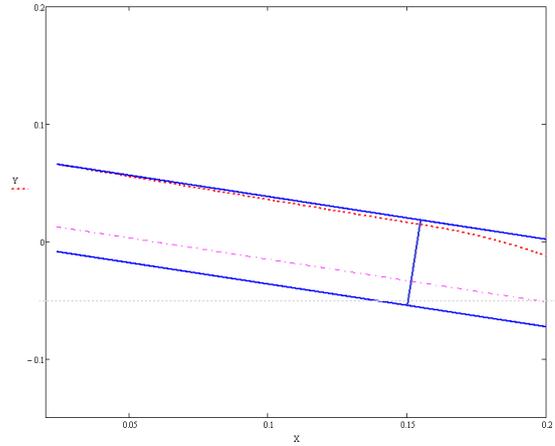


Рисунок 2.11. Расчетные траектории свинцовых частиц диаметром 4,5 мм при $\alpha=20^\circ$, $v_0=0$ м/с

В электромагнитных магнитожидкостных сепараторах обычно используются МЖ на керосине с намагниченностью насыщения $M_S \approx 10$ кА/м. Для создания столба МЖ в зазоре с высотой $h=y_2-y_1=0.1$ м разность значений магнитной индукции в крайних точках должна составлять $\Delta B=B_2-B_1=0,1$ Тл. В этом случае для подъема медной частицы на поверхность градиент магнитной индукции должен быть $|\nabla B| \approx 8$ Тл/м, чему соответствует разность экстремальных значений индукции $\Delta B = B_{\max} - B_{\min} \approx 0,8$ Тл. Все указанные параметры магнитного поля достижимы. Благодаря своей нанодисперсной структуре МЖ в этих условиях будет иметь высокую устойчивость и стабильные характеристики.

При падении с высоты загрузочного лотка частицы приобретают значительную скорость. И при определенном значении скорости и других параметров частицы даже легкая фракция может просто проскочить слой магнитной жидкости. В тоже время при слишком мелких размерах поверхностное натяжение МЖ может не дать погрузиться тяжелой фракции. Поэтому при определенном режиме эксплуатации должны быть введены соответствующие ограничения (размер частиц, высота лотка).

На основе представленных моделей были разработаны алгоритмы и программы, на которые были получены Свидетельства о регистрации программ [96]. Качественный вид расчетных траекторий частиц совпадает с

экспериментальными данными, что говорит о возможности использования программы при проектировании электромагнитных магнитожидкостных сепараторов.

2.3. Математическое моделирование формы поверхностей полюсных наконечников электромагнитного магнитожидкостного сепаратора, обеспечивающих постоянство сепарирующей силы

Одной из главных проблем при реализации магнитожидкостной сепарации немагнитных материалов является выбор такого профиля наконечников полюсов, который обеспечивает необходимую сепарирующую (выталкивающую) силу во всем объеме рабочего зазора с достаточной точностью.

Наиболее простой методикой определения формы полюсных наконечников является методика [54]. Здесь принимается, что линии магнитного поля во всем зазоре – отрезки прямых (рисунок 2.12), а кривая намагничивания (рисунок 2.13) либо аппроксимируется по формуле Висловича (2.20) при слабых полях, либо принимается равной намагниченности насыщения M_S при сильных полях.

$$M(H) = M_S \frac{H}{H + H_T}, \quad (2.20)$$

где H_T – значение напряженности, при котором $M=0,5 M_S$.

Напряженность рассчитывается по формуле:

$$H = \Delta U / 2x_{\text{п}}, \quad (2.21)$$

где ΔU – разность магнитных потенциалов между поверхностями полюсных наконечников, а $2x_{\text{п}}$ – расстояние между ними на данной высоте зазора u .

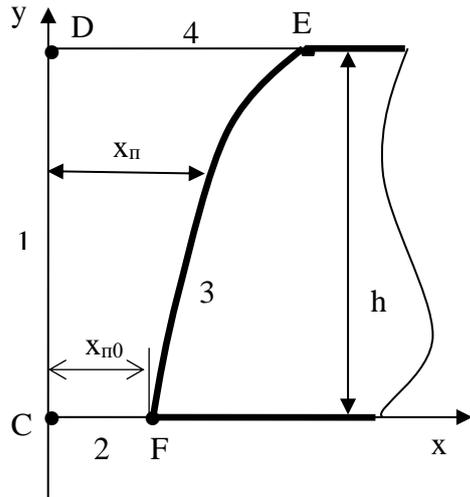


Рисунок 2.12. Расчетная область рабочего зазора электромагнитного магнитожидкостного сепаратора

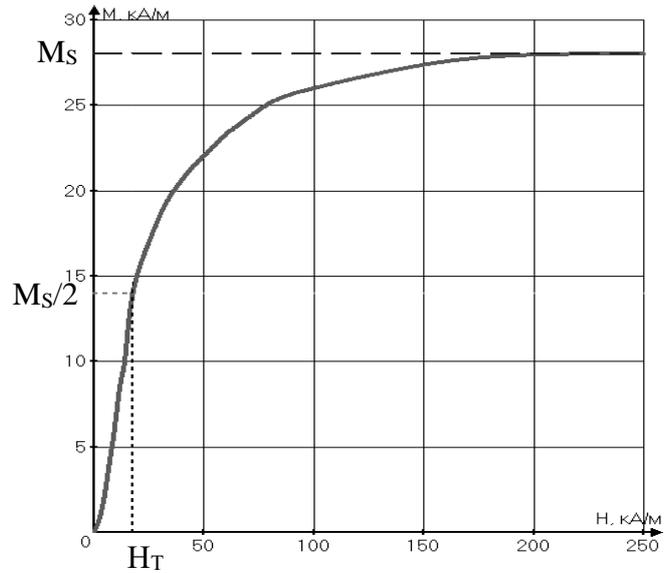


Рисунок 2.13. Зависимость намагниченности магнитной жидкости от напряженности магнитного поля

Согласно условиям разделения должно выполняться соотношение

$$M \cdot |\nabla H| = \frac{(\rho^* - \rho_{ж})g}{\mu_0} = \text{const}^*, \quad (2.22)$$

где: ρ^* - граничное значение плотности, разделяющее легкие и тяжелые частицы;

const^* - значение постоянной, которое соответствует значению плотности ρ^* .

Частицы с плотностью $\rho < \rho^*$ будут всплывать, а частицы с $\rho > \rho^*$ - будут тонуть.

На линии симметрии зазора

$$|\nabla H| = \partial H / \partial y. \quad (2.23)$$

Получим уравнение профиля наконечника полюса, когда магнитное поле в зазоре сильное и МЖ имеет постоянное значение намагниченности $M = M_s$.

Согласно (2.22) и (2.23) имеем

$$\partial y = \frac{M_s \partial H}{\text{const}^*}.$$

После интегрирования с использованием (2.21) получим:

$$y - y_0 = \frac{M_s}{\text{const}^*} (H - H_0) = \frac{M_s \cdot \Delta U}{2 \cdot \text{const}^*} \left(\frac{1}{x_{п}} - \frac{1}{x_{п0}} \right).$$

В результате получаем соотношение для расчета формы полюсного наконечника:

$$\frac{1}{x_{\Pi}} = \frac{1}{x_{\Pi 0}} - \frac{2 \cdot \text{const}}{M_s \cdot \Delta U} (y - y_0) \quad , \quad (2.24)$$

где $x_{\Pi 0}$ – значение x_{Π} в минимальном зазоре.

Таким же образом, но с учетом аппроксимирующей зависимости (2.20) для $M(H)$ получаем формулу для определения формы полюса при слабых полях:

$$\begin{aligned} M_s \frac{H}{H + H_T} \left(-\frac{\partial H}{\partial y} \right) &= \text{const}^* \\ \partial y &= -\frac{M_s}{\text{const}} \cdot \frac{H}{H + H_T} \partial H, \\ \int_{y_0}^y dy &= -\frac{M_s}{\text{const}} \int_{H_0}^H \frac{H + H_T - H_T}{H + H_T} dH. \\ y - y_0 &= \frac{M_s}{\text{const}} \left[(H_0 - H) - H_T \ln \frac{H_0 + H_T}{H + H_T} \right], \end{aligned}$$

Запишем предыдущее выражение в следующем виде:

$$y - y_0 = \frac{M_s}{\text{const}} H_T \left[(H_0^* - H^*) - \ln \frac{H_0^* + 1}{H^* + 1} \right],$$

где $H_0^* = \frac{H_0}{H_T}$, $H^* = \frac{H}{H_T}$.

Так как принято, что поле слабое ($H < H_T$), то $H_0^* < 1, H^* < 1$. В этом случае можно использовать разложение логарифмической функции в ряд:

$$\ln(x + 1) = x - x^2/2 + x^3/3 - x^4/4 + \dots, \text{ при } -1 < x < 1.$$

Ограничимся первыми двумя членами. Тогда:

$$\ln(H_0^* + 1) = H_0^* - \frac{(H_0^*)^2}{2},$$

$$\ln(H^* + 1) = H^* - \frac{(H^*)^2}{2},$$

$$\ln \frac{H_0^* + 1}{H^* + 1} = H_0^* - \frac{(H_0^*)^2}{2} - H^* + \frac{(H^*)^2}{2},$$

$$y = y_0 + \frac{1}{2} \cdot \frac{M_S}{\text{const}^*} \cdot \frac{1}{H_T} (H_0^2 - H^2).$$

В результате получаем соотношение для расчета формы полюсного наконечника при слабых полях

$$\frac{1}{x_{\Pi}^2} = \frac{1}{x_{\Pi 0}^2} - \frac{8 \cdot \text{const} \cdot H_T}{M_S \cdot \Delta U^2} (y - y_0). \quad (2.25)$$

Для оценки справедливости представленной выше методики, был произведен расчет геометрии полюсного наконечника с исключением допущения, что силовые линии поля – отрезки прямых, параллельных оси x . Это возможно при применении для расчета поля метода разделения переменных. При решении этой задачи использовалась расчетная область CDEF, представленная на рисунке 2.1, со следующими граничными условиями.

Граница 1 (линия CD):

$$U = 0, \quad H = H_{\text{cp}} + \frac{H_{\text{max}} - H_{\text{min}}}{h} y,$$

$$-\frac{\partial U}{\partial x} = H_{\text{cp}} + \sum_{\nu=1,3,5,\dots}^{\nu_{\text{max}}} H_{m\nu} \cos\left(\frac{\nu\pi}{h} y\right).$$

Границы 2 (линия DE) и 4 (линия FC): $-\frac{\partial U}{\partial y} = 0$.

Границы 3 (линия EF): $-U = U_{\Pi}$.

Задача решается в следующей последовательности:

$$U(x, y) = \sum_n ((a_n \operatorname{sh}(nx) + b_n \operatorname{ch}(nx)(c_n \sin(ny) + d_n \cos(ny))) + (a_0 x + b_0)(c_0 y + d_0)),$$

$$U(x=0, y) = \sum_n ((a_n \operatorname{sh}(0) + b_n \operatorname{ch}(0)(c_n \sin(ny) + d_n \cos(ny))) + (a_0 \cdot 0 + b_0)(c_0 y + d_0)) = 0,$$

$$b_n = 0, b_0 = 0,$$

$$U(x, y) = \sum_n (a_n \operatorname{sh}(nx)(c_n \sin(ny) + d_n \cos(ny)) + a_0 x \cdot (c_0 y + d_0),$$

$$-\frac{\partial U}{\partial x}(x=0, y) = -\sum_n (a_n \cdot n \cdot 1 \cdot (c_n \sin(ny) + d_n \cos(ny)) - a_0 x \cdot (c_0 y + d_0)) =$$

$$= H_{cp} + \sum_{v=1,3,5,\dots}^{v_{max}} H_{mv} \cos\left(\frac{v\pi}{h} y\right),$$

$$c_n = 0, n = \frac{v\pi}{h}, a_n d_n = -\frac{H_{mv}}{n} = -\frac{H_{mv} h}{v\pi}, c_0 = 0, a_0 d_0 = -H_{cp},$$

$$U(x, y) = \sum_n a_n d_n \operatorname{sh}(nx) \cos(ny) + a_0 d_0 x,$$

$$U(x, y) = -\sum_n \frac{H_{mv} h}{v\pi} \operatorname{sh}\left(\frac{v\pi}{h} x\right) \cos\left(\frac{v\pi}{h} y\right) - H_{cp} x,$$

$$U(x = x_n, y) = -\sum_n \frac{H_{mv} h}{v\pi} \operatorname{sh}\left(\frac{v\pi}{h} x_n\right) \cos\left(\frac{v\pi}{h} y\right) - H_{cp} x_n = -U_n.$$

В результате получаем соотношение:

$$x_n - \frac{U_n}{H_{cp}} + \sum_{v=1,3,5,\dots}^{v_{max}} \frac{h}{H_{cp} v\pi} H_{mv} \cos\left(\frac{v\pi}{h} y\right) \cdot \operatorname{sh}\left(\frac{v\pi}{h} x_n\right) = 0. \quad (2.26)$$

Так как уравнение получилось нелинейным, поиск решения выполнялся численным методом (методом перебора). Суть его в том, что задавалось интересующее значение y , а значения x_n перебирались с заданным шагом до тех пор, пока уравнение не удовлетворялось с заданной точностью.

Для сравнения различных способов расчета формы полюсного наконечника были построены с использованием среды Mathcad профили полюсных наконечников, которые изображены на рисунках 2.14 и 2.15.

Форма наконечника на рисунке 2.14 рассчитывалась из условия создания максимальной индукции (в минимальном зазоре) $B_{\max} = 0,7$ Тл и минимальной (в максимальном зазоре) – $B_{\min} = 0,4$ Тл.

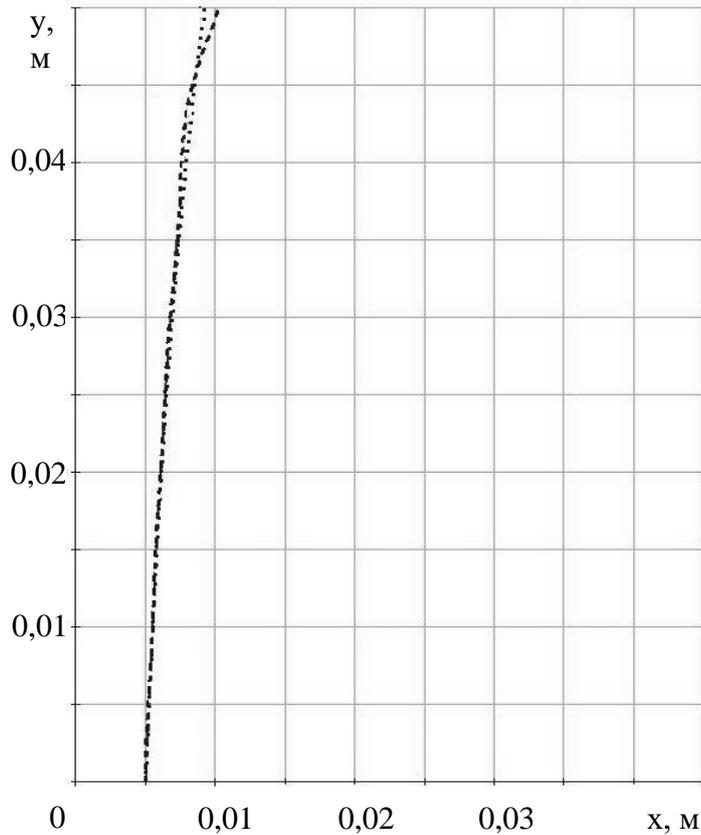


Рисунок 2.14. Формы поверхности полюсного наконечника при сильном поле, рассчитанные:

••••• – по соотношению (2.24); - - - - - – по методу разделения переменных

Аналогично для рисунка 2.15 – $B_{\max} = 0,063$ Тл, $B_{\min} = 0,061$ Тл. На рисунке 2.15, б изображен тот же профиль что и на рисунке 2.15, а, но в увеличенном масштабе.

Из представленных графиков видно, что геометрии полюсов, полученные разными способами, практически не отличаются. Но способы, отличные от предложенного в [54], более трудоемкие.

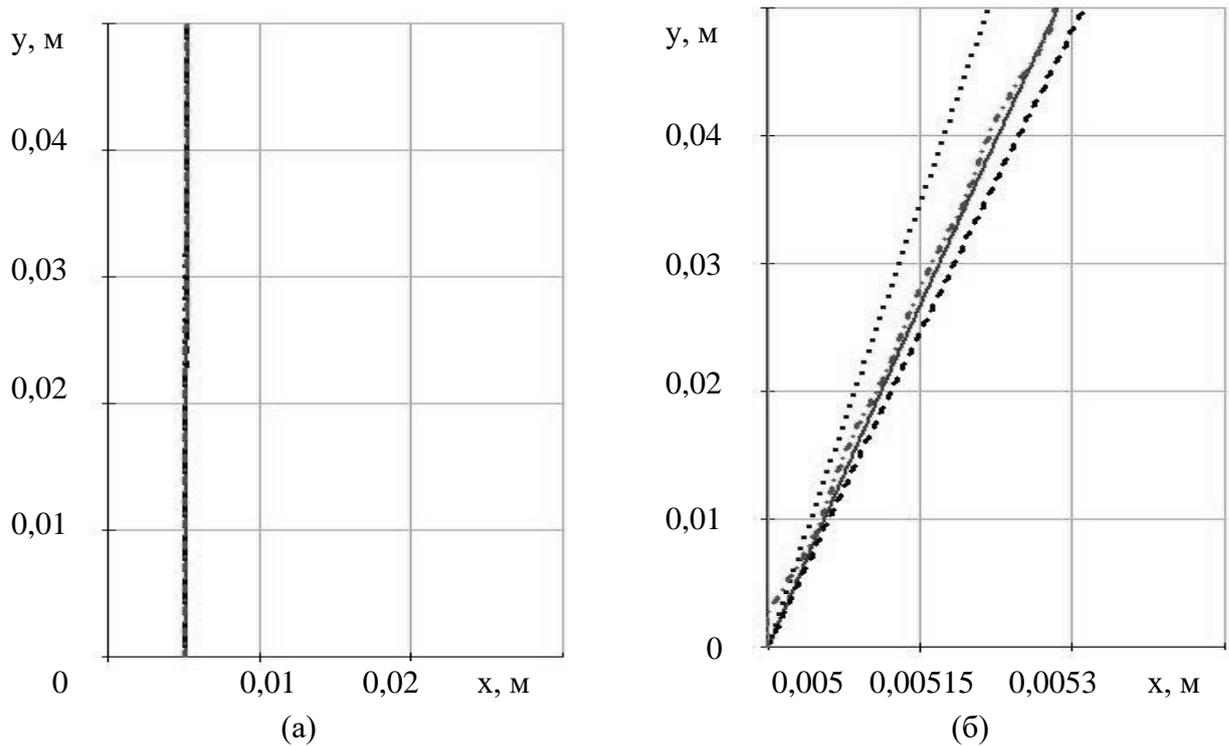


Рисунок 2.15. Формы поверхности полюсного наконечника при слабом поле (а), (б) - в укрупненном масштабе:

— — — - по соотношению (2.25); ————— - с учетом реальной кривой намагничивания;
 - · - · - · - по методу разделения переменных; · · · · · - по соотношению (2.24)

2.4. Методика проектирования электромагнитных магнитожидкостных сепараторов

В общем смысле рассматриваемый магнитожидкостный сепаратор представляет из себя электромагнит, рабочим телом которого является магнитная жидкость. Поэтому этапы проектирования ЭМЖС, связанные с расчетом обмотки возбуждения и ярма магнитной системы, не отличаются от аналогичных расчетов электромагнитных систем других электромагнитных и электромеханических преобразователей, описанных отечественными, так и зарубежными авторами [9, 30, 38, 44, 83, 68, 94, 98, 99, 119].

Основными особенностями проектирования электромагнитных магнитожидкостных сепараторов являются:

1. Требование формирования магнитного поля в зазоре с постоянным градиентом напряженности.

2. Учет присутствия в зазоре магнитной жидкости с нелинейной характеристикой намагничивания.
3. Учет влияния интенсивности магнитного поля на свойства магнитной жидкости.

Поэтому далее рассматриваются этапы проектирования электромагнитного магнитожидкостного сепаратора, связанные с вышеперечисленными особенностями.

Исходными данными для проектирования ЭМЖС являются:

- плотности частиц легкой $\rho_{чл}$ и тяжелой $\rho_{чт}$ фракций;
- максимальный диаметр частиц $d_{ч\max}$;
- производительность ЭМЖС для легкой $Q_{л}$ и тяжелой $Q_{т}$ фракций;
- начальная скорость движения частиц после подающего устройства на поверхности магнитной жидкости (МЖ) $\bar{v}_0 = v_{0y}\bar{e}_y + v_{0z}\bar{e}_z$.

Проектный расчет ЭМЖС включает в себя следующие этапы:

- выбор МЖ;
- выбор геометрии рабочего зазора ЭМЖС;
- определение положения МЖ в рабочем зазоре ЭМЖС;
- расчет производительности ЭМЖС;
- тепловой расчет обмотки возбуждения ЭМЖС.

2.4.1. Выбор магнитной жидкости

Для сепарации обычно используют МЖ на керосине с намагниченностью насыщения $M_S=10\div 40$ кА/м, как наиболее дешевую и маловязкую. Понижение вязкости МЖ способствует повышению производительности сепарации. Недостатки МЖ на керосине: токсичность, пожароопасность, высокая испаряемость. Можно использовать МЖ на воде, но она дороже. Для выбранной МЖ считаются известными: зависимость ее намагниченности от напряженности магнитного поля $M(H)$, значения намагниченности насыщения M_S и плотности $\rho_{ж}$.

2.4.2. Выбор геометрии рабочего зазора электромагнитного магнитожидкостного сепаратора

Минимальная ширина рабочего зазора (рисунок 2.16) должна превышать максимальный диаметр частиц: $2x_{\pi 0} > d_{ч \max}$.

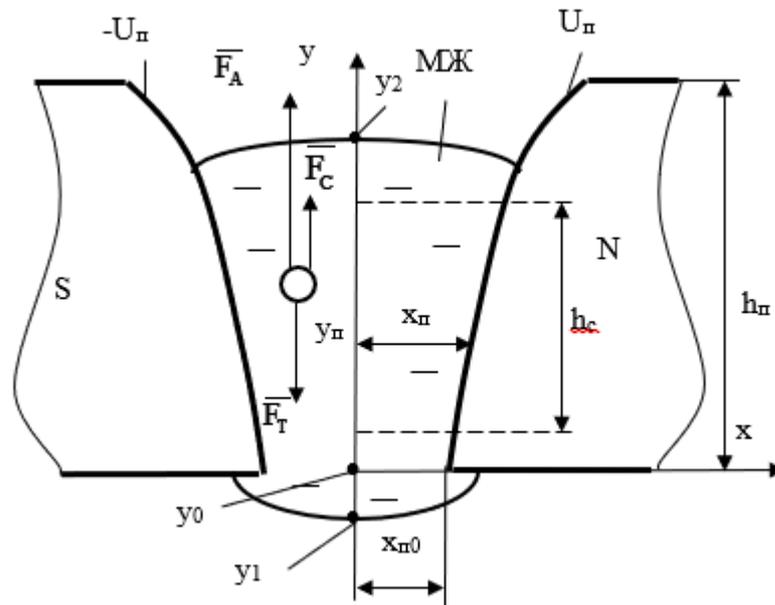


Рисунок. 2.16. Область рабочего зазора магнитожидкостного сепаратора

Геометрия профиля полюсного наконечника рассчитывается по соотношению:

$$\frac{x_{\pi}}{x_{\pi 0}} = \frac{1}{1 - A(y_{\pi} - y_0)} \quad \Rightarrow \quad A = \frac{g \cdot (\rho^* - \rho_{ж})}{M_s \cdot B_{\max}} \quad (2.27)$$

где: $\rho^* = 0,5(\rho_{чл} + \rho_{чт})$ – среднее значение плотности сепарируемых частиц;

$B_{\max} = \mu_0 U_{\pi} / x_{\pi 0}$ – максимальное значение индукции в рабочем зазоре МЖС; U_{π} – значение скалярного магнитного потенциала на поверхности полюсного наконечника; g – ускорение свободного падения.

Величины, входящие в коэффициент A , изменяются в задаваемых пределах при: $(\rho^* - \rho_{ж}) = 4000 \div 12000$ кг/м³ – при разделении металлов от алюминия до свинца; $M_s = 10 \div 40$ кА/м; $B_{\max} = 0,4 \div 1$ Тл. Для формы поверхности полюсного наконечника представленной на рисунке 2.15 с учетом обозначенных диапазонов переменных коэффициент A принимает значения в интервале $A = 2,5 \div 25$ м⁻¹. Значения A и $x_{\pi 0}$ определяют высоту зоны сепарации рабочего зазора h_c , в пределах

которой результирующая сила $F_{\text{выт}} = F_C + F_A - F_T$, выталкивающая немагнитную частицу из МЖ, постоянна. Для зависимостей на рисунке 2.17 $F_{\text{выт}} \approx \text{const}$ с точностью 5%. Увеличение h_c способствует повышению точности сепарации. В соответствии с рисунком 2.18 это возможно при уменьшении A , то есть при увеличении $(M_S \cdot V_{\text{max}})$. Рост M_S достигается за счет увеличения объемной концентрации магнитной фазы МЖ, что ведет к увеличению вязкости МЖ и, как следствие, к снижению производительности МЖС. Рост V_{max} возможен при увеличении МДС обмотки возбуждения, что приведет к росту стоимости МЖС и потребления электрической энергии. Целесообразно выбирать $h_c = (0,05 \div 0,1)$ м.

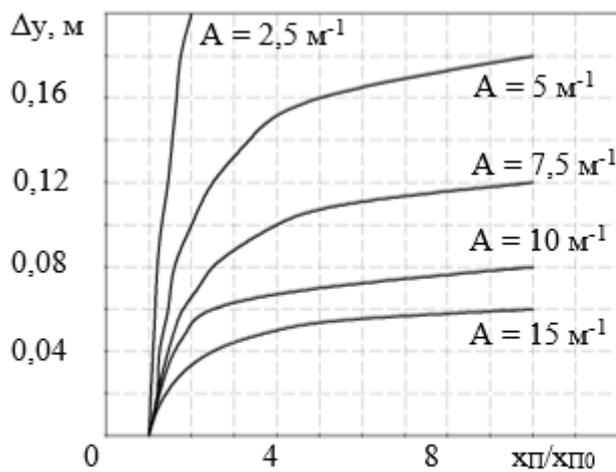


Рисунок 2.17. Профили полюсных наконечников при различных значениях A

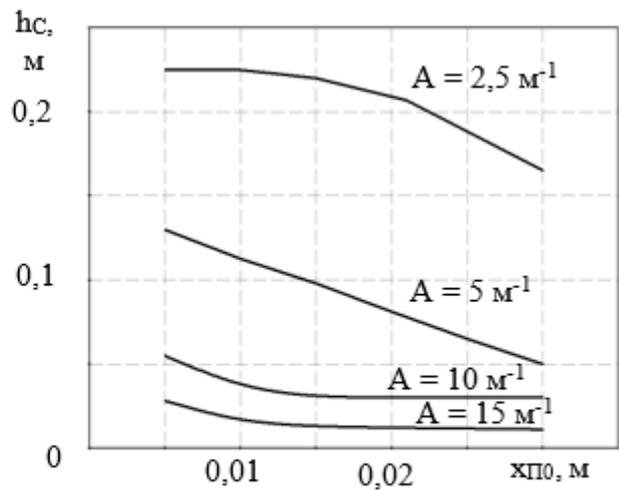


Рисунок 2.18. Изменение высоты зоны сепарации h_c рабочего зазора МЖС от A и $x_{\text{п0}}$

2.4.3. Определение положения магнитной жидкости в рабочем зазоре электромагнитного магнитожидкостного сепаратора

Для полученной в ходе проектирования разности потенциалов полюсных наконечников $\Delta U_{\Pi} = U_{\Pi N} - U_{\Pi S} = 2x_{\Pi 0} \cdot B_{\max} / \mu_0$ производится расчет магнитного поля в рабочем зазоре ЭМЖС. Определение положения и высоты столба МЖ в зазоре (рисунок 2.16) производится на основании равенства разности удельных магнитных энергий МЖ в гравитационном и магнитном полях в крайних точках по высоте

$$\rho g \cdot (y_2 - y_1) = \mu_0 \int_{y_1}^{y_2} M \cdot dH. \quad (2.28)$$

На рисунке 2.19 представлены зависимости глубины погружения немагнитной частицы в магнитную жидкость от параметра A . Постановка задачи и алгоритмы расчета глубины погружения рассмотрены в предыдущих разделах.

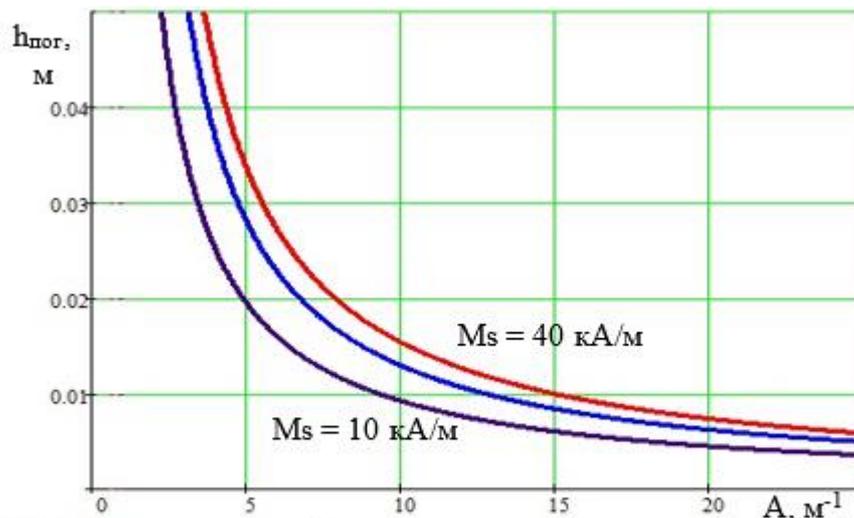


Рисунок 2.19. Зависимость глубины погружения немагнитной частицы от параметра A при различной намагниченности насыщения МЖ

Расчет магнитного поля в плоскопараллельной постановке производился методом конечных элементов с использованием пакета Ansys Maxwell. По результатам расчета можно построить зависимости магнитной и гравитационной энергии в зазоре МЖС (рисунок 2.20). По данному графику определяются положение МЖ в зазоре и высота зоны сепарации. Рабочая часть столба магнитной жидкости (h_p) определяется как расстояние между максимумом магнитной энергии и точкой пересечения графиков магнитной и гравитационной энергий. Серия таких

расчетов позволяет построить зависимости высоты рабочей зоны сепарации от величины A и минимального зазора $x_{п0}$, которые представлены на рисунке 2.21.

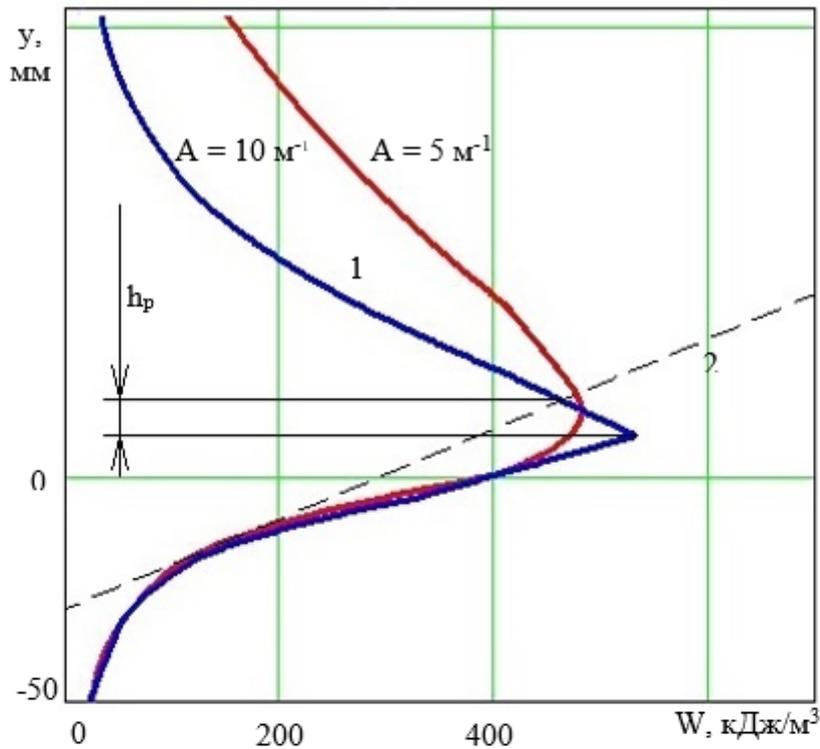


Рисунок 2.20. Распределение удельной энергии по высоте зазора:
1 – магнитной, 2 – гравитационной

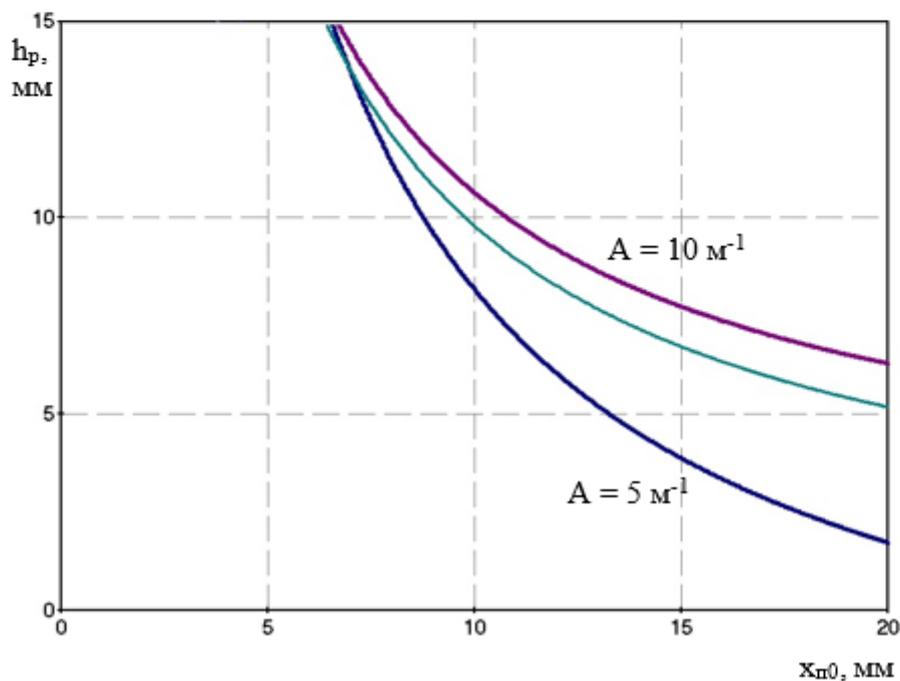


Рисунок 2.21. Зависимость высоты рабочей зоны сепарации (h_p) от минимального зазора при различных значениях A .

Таким образом, зная глубину погружения частицы (рисунок 2.19), которая также зависит от параметра A и намагниченности насыщения МЖ M_s , можно выбрать

необходимые параметры ЭМЖС, такие как: профиль полюсных наконечников, намагниченность насыщения, минимальный зазор и прочее, что в свою очередь является важным этапом при проектировании МЖС.

2.4.4. Расчет производительности электромагнитного магнитожидкостного сепаратора

Производительность сепаратора при движении разделяемого материала монослоем можно рассчитать по следующему соотношению:

$$Q = d \cdot b \cdot v / k,$$

где d – средний диаметр частицы разделяемого материала, b – ширина слоя разделяемого материала, v – средняя скорость движения разделяемой смеси по направлению к разгрузочному устройству, k – коэффициент заполнения зазора разделяемым материалом [87].

Так как движение сепарируемой смеси в магнитожидкостном сепараторе происходит в двух направлениях: в горизонтальной плоскости для легкой фракции, и в вертикальной для тяжелой, то следует рассматривать две производительности – по легкой и тяжелой фракциям.

Таким образом,

$$Q_{\text{л}} = \rho_{\text{л}} \cdot d_{\text{л}} \cdot b \cdot v_{\text{хср}} / k_{\text{л}} - \text{производительность для легкой фракции};$$

$$Q_{\text{т}} = \rho_{\text{т}} \cdot d_{\text{т}} \cdot \delta \cdot v_{\text{уср}} / k_{\text{т}} - \text{производительность для тяжелой фракции},$$

где $d_{\text{л}}$ и $d_{\text{т}}$ диаметры легкой и тяжелой частиц соответственно, b – длина дуги верхней поверхности магнитной жидкости, δ – величина минимального зазора магнитожидкостного сепаратора (рисунок 2.22), $v_{\text{хср}}$ и $v_{\text{уср}}$ средние скорости движения по соответствующим осям, $k_{\text{л}}$ и $k_{\text{т}}$ коэффициенты заполнения легкой и тяжелой фракций соответственно [43,69].

Для получения объемной производительности необходимо воспользоваться следующим соотношением:

$$Q_v = Q/\rho,$$

где ρ - плотность соответствующей фракции.

При использовании такой модели могут быть определены скорости движений частиц в зоне разделения сепаратора.

Так как скорость частицы при ее движении в зоне разделения не является постоянной определяется средняя скорость

$$\vartheta_{\text{cp}} = \frac{\int_0^T \vartheta dt}{T}, \quad (2.29)$$

где T – время движения в зоне разделения.

Численно средняя скорость будет составлять

$$\vartheta_{\text{cp}} = \frac{\sum_1^N \vartheta_i \Delta t}{T}, \quad (2.30)$$

где ϑ_i – скорость на i -ой итерации, N – номер итерации, на которой происходит выход частицы из зоны разделения.

Если $T = N \cdot \Delta t$, то
$$\vartheta_{\text{cp}} = \frac{\sum_1^N \vartheta_i}{N}. \quad (2.31)$$

В качестве примера были рассчитаны производительности электромагнитного магнитожидкостного сепаратора при разных углах наклона полюсных наконечников. Для расчета были приняты следующие параметры магнитной жидкости: вязкость 7,5 Па·с, плотность 1,15 г/см³, намагниченность насыщения 25 кА/м [58]. Разделяемая смесь представлялась двухкомпонентной с частицами диаметром 1,5 мм и плотностями 7,26 г/см³ (олово) и 2,7 г/см³ (алюминий) для тяжелой и легкой фракций, соответственно. Параметры сепаратора соответствуют лабораторной установке: длина зоны разделения 15 см, высота зоны разделения 7 см, длина дуги верхней поверхности магнитной жидкости 2,5 см, минимальный зазор 1 см.

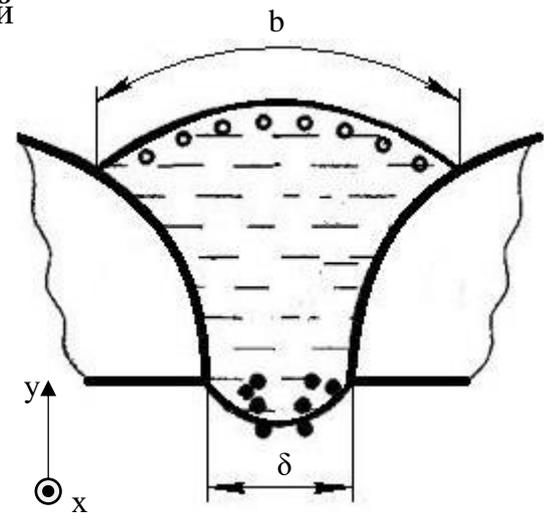


Рисунок 2.22. Зазор магнитожидкостного сепаратора

В результате расчета получены скорости движения и время нахождения на каждом участке, на основании которых вычислены зависимости массовой (рисунок 2.23) и объемной (рисунок 2.24) производительностей от угла наклона полюсных наконечников (результаты расчетов сведены в таблице 2.1).

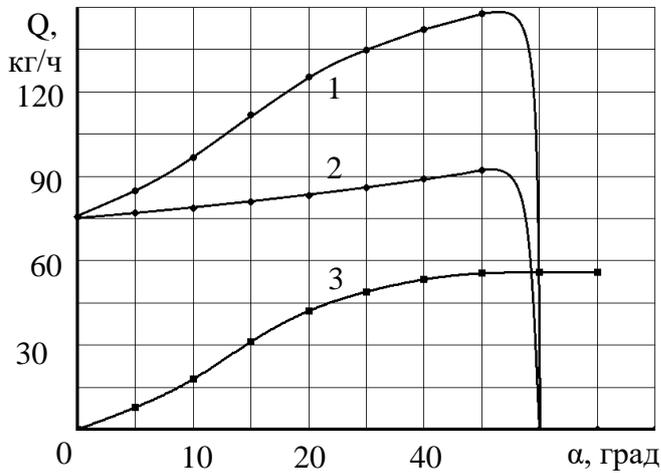


Рисунок 2.23. Зависимость производительности ЭМЖС от угла наклона полюсов: 1 – суммарная, 2 – по тяжелой фракции, 3 – по легкой фракции.

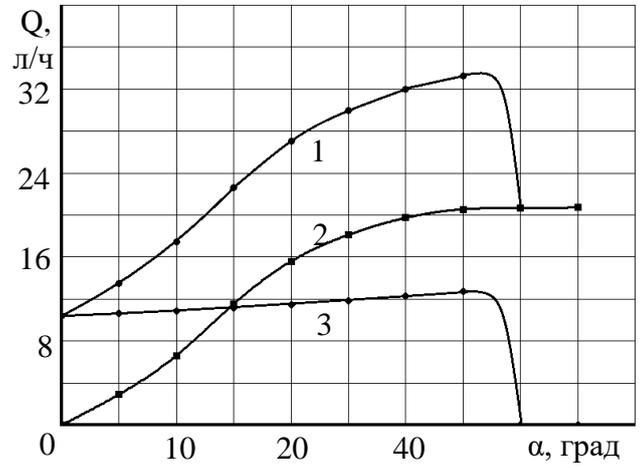


Рисунок 2.24. Зависимость объемной производительности ЭМЖС от угла наклона полюсов: 1 – суммарная, 2 – по легкой фракции, 3 – по тяжелой фракции.

Таблица 2.1. Зависимости массовой и объемной производительности магнитожидкостного сепаратора от угла наклона полюсов.

α, град	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
Q _т , кг/ч	75,48	76,98	78,74	80,79	83,15	85,86	88,94	92,21	-	-
Q _л , кг/ч	-	7,86	17,85	31,12	42,09	48,91	53,3	55,5	55,83	55,95
Q _Σ , кг/ч	75,48	84,84	96,59	111,91	125,24	134,77	142,24	147,71	55,83	55,95
Q _{вт} , л/ч	10,40	10,60	10,85	11,13	11,45	11,83	12,25	12,70	0,00	0,00
Q _{вл} , л/ч	0,00	2,91	6,61	11,53	15,59	18,11	19,74	20,56	20,68	20,72
Q _{вΣ} , л/ч	10,40	13,51	17,46	22,65	27,04	29,94	31,99	33,26	20,68	20,72

Разработанную методику можно применять к разным типам электромагнитных магнитожидкостных сепараторов. Полученные зависимости позволяют подобрать оптимальные параметры сепаратора для обеспечения максимальной производительности и энергоэффективности процесса разделения. Становится возможной оценка влияния параметров магнитожидкостного

сепаратора. Так, например, из графиков (рисунок 2.23, рисунок 2.24) следует, что при угле наклона полюсных наконечников более 40° тяжелая фракция начинает попадать в легкую и такое положение полюсов является неприемлемым. Используя разработанную на основе этого алгоритма программу для ЭВМ [96], можно спроектировать магнитожидкостный сепаратор, максимально отвечающий требованиям процесса разделения при переработке вторичных материалов.

2.4.5. Упрощенный тепловой расчет обмотки возбуждения электромагнитного магнитожидкостного сепаратора

1. Выбирается напряжение питания катушки U .
2. Намагничивающая сила катушки $(IW)_{\text{кат}} = F_{\text{полн}}/n$.
3. Наружный диаметр катушки $D_{\text{н}} = \left(\frac{d_{\text{ст}}}{2} + h_{\text{обм}} + 2\delta_{\text{ст.к}}\right) \cdot 2$.
4. Внутренний диаметр катушки $D_{\text{вн}} = d_{\text{ст}} + 2\delta_{\text{ст.к}}$.
5. Длина катушки $l_{\text{к}} = l_{\text{обм}} + 2\delta_{\text{ст.к}}$.
6. Площадь окна катушки $S_{\text{ок}} = l_{\text{к}}b_{\text{обм}} = l_{\text{к}}(D_{\text{н}} - D_{\text{вн}})/2$.
7. Выбирается обмоточный провод. Сечение провода обмотки

$$S'_{\text{м}} = (IW)_{\text{кат}} \rho_{\text{т}} l_{\text{ср.в}} / U,$$

где $l_{\text{ср.в}} = \pi D_{\text{ср}}$, $D_{\text{ср}} = (D_{\text{н}} + D_{\text{вн}})/2$.

8. Для полученного $S'_{\text{м}}$ по сортаменту выбирается ближайшие стандартные значения $S_{\text{м}}$, $d_{\text{нниз}}$, $d_{\text{из}}$.
9. Выбирается коэффициент заполнения $k_3 = (0,68 \div 0,72)$.
10. Число витков обмотки $w = k_3 S_{\text{ок}} / S_{\text{м}}$.
11. Электрическое сопротивление обмотки $R = w \rho_{\text{т}} l_{\text{ср.в}} / S_{\text{м}}$.
12. Ток в обмотке $I = (IW)_{\text{кат}} / w$.
13. Число витков в слое $w_{\text{сл}} = l_{\text{обм}} / d_{\text{из}}$.
14. Число слоев $n_{\text{сл}} = w / w_{\text{сл}}$.
15. Число витков окончательно $w_{\text{ок}} = w_{\text{сл}} n_{\text{сл}}$.
16. Уточняем коэффициент заполнения и ток в обмотке

$$k_3 = w_{\text{ок}} S_{\text{м}} / S_{\text{ок}}, I = (IW)_{\text{кат}} / w_{\text{ок}}$$

17. Плотность тока в катушке

$$j = I / S_M.$$

18. Потребляемая катушкой мощность

$$P = I^2 R.$$

19. Поверхность охлаждения

$$S_{\text{охл}} = S_H + k_B(S_{\text{вн}} + 2 S_T),$$

где $S_H = \pi D_H l_{\text{обм}}$ - площадь наружной поверхности катушки; $S_{\text{вн}} = \pi D_{\text{вн}} l_{\text{обм}}$ - площадь внутренней поверхности катушки; $S_T = (D_H^2 - d_{\text{ст}}^2) \pi / 4$ - площадь торцевой поверхности катушки.

20. Перегрев обмотки

$$t = P / (k_t S_{\text{охл}}),$$

где k_t - коэффициент теплоотдачи.

Результаты, положенные в основу данной главы, были опубликованы в соавторстве в работах [5, 7, 47, 49, 49, 46, 48, 55, 78, 95, 101, 102, 106, 107, 104, 111, 117, 118]. Личный вклад соискателя: в работах автору принадлежит постановка задач исследования, разработка уточненных математических моделей, методик и программ, проведение расчётных исследований.

2.5. Выводы

В результате реализованного математического моделирования процесса разделения немагнитных материалов в электромагнитных магнитожидкостных сепараторах установлено, что:

1. Разработанные расчетные методики и математические модели воздействия магнитных сил и давлений на немагнитное тело в магнитной жидкости позволяют анализировать силовые характеристики электромагнитного магнитожидкостного сепаратора с учетом намагниченности насыщения и плотности магнитной жидкости, индукции и модуля градиента напряженности внешнего магнитного поля, диаметра и плотности материала частиц.

2. Предложенная математическая модель движения немагнитных частиц в зоне разделения электромагнитного магнитожидкостного сепаратора позволяет рассчитывать скорость движения, глубину и время погружения частиц в сепараторе, производительность сепарации, траектории перемещения

немагнитных частиц в магнитной жидкости, условия их всплытия и/или погружения с учетом намагниченности насыщения, плотности, высоты столба и динамической вязкости магнитной жидкости, диаметра и материала частиц, высоты лотка подачи и начальной скорости частиц, длины и угла наклона активной части полюсов, модуля градиента напряженности внешнего магнитного поля.

3. Разработанные математические модели формирования поверхностей полюсных наконечников электромагнитного магнитожидкостного сепаратора позволяют определять конфигурацию рабочего зазора сепаратора, обеспечивающего постоянство сепарирующей магнитной силы с учетом плотности, характеристики намагничивания и намагниченности насыщения магнитной жидкости, материала частиц, высоты полюсных наконечников, модуля градиента напряженности внешнего магнитного поля, применение которых обеспечивает повышение точности разделения материалов с погрешностью не более 7 %.

5. Предложенная, на основе развитых математических моделей, методика проектирования активной зоны ЭМЖС позволяет разрабатывать конструкции магнитожидкостных сепараторов с учетом плотности немагнитных частиц, их размеров, производительности по легкой и тяжелой фракциям

3. КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ, СИЛ И ДАВЛЕНИЯ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МАГНИТОЖИДКОСТНЫХ СЕПАРАТОРАХ НЕМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

3.1. Конечно-элементная модель магнитного поля и распределения давления в зазоре электромагнитного магнитожидкостного сепаратора

Расчетная область задачи разбивается на треугольные элементы, образующих треугольную сетку. Для корректного анализа магнитных полей в сепараторе немагнитных частиц необходимо использовать сетку с максимально предельным числом конечных элементов, в которой размеры конечных элементов сравнимы с размерами сепарируемых частиц. Сетку, построенную даже для весьма сложной модели, можно сделать крайне неоднородной, то есть, размер конечных элементов в одних блоках модели можно сделать сильно отличающимся от размера элементов в других блоках. В таких случаях технология дискретизации, называемая методом геометрической декомпозиции. Она обеспечивает плавный переход от крупных элементов к мелким. Густота сетки непосредственно влияет на точность решения в частях расчетной области. Как правило, сетка должна быть особенно густой в местах сильной неоднородности поля, а также там, где требуется получить большую точность расчета.

Возможно управлять густотой сетки вручную, задавая шаги дискретизации в вершинах модели. Если необходима неравномерная сетка, задаются шаги в тех вершинах, где требуемая точность минимальна и максимальна. В этом случае шаги в остальных вершинах автоматически интерполируются вдоль сторон и внутрь блоков таким образом, чтобы обеспечить наиболее плавное изменение размеров ячеек в сетке.

Расчетная область электромагнитного магнитожидкостного сепаратора представлена на рисунке 3.1,а, где 1 – магнитопровод сепаратора с относительной магнитной проницаемостью 1000, 2 – токовая обмотка, возбуждающая магнитное поле, с намагничивающей силой 2667 А, 3 – магнитная жидкость, 4 – немагнитный сепарируемый материал, 5 – межполюсное пространство (воздух), 6 – край расчетной области на котором выполняется однородное условие Неймана, 7 – край расчетной области, на котором выполняется условие Дирихле $A_0 = 0$ Вб/м. На рисунке 3.1, б представлен увеличенный фрагмент расчетной сетки в области зазора сепаратора с магнитной жидкостью. Число узлов сетки с максимальным числом конечных элементов, в которой размеры конечных элементов сравнимы с размерами сепарируемых частиц, составляло 13 208.

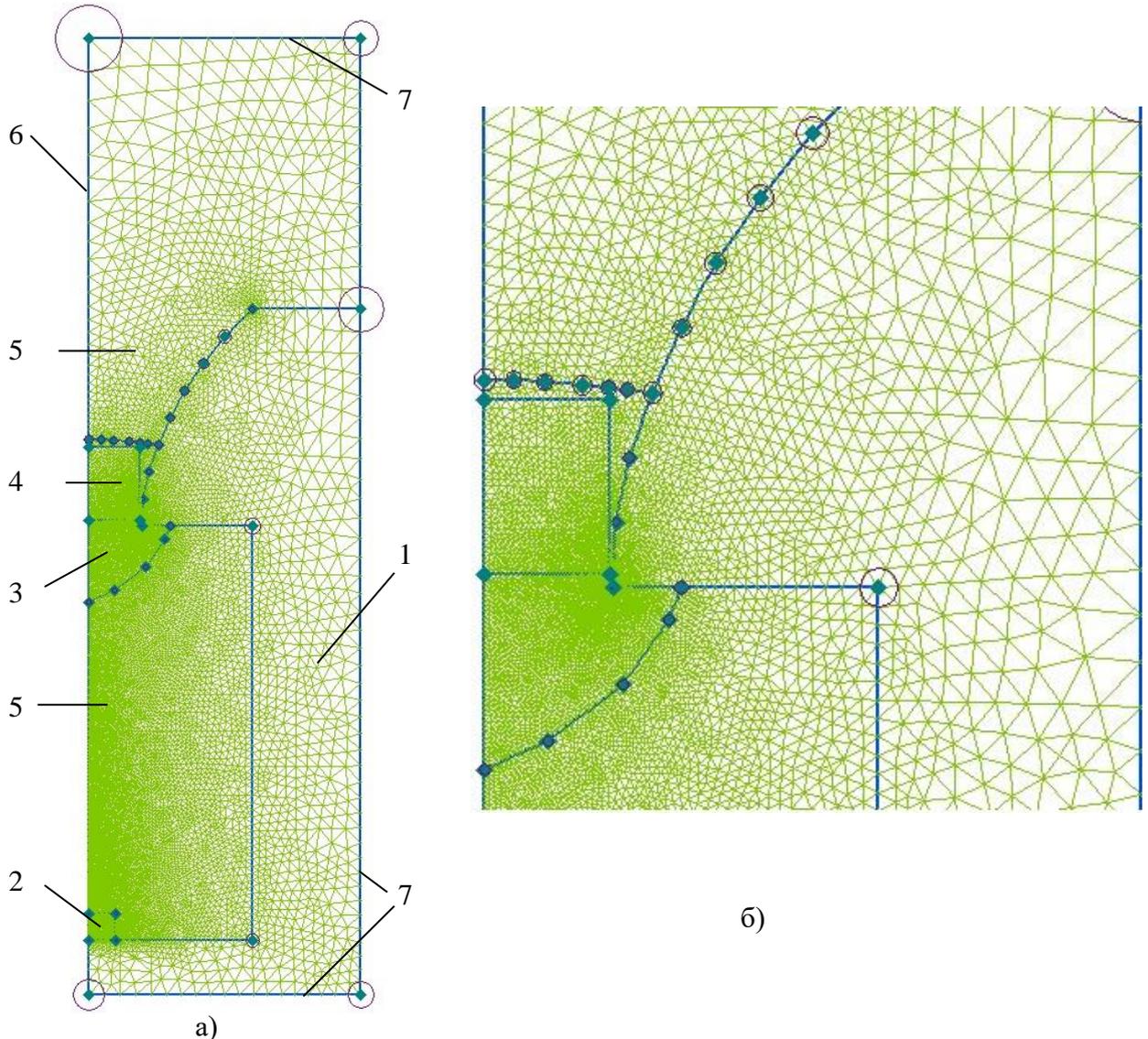


Рисунок 3.1. Расчетная область с предельным числом конечных элементов

Кривая намагничивания магнитной жидкости приведена в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Характеристика намагничивания МЖ.

В, Тл	0	0.017	0.025	0.042	0.08	0.12	0.222	0.436
М, А/м	0	6328.17	9464.368	12552.54	13641.98	15292.97	16021.99	16837.78
Н, А/м	0	7200	10430	20870	50020	80200	160640	330120

Расчетная область с конечно-элементной сеткой для проверки условия разделения немагнитных частиц изображена на рисунке 3.2.

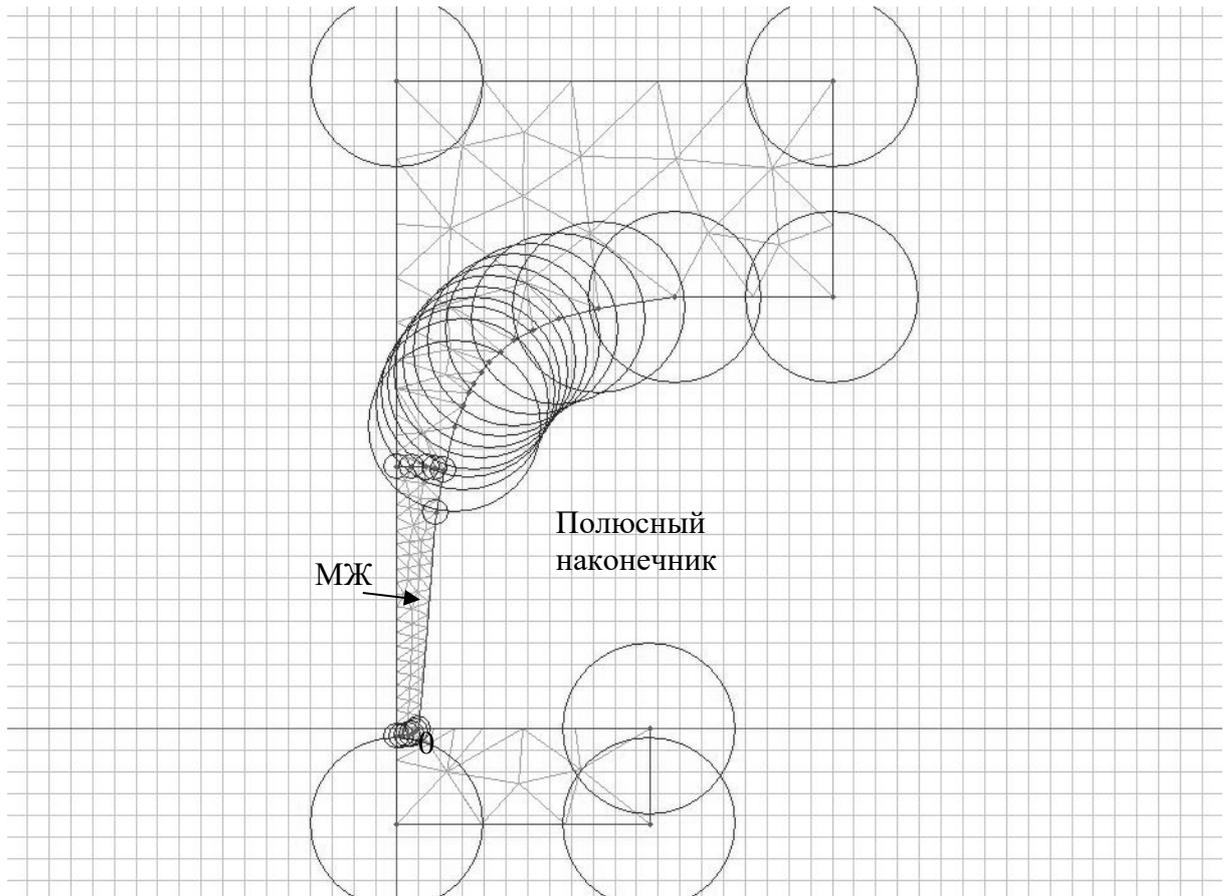


Рисунок 3.2. Расчетная область

Для полюсного наконечника, выполненного из стали Ст.3, и магнитной жидкости (дисперсионная среда - керосин, магнитная фаза - магнетит) были заданы реальные характеристики намагничивания. Магнитное поле задано векторным магнитным потенциалом A . Граничные условия для A : на оси ординат и поверхности полюсного наконечника – $dA/dn = 0$, где n – вектор нормали к линии границы; на верхней границе – $A=0$; на нижней границе $A= 0,05$ Вб/м, что соответствует средней индукции в зазоре 0,5 Тл. Построенная в расчетной области

сетка содержала 53000 элементов, что должно способствовать высокой точности расчетов.

Задача магнитостатики решалась в плоскопараллельной постановке, где уравнение поля имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_y} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_x} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -j + \left(\frac{\partial H_{cy}}{\partial x} - \frac{\partial H_{cx}}{\partial y} \right) \quad (3.1)$$

На внешних и внутренних границах расчетной области заданы следующие граничные условия.

Условие Дирихле, задающее на части границы заранее известный векторный магнитный потенциал A_0 в вершине или на ребре модели. Оно часто используется для задания нулевого значения, например на оси симметрии задачи или для указания полного затухания поля на удаленной от источников границе.

Условие Неймана имеет вид:

$$H_t = \sigma \quad - \text{ на внешних границах,}$$

$$H_t^+ - H_t^- = \sigma \quad - \text{ на внутренних границах,}$$

где H_t - тангенциальная компонента напряженности поля, индексы "+" и "-" означают "слева от границы" и "справа от границы" соответственно, а σ - линейная плотность поверхностного тока. Если $\sigma = 0$, граничное условие называется однородным. Однородное условие Неймана на внешней границе означает отсутствие касательной составляющей индукции на границе. Однородное условие Неймана является естественным граничным условием, т. е. оно предполагается заданным по умолчанию на всех участках внешней границы, где явно не указаны иные виды граничных условий [2].

Результаты моделирования могут быть представлены в виде:

- локальных числовых характеристик поля – индукций, напряженностей, магнитных проницаемостей и др. в точках области расчета;
- интегральных величин - магнитного потока, магнитодвижущей силы, энергии поля, силы;
- линий поля - линии магнитного потока (силовые линии) для магнитного поля;

- векторов - семейства прямолинейных направленных отрезков, изображающих величину и направление векторной физической величины;
- цветной карты, которая показывает распределение выбранной физической величины. Цветная карта сопровождается цветовой шкалой, показывающей соответствие между цветом и значением физической величины;
- цветовой шкалы, которая показывает соответствие между цветом на картине поля и значением физической величины.

3.2. Анализ результатов конечно-элементного моделирования магнитного поля сепаратора

После расчета поля в программном комплексе ELCUT, использовался встроенный экспорт в файл формата .txt, после чего данные программным образом передавались в MS Excel, где рассчитывалось распределение давлений в МЖ.

Результаты расчетов представлены на рисунках 3.3 - 3.10. На рисунке 3.3. представлены: распределение линий магнитного поля в сепараторе с магнитной жидкостью при наличии немагнитного тела, направление линии анализа распределения параметров магнитного поля по вертикальной оси по середине зазора, цветовые картина и шкала магнитного поля, распределение напряженности магнитного поля вдоль линии анализа.

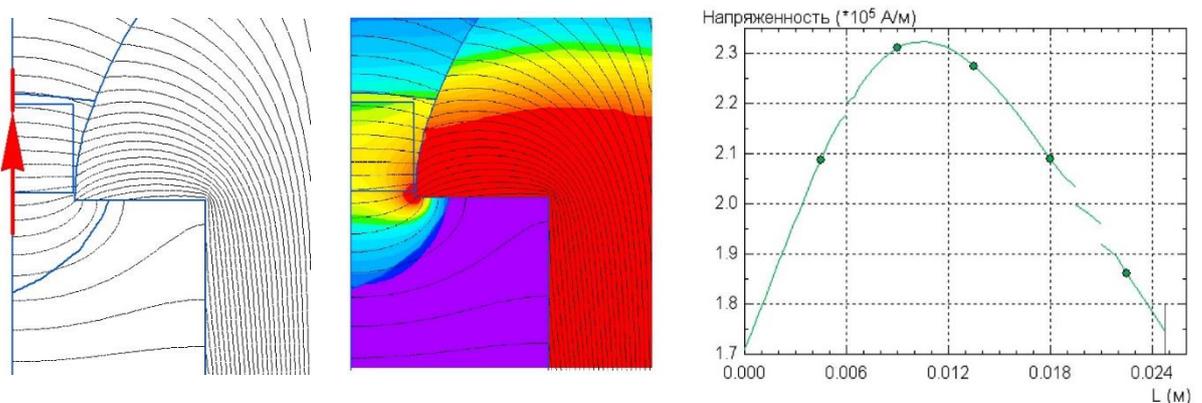


Рисунок 3.3. Результаты расчета поля в зазоре МЖС с немагнитным телом

На рисунке 3.4 представлены результаты расчета магнитного поля в зазоре магнитоожидкостного сепаратора без немагнитного тела, аналогичные варианту рисунка 3.3.

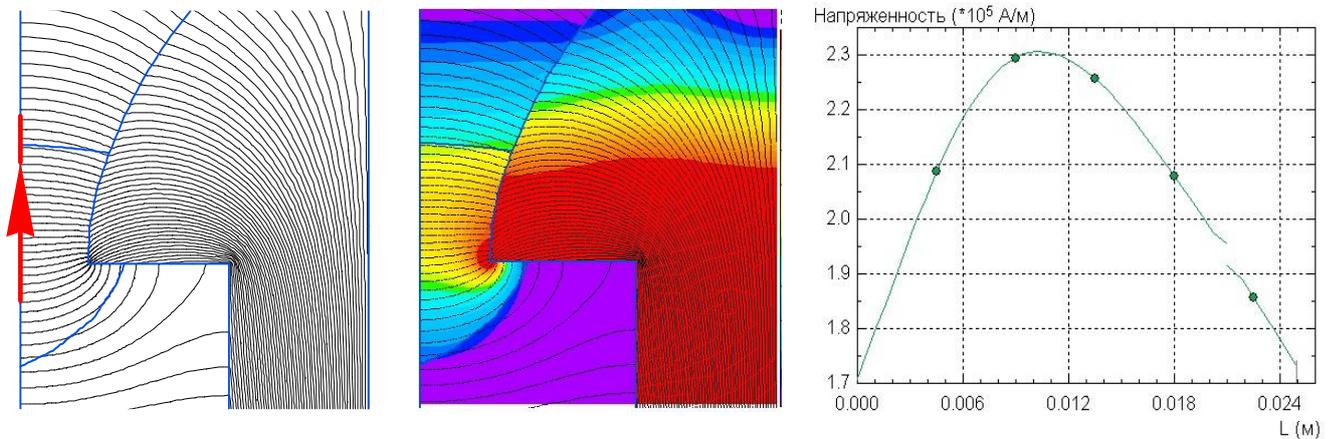


Рисунок 3.4. Результаты расчета поля в зазоре МЖС без немагнитного тела

На рисунке 3.5 представлены результаты расчета магнитного поля в зазоре при наличии немагнитного тела квадратной формы с размерами, меньшими чем для варианта рисунка 3.3 – для оценки влияния размеров частиц на процесс сепарации.

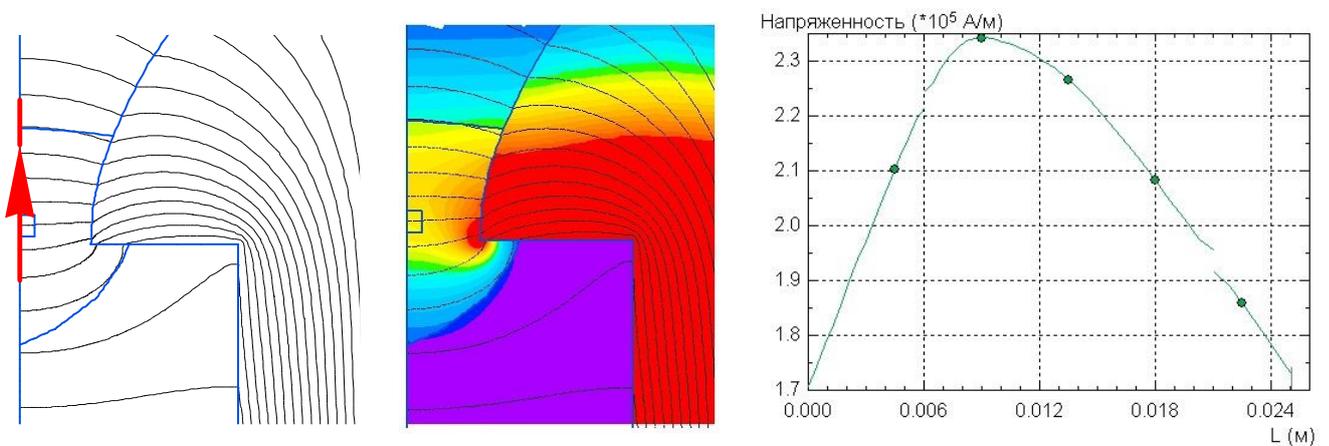


Рисунок 3.5. Результаты расчета поля в МЖС с малым квадратным немагнитным телом

На рисунке 3.6 представлены результаты расчетов магнитного поля в зазоре электромагнитного магнитоожидкостного сепаратора при наличии немагнитного тела прямоугольной формы небольших размеров, но такой же площади, что и для варианта рисунка 3.5.

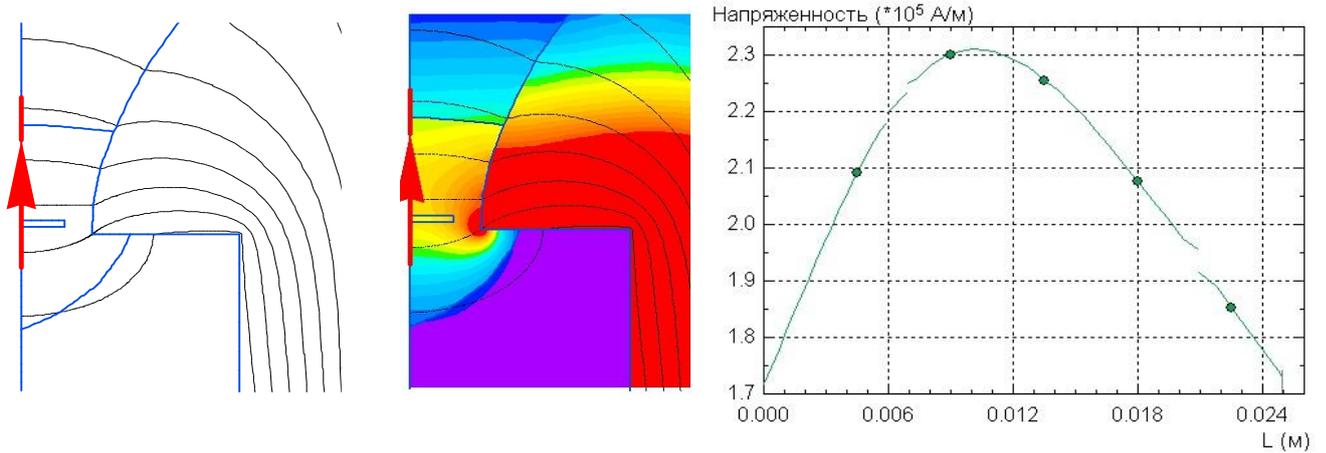


Рисунок 3.6. Результаты расчета поля в МЖС с небольшим немагнитным телом прямоугольной формы

Так же было рассчитано поле в зазоре сепаратора для проверки условия разделения немагнитных частиц – $M|\nabla H| = \text{const}$. Значение магнитной силы рассчитывалось на всплытие частиц, плотность которых меньше плотности свинца.

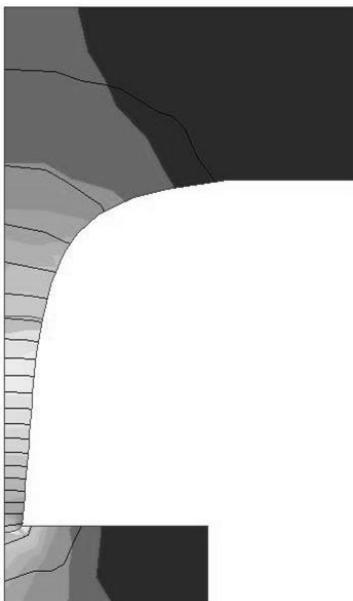


Рисунок 3.7. Картина

Результаты расчетов представлены на рисунке 3.7 и рисунке 3.8. Зависимости напряженности магнитного поля по ширине рабочего зазора на различной высоте (рисунок 3.8) показывают, что разность напряженностей на интервале 10 мм практически не изменяется по высоте зазора. Это позволяет утверждать, что градиент напряженности ∇H постоянен по высоте зазора. Так как напряженность магнитного поля принимает значения выше 250 кА/м, то магнитная жидкость находится в состоянии насыщения и ее намагниченность $M = M_s = \text{const}$.

Следовательно, распределение магнитного поля в рабочем зазоре удовлетворяет условию разделения немагнитных частиц – $M|\nabla H| = \text{const}$.

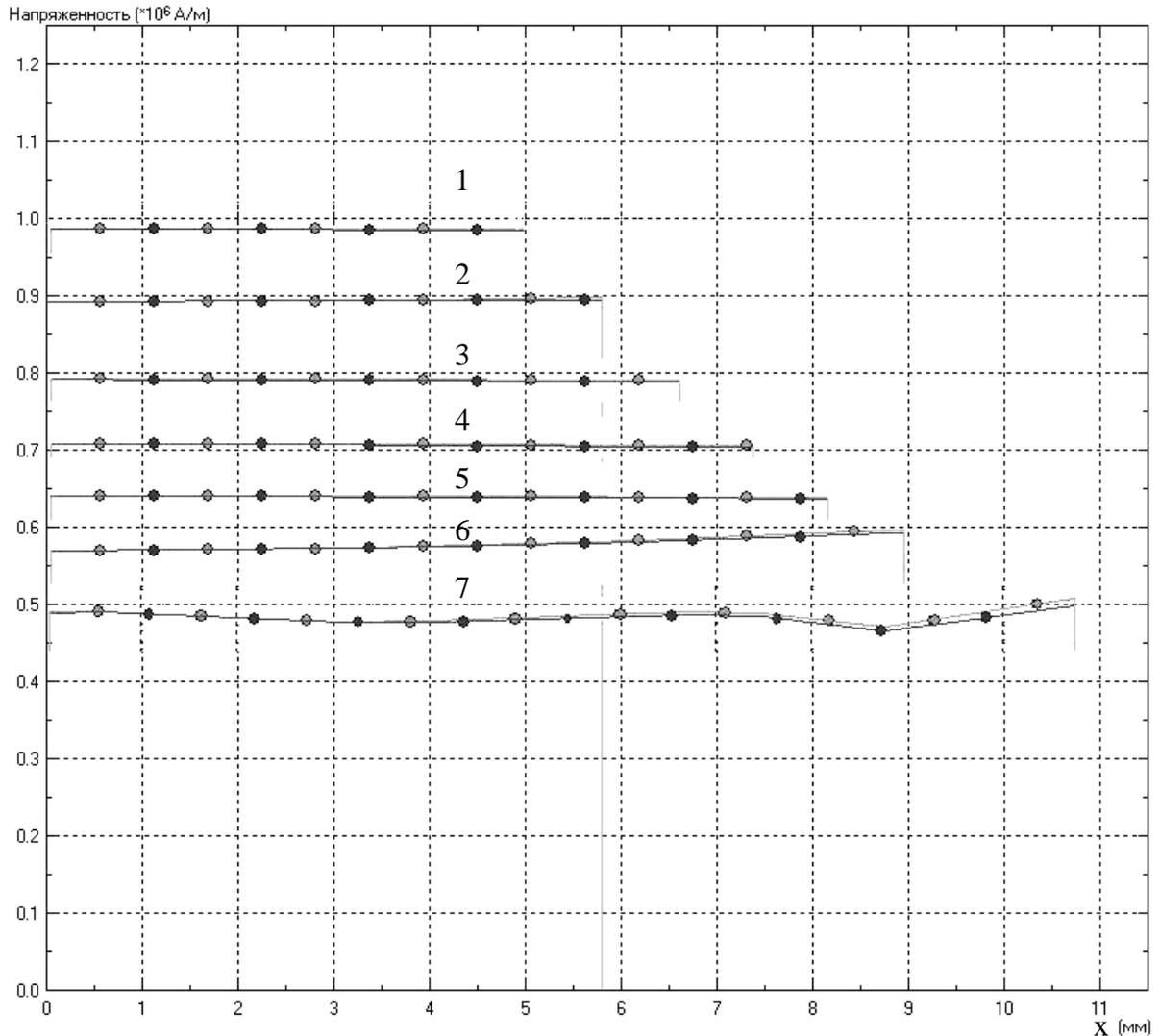


Рисунок 3.8. Графики напряженности на различной высоте зазора: 1 – $y = 0$ мм; 2 – $y = 10$ мм; 3 – $y = 20$ мм; 4 – $y = 30$ мм; 5 – $y = 40$ мм; 6 – $y = 50$ мм; 7 – $y = 60$ мм

3.3. Анализ результатов численного моделирования распределения давления в зазоре электромагнитного магнитожидкостного сепаратора

На рисунке 3.9. представлено рассчитанное на основе конечно-элементного моделирования магнитного поля распределение давлений вдоль горизонтальной оси зазора на различных высотах зазора сепаратора с магнитной жидкостью без немагнитного тела. На рисунках 3.10 – 3.12 представлено распределение давлений вдоль горизонтальной оси зазора на различных высотах зазора сепаратора в присутствии немагнитного тела – по нижней и верхней границам немагнитного тела.

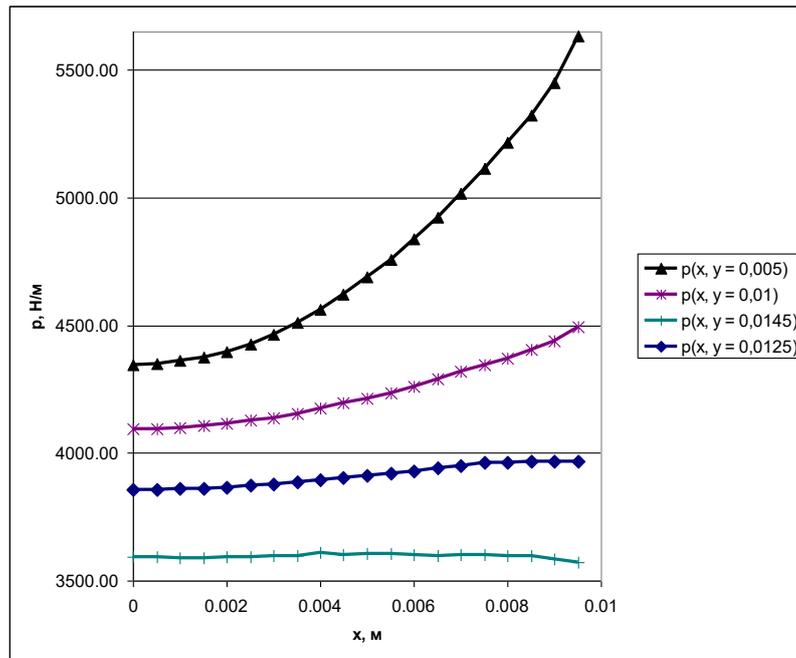


Рисунок 3.9. Распределение давлений на различной высоте зазора в электромагнитном магнитожидкостном сепараторе без немагнитного тела

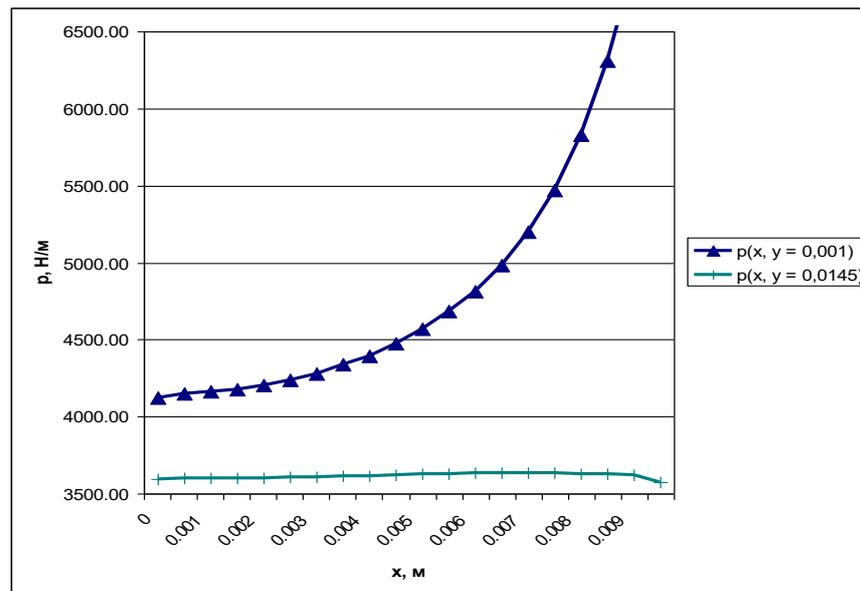


Рисунок 3.10. Распределение давлений на различной высоте зазора в присутствии немагнитного тела – по нижней и верхней границам немагнитного тела

Очевидно различие давлений и наличие дополнительной выталкивающей силы, действующей на немагнитное тело.

Из представленных графиков следует, что при увеличении коэффициента заполнения зазора либо при отклонении формы тела от сферической наблюдается снижение градиента напряженности на 15- 25 %. Снижение градиента напряженности, вызывает снижение выталкивающей силы, действующей на

немагнитное тело. И для поддержания этой силы на прежнем уровне необходимо увеличивать ток в обмотке возбуждения.

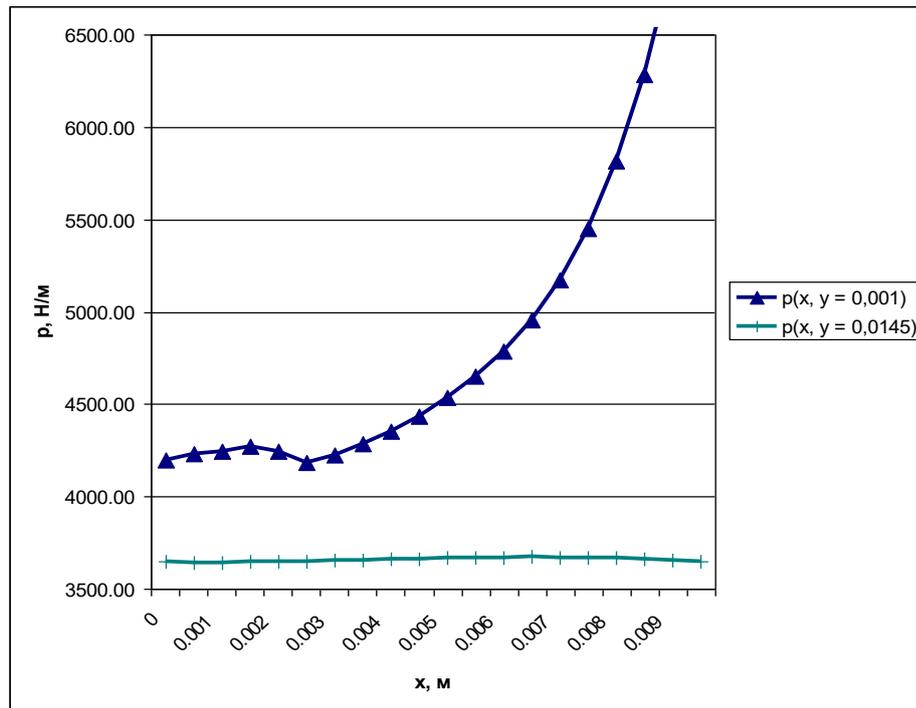


Рисунок 3.11. Распределение давлений на разной высоте в МЖС с малым квадратным немагнитным телом

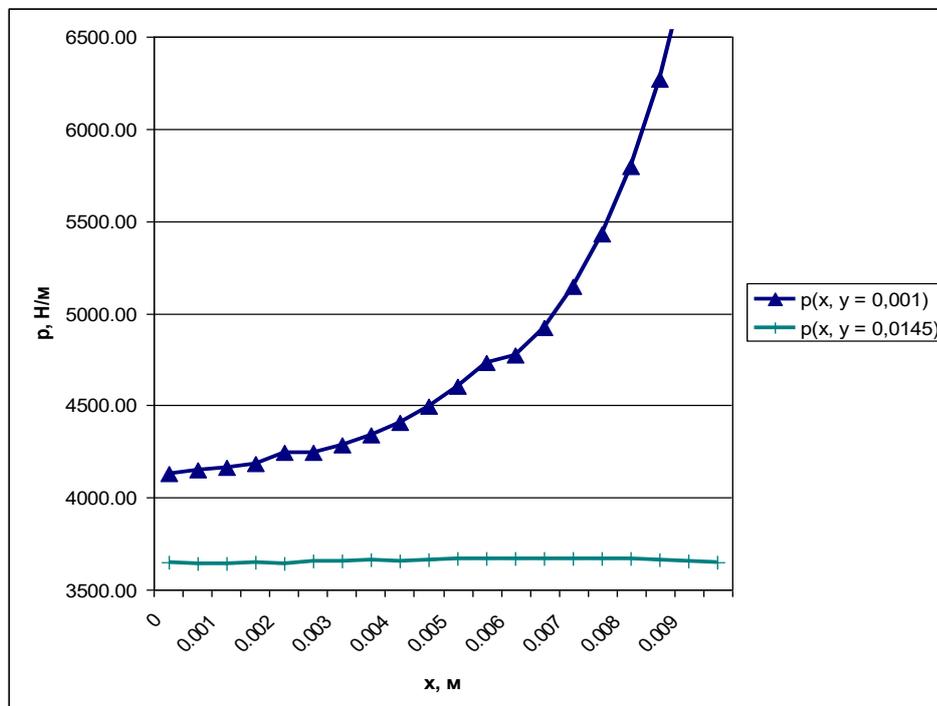
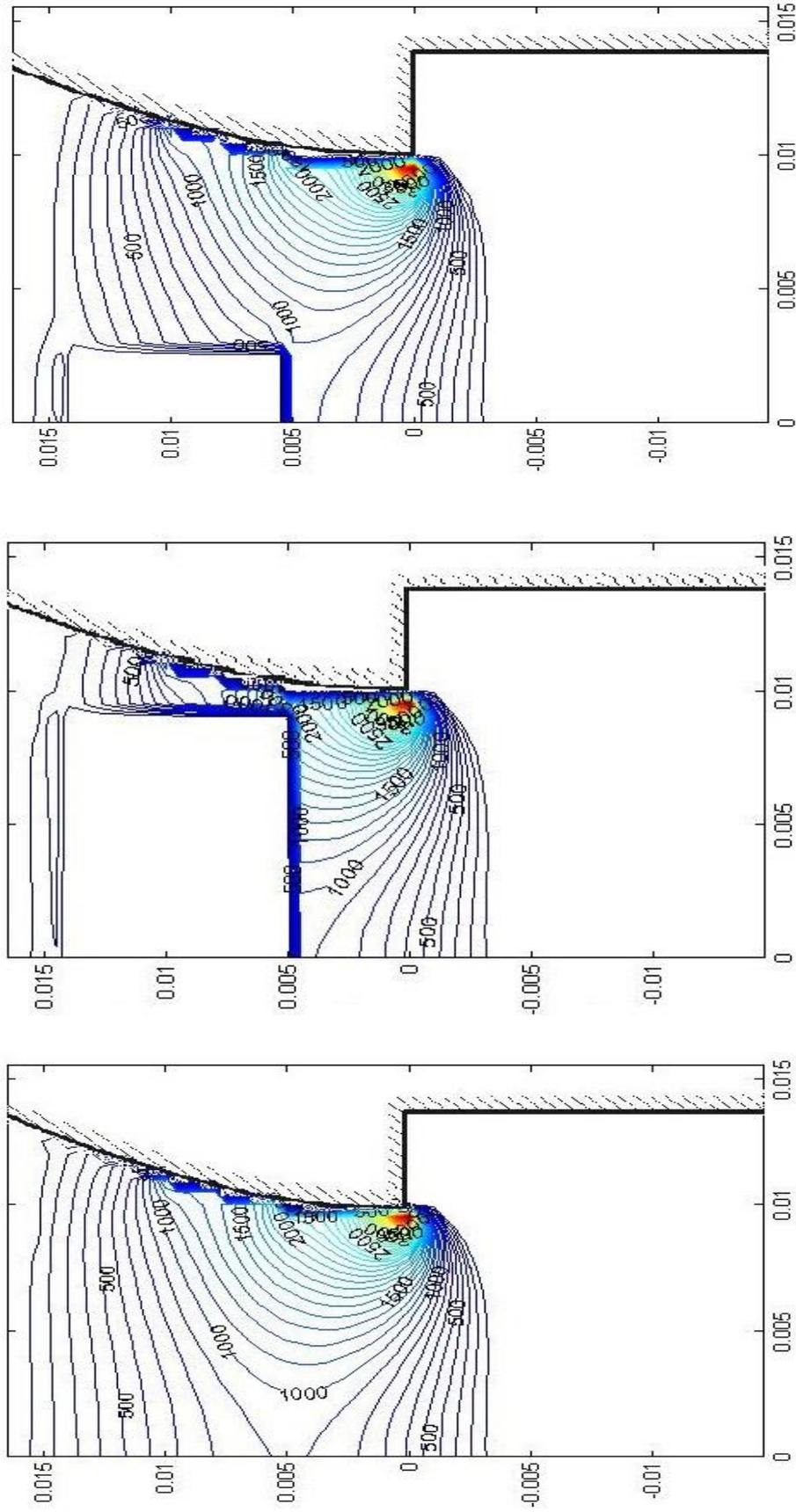


Рисунок 3.12. Распределение давлений на различной высоте зазора в МЖС с небольшим немагнитным телом прямоугольной формы



(а)

(б)

(в)

Рисунок 3.13. Распределение избыточного давления ($\Delta p-r-r_0$) в МЖ, находящейся в рабочем зазоре МЖС: (а) – при отсутствии в МЖ немагнитного тела; (б) – находящееся в МЖ немагнитное тело имеет размеры $b=19\text{мм}$, $h=10\text{мм}$; (в) – находящееся в МЖ немагнитное тело имеет размеры $b=6\text{мм}$, $h=9\text{мм}$.

На основании расчетов магнитного поля средствами компьютерного моделирования может быть получено распределение избыточного давления в МЖ, находящейся в рабочем зазоре МЖС. На рисунке 3.13 представлены картины таких распределений при отсутствии в МЖ немагнитного тела, при помещении в МЖ немагнитного тела с большими и небольшими размерами.

Становится возможна оценка влияния формы частиц на процесс сепарации, и на соответствующее распределение давлений вдоль горизонтальной оси зазора сепаратора с магнитной жидкостью на различных его высотах по нижней и верхней границам присутствующего немагнитного тела. Провал в давлении, при окончании немагнитного тела большего горизонтального размера, наблюдается при большей координате x .

Таким образом, на основании численного конечно-элементного моделирования распределения магнитных полей, давлений и сил в магнитожидкостном сепараторе немагнитных материалов с размером конечных элементов, сравнимым с размерами частиц, возможно математическое исследование влияния размеров, формы и плотностей частиц, степени заполнения зазора частицами на процесс их сепарации.

С целью оценки корректности применения соотношений (1.6) и (2.5) было проведено расчетное исследование. На основании расчета методом конечных элементов плоскопараллельного поля в рабочем зазоре МЖС, заполненного МЖ с $M_S=17$ кА/м, определялась удельная сила f_C для тела прямоугольного сечения шириной b , высотой h и единичной длины, расположенного на линии симметрии. Величина минимального зазора между полюсами принималась $\delta=19,5$ мм, индукция в нем $B=0,6$ Тл.

Результаты расчетов представлены в таблице 3.2 и на рисунке 3.14, где $V_{МЖ}$ – объем МЖ в рабочем зазоре на единицу длины плоскопараллельной картины поля, Δ – отклонение результатов расчета по соотношениям (1.6) и (2.5). Результаты расчетов показывают явную зависимость f_C от формы и размера немагнитного тела. При увеличении размера немагнитного тела происходит уменьшение f_C по причине изменения распределения магнитного поля. Результаты

расчетов по обоим соотношениям совпадают при малых размерах немагнитного тела, когда оно незначительно изменяет картину распределения напряженности в МЖ.

Таблица 3.2. Зависимость удельной магнитной силы, действующей на немагнитное тело, от его объема при изменении только вертикального размера

h, мм	4	5	6	7	8	9
b, мм	6	6	6	6	6	6
V, мм ³	24	30	36	42	48	54
V/V _{МЖ} , %	6,2	8	9,3	11	12,4	14
f _c , кН/м ³ (соотношение 1.6)	76,7	76,7	76,7	76,7	76,7	76,7
f _c , кН/м ³ (соотношение 2.5)	76,67	75,19	74,06	72,74	70,88	68,59
Δf _c , %	0	-1.9	-3.4	-5,1	-7,5	-10,5

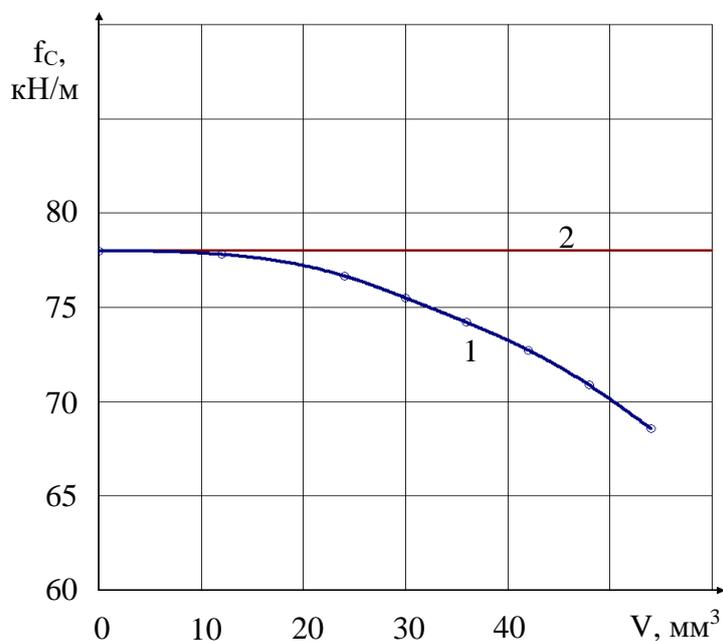


Рисунок 3.14. Изменение удельной силы сепарации от объема немагнитной частицы: 1 – расчет с учетом перераспределения магнитного поля, 2 – расчет без учета перераспределения магнитного поля

Приведенные результаты опубликованы в соавторстве в работах [51, 52, 56, 50, 100]. Личный вклад соискателя: в работах автору принадлежит постановка задач исследования, разработка уточненных математических моделей, методик и программ, проведение расчётных исследований.

3.4. Выводы

1. Проведен конечно-элементный анализ распределения магнитных полей, сил и давления в электромагнитных магнитожидкостных сепараторах немагнитных материалов. Полученные результаты позволяют оценивать силы сепарации, действующие на тела в магнитной жидкости.
2. Показано, что разработанная методика определения распределения усилий и давлений в зоне сепарации ЭМЖС на основе результатов конечно-элементного анализа магнитного поля позволяет учесть нелинейности магнитных характеристик магнитной системы и МЖ, формы и размеров немагнитных частиц, заполнения частицами объема МЖ и рассчитать силу сепарации.
3. Установлено, что увеличение коэффициента заполнения зазора и отклонение формы тела от сферической приводит к перераспределению магнитного поля в ЭМЖС, снижению градиента напряженности на 15- 25 %.
4. Показано, что неучет в существующих расчетных методиках перераспределения магнитного поля в ЭМЖС, вследствие нахождения в зоне сепарации немагнитных частиц, приводит к снижению силы сепарации (при коэффициенте заполнения 0,49 снижение силы сепарации достигает 34 %). Для поддержания силы сепарации необходимо увеличивать ток в обмотке возбуждения.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МАГНИТОЖИДКОСТНОГО СЕПАРАТОРА

4.1. Описание опытного лабораторного образца сепаратора

Экспериментальная установка реализует принцип действия ЭМЖС, который поясняется рисунке 4.1. Фотографии установки представлены на рисунках 4.2÷4.5. Установка сконструирована на базе электромагнита постоянного тока ФЛ-1 (поз. 1 на рисунке 4.2), созданного в МГУ им. М.В. Ломоносова. К полюсам электромагнита прикреплены полюсные наконечники гиперболического профиля (поз. 2 на рисунке 4.2). На наконечниках закреплены тонкие немагнитные накладки (поз. 3 на рисунке 4.2), исключая непосредственный контакт магнитной жидкости (МЖ) с поверхностью полюсных наконечников, что способствует полному удалению МЖ из рабочего зазора сепаратора после отключения тока в обмотке электромагнита. В противном случае часть МЖ остается на острых кромках поверхности полюсных наконечников. После подачи тока в обмотку электромагнита МЖ заливается в рабочий зазор сепаратора между полюсными накладками (рисунок 4.4). Положение МЖ в зазоре зависит от распределения магнитной индукции B по высоте зазора, заливаемого объема МЖ, ее намагниченности и плотности. Немагнитные накладки на положение МЖ не влияют.

В начале рабочей зоны сепаратора по ее длине установлено устройство для подачи смеси разделяемых материалов (рисунок 4.2, рисунок 4.5). Вибрация лотка подающего устройства осуществляется эксцентриком, насаженным на вал электродвигателя. Частота вибрации регулируется путем изменения частоты вращения вала двигателя за счет величины напряжения на нем U_d , а амплитуда вибрации – за счет подбора эксцентрика. Угол наклона поверхности лотка к поверхности МЖ может изменяться. Эти параметры влияют на начальную скорость

\bar{v}_0 вхождения немагнитной частицы в МЖ. Имеется возможность устанавливать полюсные наконечники вместе с немагнитными накладками под различным углом α к горизонту (рисунок 4.1), а также изменять минимальное значение δ рабочего зазора. Под полюсными наконечниками размещаются приемники тяжелой и легкой фракций (поз. 4 и поз. 5 на рисунке 4.1).

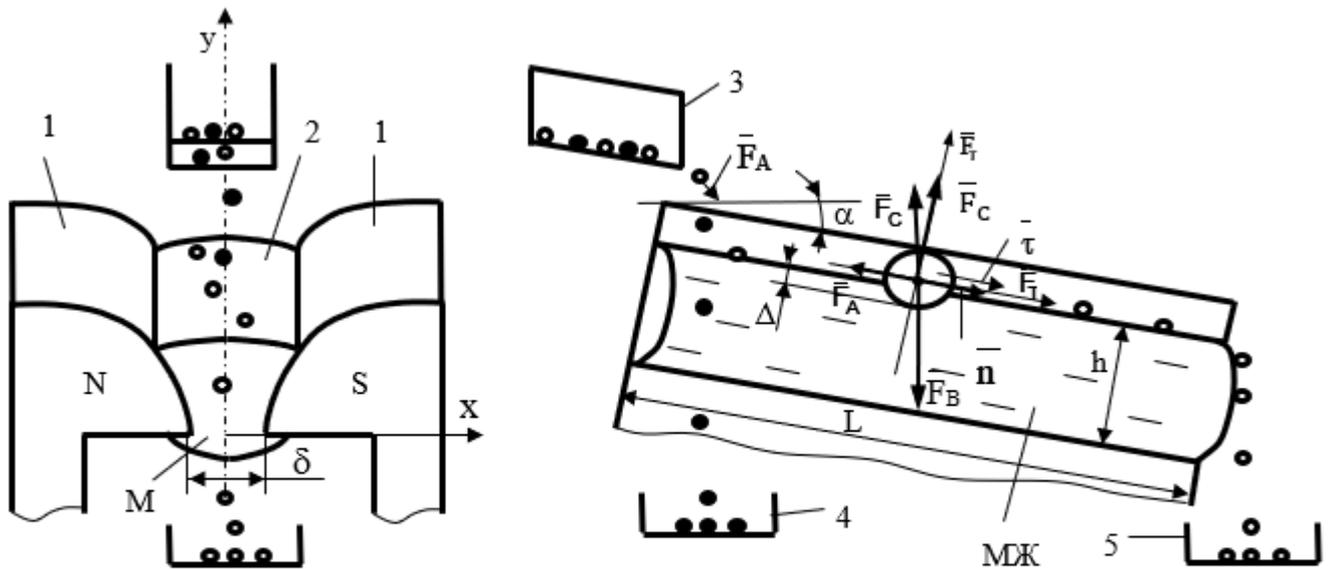


Рисунок 4.1. Движение немагнитных частиц в электромагнитном магнитожидкостном сепараторе. 1 – полюсные наконечники; 2 – магнитная жидкость; 3 – загрузочное устройство; 4 и 5 – приемные контейнеры для тяжелой и легкой фракций, соответственно

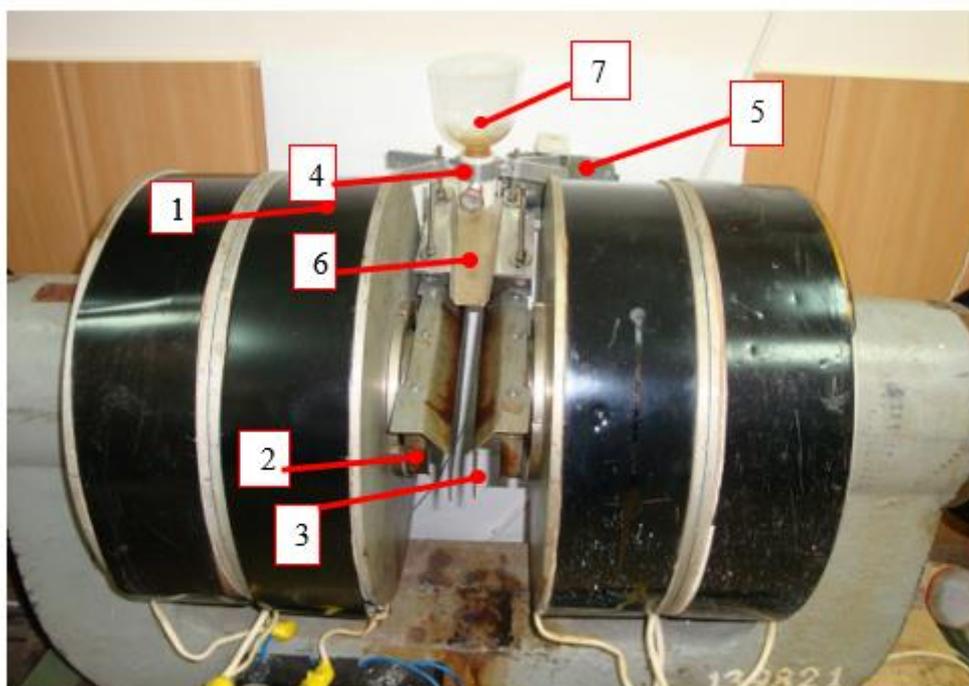


Рисунок 4.2. Экспериментальная установка, реализующая принцип действия электромагнитного магнитожидкостного сепаратора. 1 – электромагнит ФЛ-1; 2 – полюсный наконечник; 3 – немагнитная накладка; 4 – подающее устройство; 5 – электродвигатель; 6 – лоток подающего устройства; 7 – бункер.

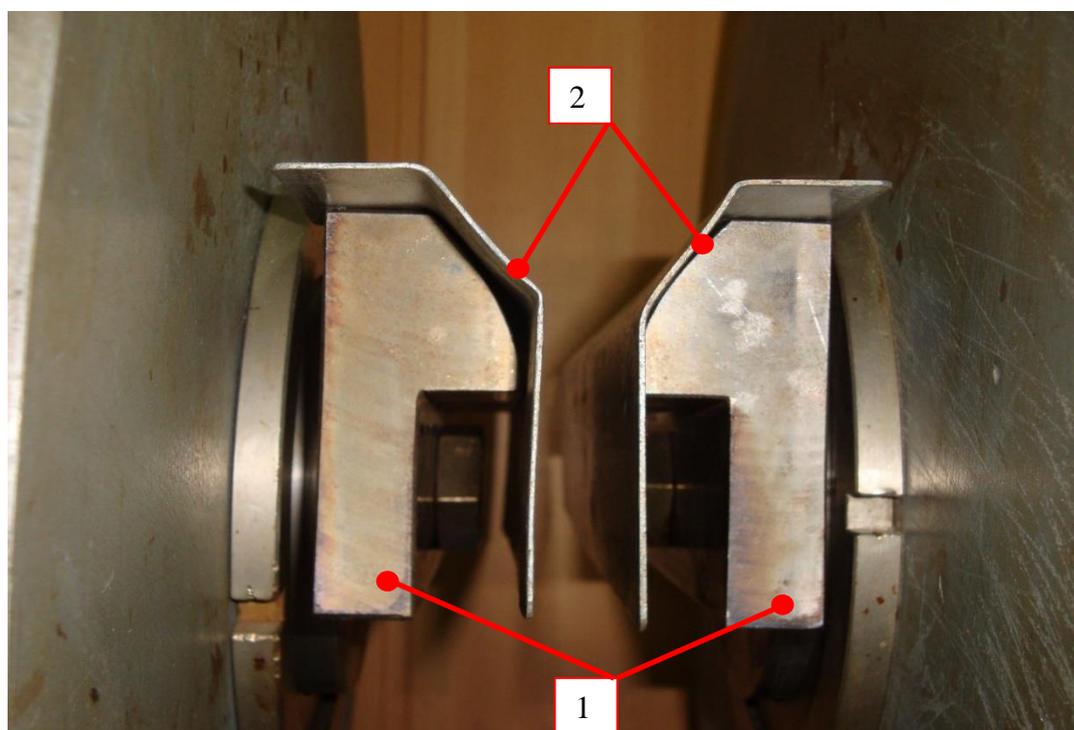


Рисунок 4.3. Рабочий зазор ЭМЖС. 1 – полюсные наконечники; 2 – немагнитные накладки.

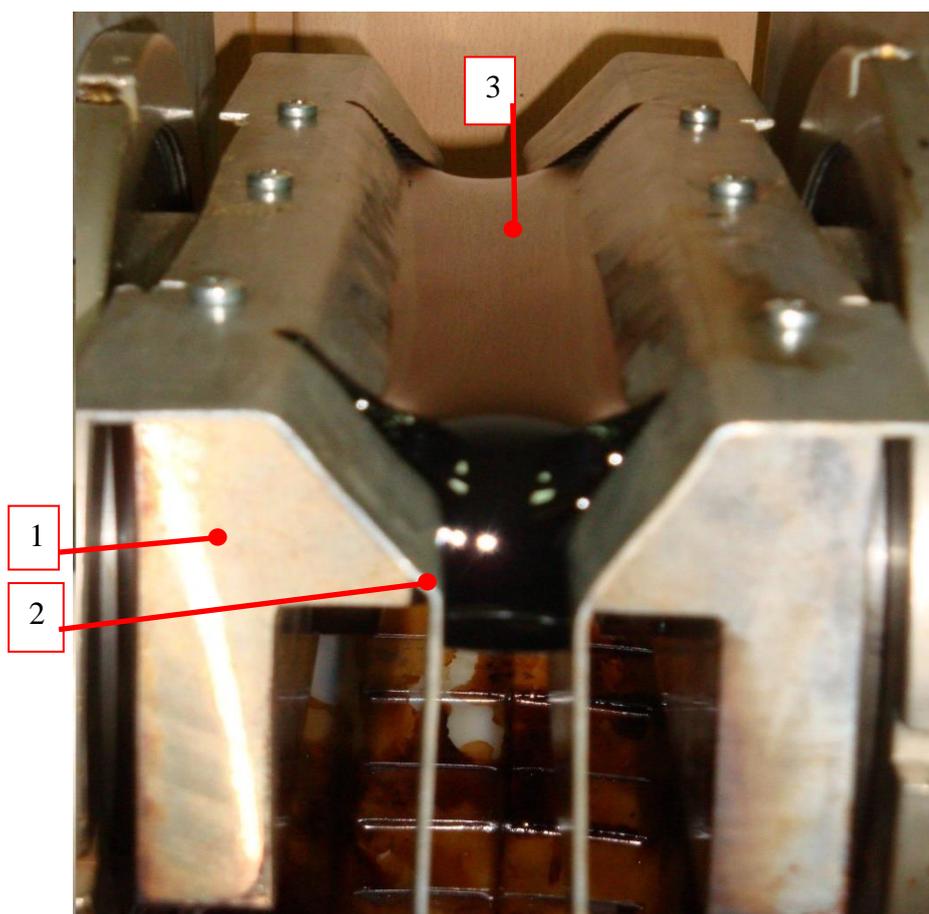


Рисунок 4.4. Расположение магнитной жидкости в ЭМЖС. 1 – полюсный наконечник;

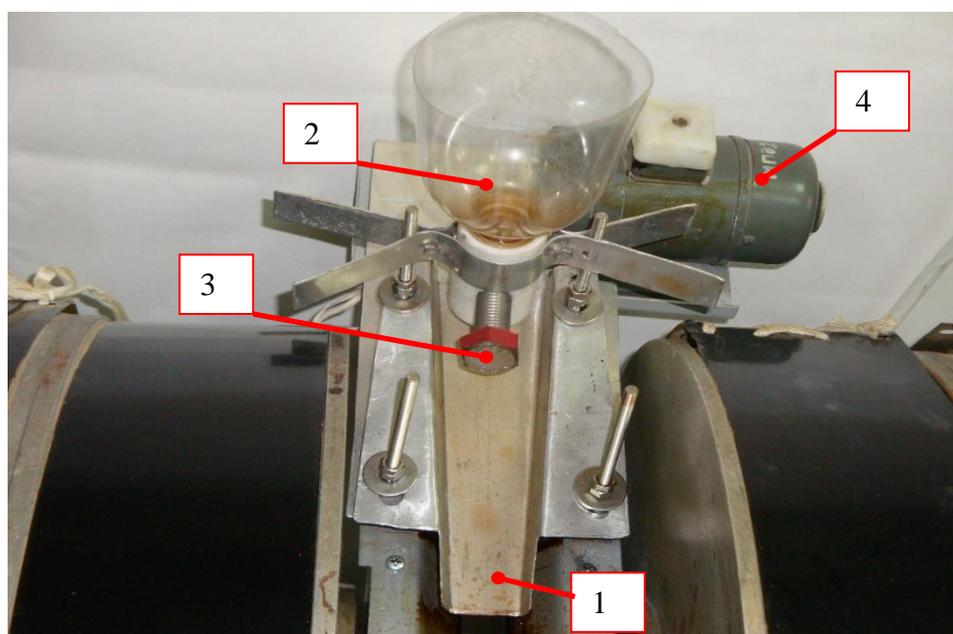


Рисунок 4.5. Подающее устройство. 1 – лоток; 2 - бункер для частиц; 3 – болт для регулировки подачи частиц; 4 – электродвигатель, обеспечивающий вибрацию лотка.

4.2. Исследование влияния размера и формы немагнитных частиц на силу сепарации

Для проведения эксперимента использовалась схема установки, изображенная на рисунке 4.6. Чтобы облегчить сбор МЖ (поз. 3), при снятии магнитного поля, в зазор между полюсами (поз. 1) помещен немагнитный контейнер (поз. 2). Магнитное поле создавалось за счет протекания постоянного тока I в обмотке возбуждения, расположенной ниже изображенной полюсной системы. В эксперименте применялась МЖ на керосине с намагниченностью насыщения $M_s = 17$ кА/м. В качестве немагнитных частиц использовались свинцовые частицы сферической формы с диаметрами d от 2,9 мм до 17,2 мм. В связи с этим минимальный зазор между полюсами δ устанавливался 19,5 мм.

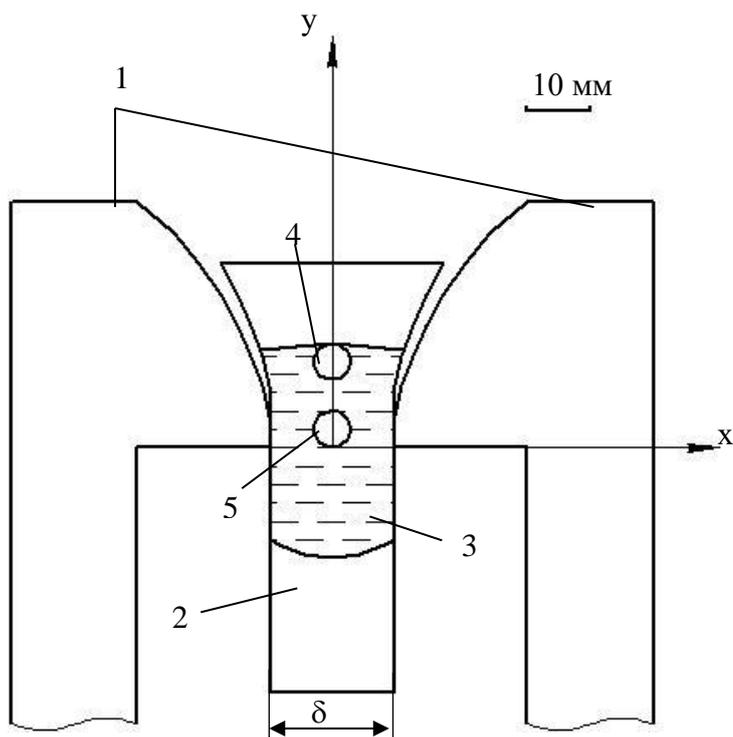


Рисунок 4.6. Схема экспериментальной установки

О неравномерности зазора между полюсами можно судить по рисунку 4.6. Начальное значение тока в обмотке выбиралось из условия гарантированного всплытия свинцовых частиц на верхнюю поверхность МЖ.

Величина тока составляла 2 А, при этом индукция в минимальном зазоре составляла 0,6 Тл. В контейнер 2 заливалась МЖ, высота столба которой составляла около 40 мм. На поверхность МЖ помещалась свинцовая частица. Далее при плавном уменьшении тока в катушке возбуждения фиксировались его значения при полном погружении частицы в МЖ $I_{\text{погр}}$ (поз. 4 на рисунке 4.6) и падении частицы $I_{\text{пад}}$ (поз. 5 на рисунке 4.6). Значения токов в зависимости от размера частиц приведены в таблице 4.1 и на рисунке 4.7. Поскольку на изменение магнитного поля в зазоре влияет не абсолютное значение диаметра немагнитной частицы d , а та доля, которую занимает частица в зазоре, то на рисунке 4.7 в качестве аргумента взято отношение диаметра частицы к минимальному зазору d/δ .

Таблица 4.1. Влияние размера частиц на величину токов, соответствующих погружению и падению частиц

d , мм	2,9	3,8	8,2	16	17,2
$I_{\text{пад}}$, А	0,58	0,58	0,66	0,69	0,7
$I_{\text{погр}}$, А	0,7	0,7	0,75	0,75	0,75
d/δ	0,15	0,195	0,421	0,821	0,882

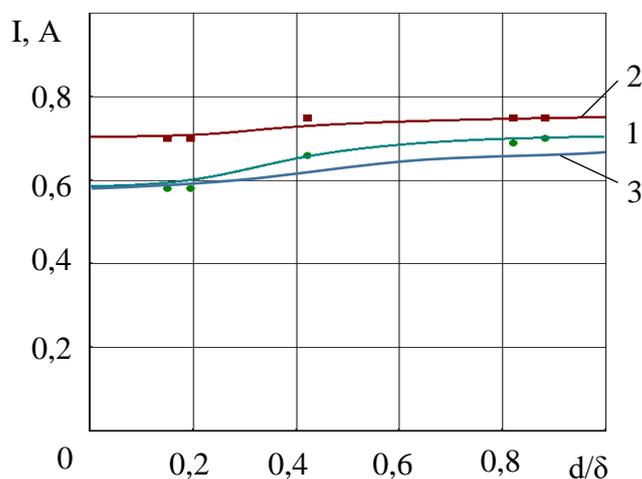


Рисунок 4.7. Зависимость тока $I_{\text{пад}}$ – 1, тока $I_{\text{погр}}$ – 2 и расчетного значения $I_{\text{пад}}$ – 3 от отношения диаметра частиц к минимальному зазору

В состояниях падения и погружения частицы выполняется равенство суммы выталкивающих сил (Архимеда и силы сепарации) и силы тяжести. В обоих состояниях сила Архимеда и сила тяжести не изменяются. Поэтому для

обоих положений магнитная сила также должна быть неизменной, т. е. должно выполняться постоянство модуля градиента напряженности - $|\nabla H|$. Согласно экспериментальным и расчетным исследованиям магнитного поля в рабочем зазоре, градиент напряженности в области погружения меньше, чем в области падения частицы при определенном значении тока возбуждения. Для получения равных значений $|\nabla H|$ ток погружения $I_{\text{погр}}$ должен быть больше тока падения $I_{\text{пад}}$, что подтверждается экспериментальными данными (таблица 4.1, рисунок 4.7).

Графики $I_{\text{пад}} = f(d)$ и $I_{\text{погр}} = f(d)$ (рисунок 4.7) подтверждают рассчитанное ранее влияние объема немагнитной частицы на величину выталкивающей силы сепарации F_C . При заданном токе возбуждения I с увеличением диаметра немагнитной частицы d напряженность H и ее градиент в области расположения частицы уменьшается, что вызывает уменьшение F_C . Для поддержания F_C на прежнем уровне для сохранения равенства (1.15) ток возбуждения необходимо увеличивать. В области падения частицы рабочий зазор имеет наименьшее значение и при отсутствии частицы весь заполнен МЖ. В зоне же погружения значение рабочего зазора больше и МЖ его заполняет частично. Увеличение размера немагнитной частицы в области падения в большей мере влияет на уменьшение градиента напряженности поля, что вызывает необходимость в большей мере увеличивать ток возбуждения $I_{\text{пад}}$, по сравнению с $I_{\text{погр}}$.

С целью сравнения теоретических результатов с экспериментом был выполнен расчет магнитного поля в ЭМЖС методом конечных элементов. Для упрощения определения выталкивающей магнитной силы F_M была принята прямоугольная форма сечения немагнитного тела (рисунок 3.2). F_M определялась по разнице давлений в МЖ на верхней и нижней границах тела (рисунок 3.10). Для выталкивания свинцового тела требуется большая напряженность магнитного поля. В этом случае МЖ находится в состоянии насыщения с намагниченностью M_S . В МЖ магнитная энергия u_M и давление p будут пропорциональны напряженности H .

Был выполнен расчет поля для двух случаев: без тела в зазоре и с немагнитным телом с размерами: ширина – 19 мм, высота – 13,5 мм. Площадь сечения прямоугольного тела эквивалентна площади сечения сферического тела с наибольшим диаметром 17,2 мм в эксперименте. Согласно результатам расчета сила сепарации для выбранного немагнитного тела составляет 87 % от силы сепарации, действующей на немагнитное тело столь малых размеров, что оно не влияет на распределение напряженности в зазоре. Согласно графику $I_{\text{пад}}(d)$ (рисунок 4.7) в эксперименте уменьшение силы F_C составило $0,58 \text{ A} / 0,7 \text{ A} = 0,82$. Хорошее совпадение результатов расчета и эксперимента подтверждает адекватность предлагаемой математической модели исследуемого процесса.

Для выяснения влияния формы тела на выталкивающую магнитную силу F_M было проведено экспериментальное исследование с немагнитными телами сферической формы с диаметрами $d_1 = 3,8 \text{ мм}$ и $d_2 = 8,2 \text{ мм}$ и тела плоской формы, полученной путем сплющивания указанных сферических частиц. Сплюснутые частицы имели форму дисков соответственно со значениями среднего диаметра и высоты: $d_{\text{ср}}=9,6 \text{ мм}$, $h=0,4 \text{ мм}$ и $d_{\text{ср}}=13,5 \text{ мм}$, $h=2 \text{ мм}$. Согласно таблице 4.2 переход от сферической формы к плоской сопровождается уменьшением выталкивающей силы F_C в пределах (4-5) %.

Таблица 4.2. Влияние формы частиц на величину токов, соответствующих погружению и падению частиц

Объем, мм ³	29		287	
Форма	сфера, $d = 3,8 \text{ мм}$	диск высотой $0,4 \text{ мм}$	сфера, $d = 8,2 \text{ мм}$	диск высотой 2 мм
$I_{\text{пад}}, \text{ A}$	0,6	0,625	0,69	0,725
$I_{\text{погр}}, \text{ A}$	0,79	0,8	0,8	0,85

4.3. Исследование влияния размера и формы немагнитных частиц на процесс их сепарации

В рабочем состоянии полюсы электромагнитного магнитожидкостного сепаратора устанавливаются под углом α к горизонтальной плоскости (рисунок 4.1). После загрузки частиц на поверхность МЖ тяжелые частицы, проходя через

слой МЖ, попадают в приемник этих частиц (поз. 1). Легкие же частицы, находясь на поверхности МЖ в погруженном на небольшую глубину состоянии, скатываются по этой поверхности в приемник легких частиц (поз. 2). Движение легких частиц является более сложным и длительным и в основном оно определяет качество и производительность процесса сепаратора.

Экспериментальное исследование движения частиц по поверхности магнитной жидкости производилось для конфигурации полюсных наконечников, изображенной на рисунке 4.8, с минимальным зазором между наконечниками $\delta=19,5$ мм. В зазор ЭМЖС заливалась магнитная жидкость на керосине с намагниченностью насыщения $M_S=60$ кА/м в объеме $V=100$ мл. Длина полюсов (рисунок 4.1) составляла $L=18$ см. Высота столба магнитной жидкости в зазоре составляла $h=35$ мм. Угол наклона полюсов устанавливался

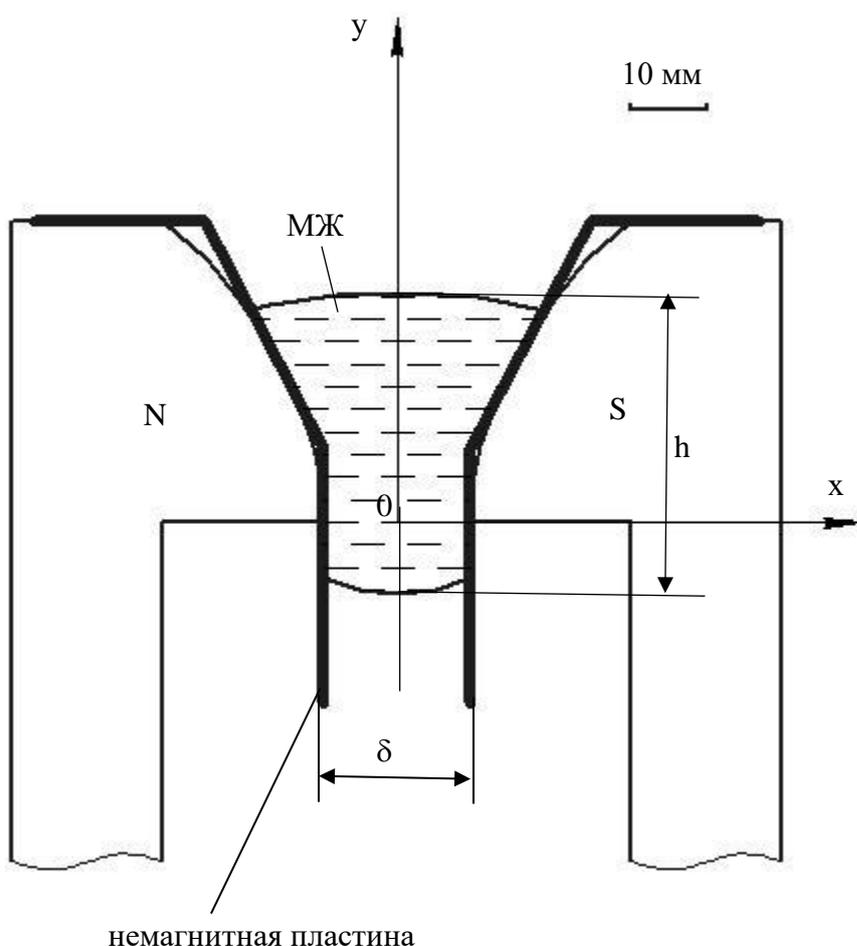


Рисунок 4.8. Конфигурация воздушного зазора при исследовании процесса сепарации

$\alpha=10$ градусов. Измерялось время движения t_d частиц по наклонной поверхности магнитной жидкости на длине пути 17 см.

При токе $I=2,8$ А в обмотке электромагнита изменение индукции по оси y воздушного зазора при отсутствии в нем магнитной жидкости представлено в таблице 4.3.

Таблица 4.3. Изменение индукции по высоте зазора при токе в электромагните $I=2,8$ А

у, мм	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5	
В, мТл	142	150	161	177	202	245	299	
у, мм	0	5	10	15	20	25	30	35
В, мТл	368	369	341	308	270	228	195	174

Первоначально исследовалось влияние тока I в обмотке электромагнита на время движения t_d частиц сферической формы. В качестве таковых использовались свинцовые частицы с диаметром d от 3 до 8,2 мм. Результаты опытов представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4. Результаты исследования движения по наклонной поверхности МЖ частиц сферической формы

d, мм	8,2				5				3			
Объем V, мм ³	288,5				65				14			
Масса, г	3,26				0,734				0,16			
I, А	2,8	2	1	0,8	2,8	2	1	0,8	2,8	2	1	0,8
t_d , с	0,57	0,6	1,07	1,07	0,47	0,5	1,13	2	1,05	1,23	4,7	5,7
Примечание	При токе $I=0,8$ А частица погружалась в МЖ на некоторую глубину и двигалась внутри МЖ до выпадения в первой трети длины полюса. При токе $I=0,74$ А происходило падение частицы, т.е. она двигалась как тяжелая частица.				При токе $I=0,8$ А частица погружалась в МЖ на некоторую глубину и двигалась внутри МЖ. При токе $I=0,62$ А происходило падение частицы в качестве тяжелой частицы.				Вследствие значительной намагниченности МЖ на ее поверхности образовывались «бугорки и впадины» вблизи полюсных наконечников, которые приводили к неравномерному, зигзагообразному движению частиц с $d=3$ мм. При токе $I=0,8$ А наблюдались остановки частиц перед бугорками.			

На рисунке 4.9 представлено изменение времени движения t_d сферических частиц по наклонной поверхности МЖ от тока I в обмотке электромагнита для различных диаметров d частиц. Для всех диаметров частиц при уменьшении тока наблюдается рост в 2-6 раз времени движения t_d частиц по наклонной поверхности МЖ. Это объясняется уменьшением составляющей F_C силы

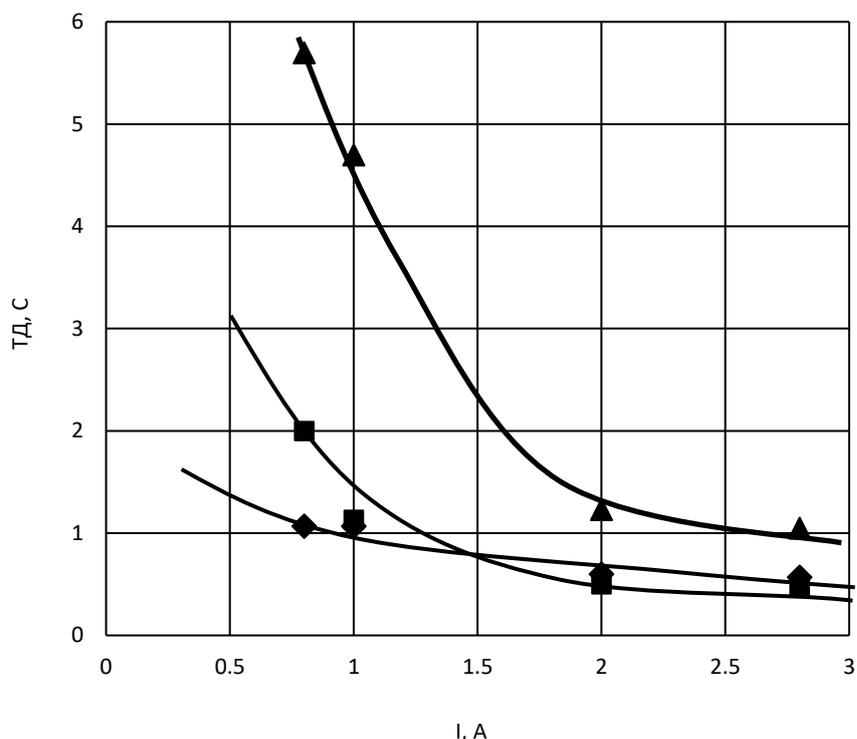


Рисунок 4.9. Изменение времени движения t_d сферических частиц по наклонной поверхности МЖ от тока I в обмотке электромагнита для различных диаметров d частиц: \blacktriangle – $d=3$ мм; \blacksquare – $d=5$ мм; \blacklozenge – $d=8,2$ мм.

выталкивания, увеличением глубины погружения h частицы и, как следствие, увеличением вязкостной силы F_B , препятствующей движению частицы.

При уменьшении диаметра частиц увеличивается время их движения t_d . Но эта тенденция не совсем явно выражена. Это можно объяснить уменьшением касательной составляющей силы тяжести $F_{T\tau}$, под действием которой частица движется по наклонной поверхности МЖ. При этом также уменьшается глубина погружения частицы Δ и, соответственно, вязкостная сила сопротивления движению, F_B . Вследствие уменьшения движущей силы $F_{T\tau}$ характер скольжения частицы по поверхности МЖ становится неустойчивым.

Частица движется с переменной скоростью и не прямолинейно, задерживается и даже останавливается на неровностях поверхности МЖ.

Изменение формы частиц со сферической на плоскую форму (таблица 4.5) при сохранении массы частиц не приводит к заметному изменению времени скольжения частиц по наклонной поверхности, но изменяет характер движения. Если при значениях тока $I=2,8$ А и 2 А характер движения сохраняется, то при меньших токах начинают проявляться силы поверхностного натяжения и эффект смачивания для частиц с малым объемом и массой. Плоская частица со средним диаметром $d=9,6$ мм и высотой $h=0,4$ мм при токе 0,66 А задерживается на нижней поверхности МЖ за счет эффекта смачивания. Отрыв и падение частицы происходит от внешнего воздействия.

Таблица 4.5. Результаты исследования движения по наклонной поверхности МЖ свинцовых частиц плоской формы

Размеры частиц	Средний диаметр диска $d=13,5$ мм, высота $h=2$ мм			Средний диаметр диска $d=9,6$ мм, высота $h=0,4$ мм		
Объем V , мм ³	288,5			14		
I , А	2,8	2	1	2,8	2	1
t_d , с	0,6	0,6	0,8	1,4	2	3,7
Примечание	<p>Объем и масса частицы эквивалентны сферической частице с диаметром $d=8,2$мм.</p> <p>При токе $I=1$А плоская частица прекращает скольжение по верхней наклонной поверхности в пределах первой половины длины полюса и далее проваливается через слой МЖ.</p>			<p>Объем и масса частицы эквивалентны сферической частице с диаметром $d=3$мм.</p> <p>При токе $I=2$А плоская частица, завершив скольжение по наклонной поверхности МЖ, продолжает движение по торцевой и частично нижней поверхности МЖ, не отрываясь от нее, а затем падает.</p> <p>При токе $I=1$А характер движения плоской частицы остается тем же, что и при токе $I=2$А, но частица задерживается, не отрываясь от нижней поверхности МЖ.</p> <p>При токе $0,66\text{А} < I < 1\text{А}$ частица, не всплывая на верхнюю поверхность и пройдя весь слой МЖ, задерживается на нижней поверхности МЖ за счет эффекта смачивания.</p> <p>При токе $I < 0,66\text{А}$ происходило выпадение частицы.</p>		

4.4. Исследование влияния плотности частиц на процесс сепарации

Исследование влияния плотности частиц на процесс сепарации производилось для частиц цилиндрической формы с высотой цилиндра $h = 10$ мм. Сравнение результатов для свинцовых и алюминиевых частиц значительных размеров (диаметр $d = 4,5$ мм), приведенное в таблице 4.6, показывает, что при уменьшении плотности частиц время движения t_d увеличивается. Это можно объяснить уменьшением касательной составляющей силы тяжести $F_{T\tau}$, которая является движущей силой. Однако уменьшение силы тяжести сопровождается снижением глубины погружения частицы h и вязкостной силы F_B , препятствующей движению частицы. Это препятствует росту t_d .

Таблица 4.6. Результаты исследования движения по наклонной поверхности МЖ свинцовых и алюминиевых частиц цилиндрической формы

Материал и размеры частиц	Свинцовая частица диаметром $d=4,5$ мм, высота $h = 10$ мм, $V = 159$ мм ³			Алюминиевая частица диаметром $d=4,5$ мм, высота $h = 10$ мм, $V = 159$ мм ³		
Масса частицы, г	1,8			0,43		
I, А	2,8	2	1	2,8	2	1
t_d , с	0,67	0,73	-	0,77	0,93	1,5
Примечание	При токе $I=1$ А происходит выпадение частицы.					

Продолжение данного исследования для частиц небольших размеров (диаметр $d = 1,8$ мм), приведенное в таблице 4.7, подтверждает полученные ранее результаты, а именно – при уменьшении плотности частиц и тока I время движения частиц t_d увеличивается до (15-20) %. В применялась МЖ с намагниченность насыщения $M_S=60$ кА/м, на внешней поверхности которой возникали неровности, обусловленные неустойчивостью поверхности в сильном магнитном поле. У легких алюминиевых частиц касательная составляющая силы тяжести $F_{T\tau}$ была недостаточной для преодоления неровностей на поверхности МЖ. Для исключения залипания легких частиц на поверхности МЖ необходимо

увеличивать угол наклона α этой поверхности (рисунок 4.1), уменьшать намагниченность насыщения M_s используемой МЖ, а также подбирать такой ток I в обмотке электромагнита, при котором внешняя поверхность МЖ будет гладкой, а сама МЖ обеспечивает разделение материалов по плотности.

Таблица 4.7. Результаты исследования движения по наклонной поверхности МЖ свинцовых, медных и алюминиевых частиц цилиндрической формы

Материал и размеры частиц	Свинцовая частица диаметром $d = 1,8\text{мм}$, высота $h = 10\text{мм}$, $V = 25\text{мм}^3$		Медная частица диаметром $d = 1,8\text{мм}$, высота $h = 10\text{мм}$, $V = 25\text{мм}^3$		Алюминиевая частица диаметром $d = 1,8\text{мм}$, высота $h = 10\text{мм}$, $V = 25\text{мм}^3$	
Масса, г	0,28		0,23		0,07	
I , А	2,8	2	2,8	2	2,8	2
t_d , с	1,2	1,7	1,4	1,8	–	–
Примечание					При обоих значениях тока наблюдалась остановка частицы перед бугорками на поверхности МЖ	

Для экспериментального подтверждения результатов расчетных исследований проведены опыты с частицами разной плотности. Фото на рисунке 4.10 демонстрирует, что при определенном токе в обмотке электромагнита в МЖ возникают силы, достаточные для выталкивания на ее поверхность не только алюминиевых, медных, но и свинцовых частиц (сферическая свинцовая частица представляет собой пулю для охотничьего ружья 12 калибра диаметром 18 мм). При токе $I=1,6$ А (рисунок 4.11) свинцовая частица погружается в МЖ, а на ее поверхности остаются медная и алюминиевая частицы. При токе $I=1,4$ А (рисунок 4.12) погружается и медная частица, а на поверхности МЖ остается только алюминиевая частица.

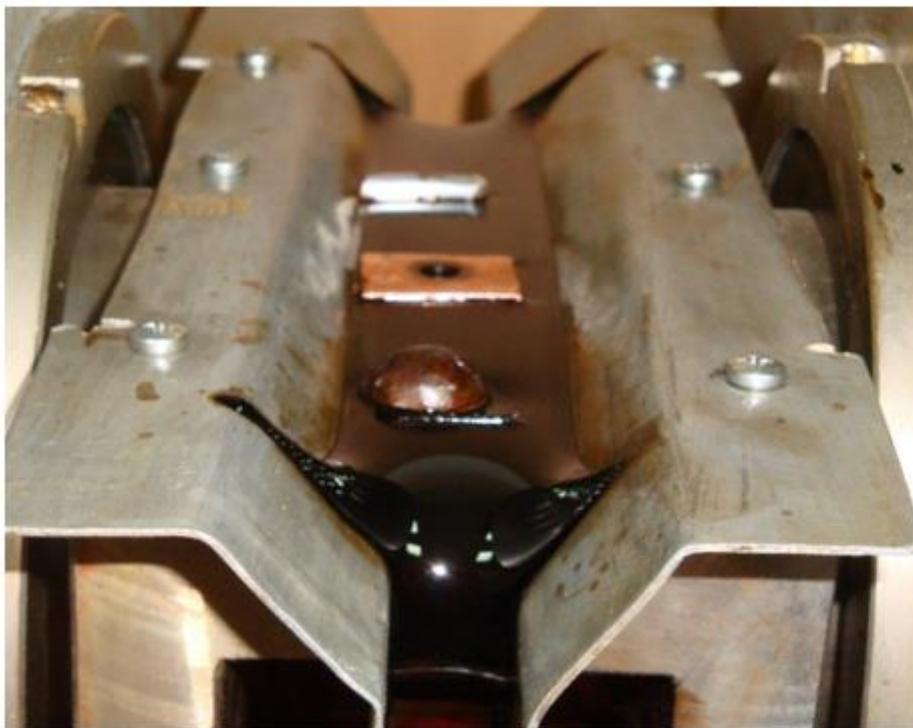


Рисунок 4.10. Фотография расположения свинцовой, медной и алюминиевой частиц в зазоре сепаратора, выталкиваемых на поверхность магнитной жидкости при токе $I=3A$



Рисунок 4.11. Фотография расположения медной и алюминиевой частиц в зазоре сепаратора, выталкиваемых на поверхность магнитной жидкости при токе $I=1.6 A$



Рисунок 4.12. Фотография расположения алюминиевой частиц в зазоре сепаратора, выталкиваемой на поверхность магнитной жидкости при токе $I=1,4$ А

4.5. Исследование влияния заполнения зазора сепаратора немагнитными частицами на силу сепарации

Конфигурация воздушного зазора сохранялась прежней (рисунок 4.8). В рабочий зазор заливалась МЖ на кремнийорганической жидкости ПЭС-2 с намагниченностью насыщения $M_S=30$ кА/м. Полюсы устанавливались в горизонтальное положение ($\alpha = 0$ градусов). В средней части длины полюсов L на ограниченном участке длиной $l=5$ см (рисунок 4.13) помещались сферические свинцовые частицы диаметром $d=7,6$ мм. Их количество постепенно увеличивалось. При этом изменялся коэффициент заполнения воздушного зазора на ограниченном участке длиной l . Коэффициент заполнения рассчитывался по соотношению

$$k = \frac{(n \cdot V_{\text{ч}})}{V_{\text{мж}}}, \quad (4.1)$$

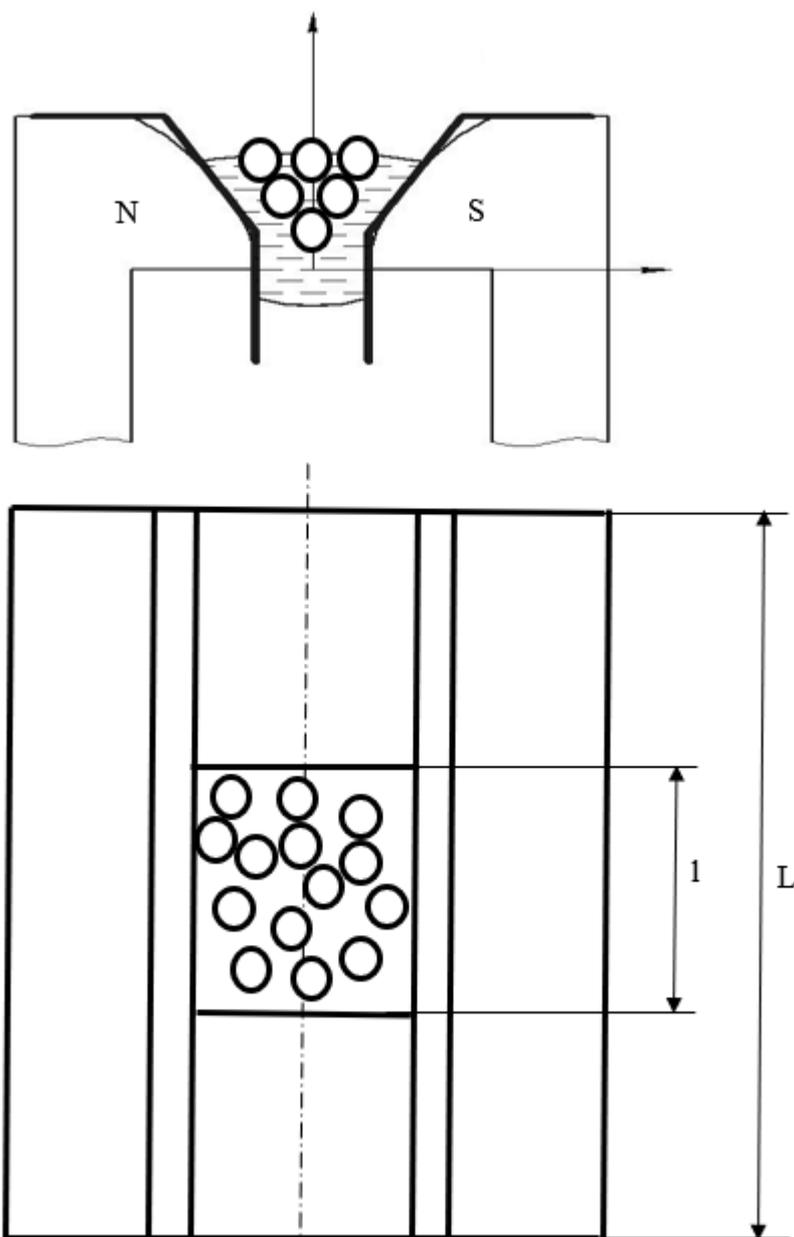


Рисунок 4.13. Рабочий зазор сепаратора при исследовании его заполнения немагнитными частицами

где: n – количество немагнитных частиц в зазоре; $V_{\text{ч}}$ - объем одной немагнитной частицы; $V_{\text{МЖ}}$ - объем МЖ в зазоре на участке длиной l , который участвует в создании магнитной силы, выталкивающей немагнитную частицу на верхнюю поверхность МЖ. Полная высота столба МЖ в зазоре составляла 40 мм. Ширина МЖ в верхней части ее поверхности составляла 38 мм. В создании магнитной выталкивающей силы участвует только объем МЖ, который находится выше значения u , при котором магнитная индукция в зазоре имеет максимальное

значение (по таблице 4.3 при $y=0$). Значение объема МЖ, подставляемое в соотношение (4.1), составляет $V_{\text{МЖ}}=33,9 \text{ см}^3$. В опыте фиксировались значение тока погружения $I_{\text{погр}}$, при котором немагнитная частица находится в полностью погруженном состоянии вблизи верхней границы МЖ, и ток всплытия $I_{\text{вспл}}$, при котором на поверхности МЖ вновь появляется поверхность частицы. Результаты опыта приведены в таблице 4.8, на рисунках 4.14 и 4.15.

Из полученных данных следует, что с ростом коэффициента заполнения для удержания немагнитной частицы вблизи верхней поверхности МЖ требуется увеличивать ток в обмотке электромагнита, что говорит об уменьшении силы сепарации F_C . Наличие немагнитных частиц в зазоре снижает магнитную проводимость зазора, что способствует уменьшению напряженности магнитного поля и, в конечном итоге выталкивающей силы сепарации F_C . При коэффициенте заполнения $k=0,33$ сила сепарации F_C , действующая на одну частицу уменьшается на 20-30 %.

Таблица 4.8. Исследование влияния коэффициента заполнения МЖ в зазоре на магнитную силу выталкивания немагнитных частиц

Количество немагнитных частиц в зазоре, n	Коэффициент заполнения МЖ немагнитными частицами, k	Ток погружения $I_{\text{погр}}$, А	Ток всплытия $I_{\text{вспл}}$, А
1	0,0068	1,66	1,76
4	0,027	1,66	1,74
8	0,054	1,8	2
12	0,082	1,78	2
16	0,11	18	1,94
20	0,14	1,84	2
24	0,16	1,84	2
28	0,19	1,9	2,1
32	0,22	1,76	2,04
36	0,25	1,78	2,16
40	0,27	1,82	2,16
44	0,3	1,95	2,24
48	0,33	1,96	2,34

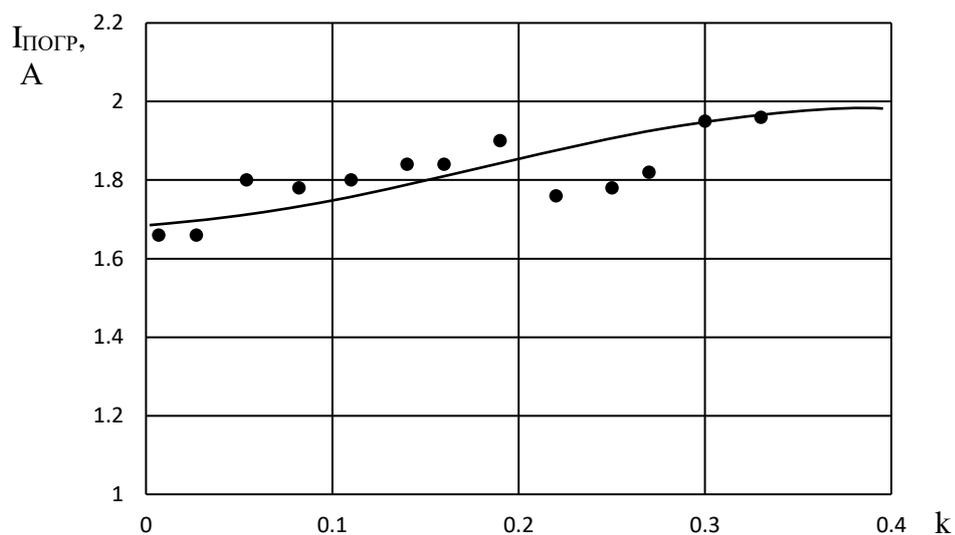


Рисунок. 4.14. Влияние коэффициента заполнения k рабочего зазора сепаратора немагнитными частицами на ток погружения $I_{\text{погр}}$ частицы

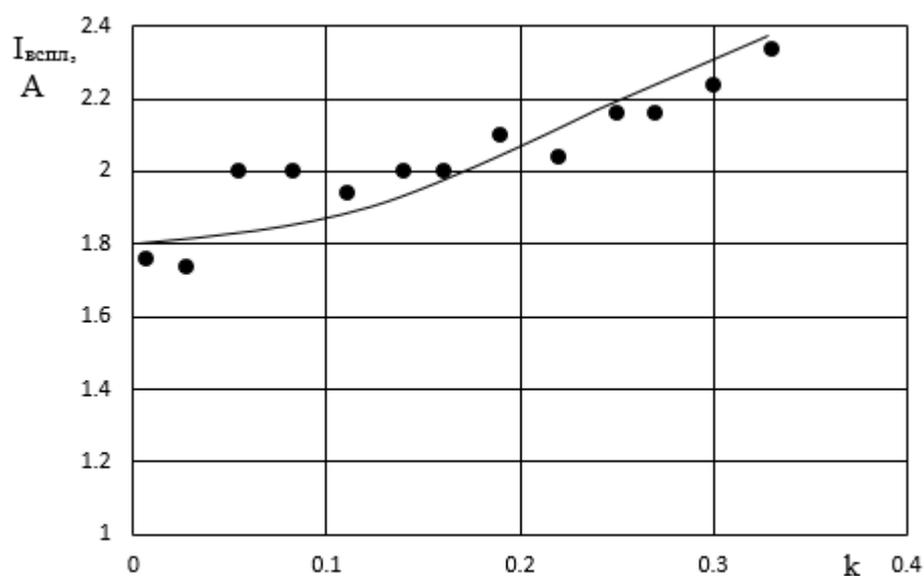


Рисунок 4.15. Влияние коэффициента заполнения k рабочего зазора сепаратора немагнитными частицами на ток всплытия $I_{\text{вспл}}$ частицы

4.6. Экспериментальное исследование процессов разделения немагнитных материалов по плотности

На созданной экспериментальной установке проведены исследования влияния на процесс сепарации немагнитных материалов их плотности, размеров частиц, интенсивности магнитного поля, угла наклона полюсных наконечников, начальной скорости движения частиц. Неизменными оставались:

- тип магнитной жидкости МКС 003-60, приготовленной на полиэтилсилоксане ПЭС-2 и имеющей намагниченность насыщения $M_S=30\text{кА/м}$;
- минимальное значение рабочего зазора между полюсными наконечниками $\delta = 24,5\text{ мм}$;
- заливаемый объем магнитной жидкости $V_{\text{МЖ}} = 120\text{ мл}$, что при длине полюсных наконечников $L=200\text{ мм}$ и $\delta=24,5\text{ мм}$ дает высоту столба магнитной жидкости в зазоре $h=30\text{ мм}$.

Изменение индукции B измеренное МГ Р – 2 по высоте средней линии зазора Oy для зазора $\delta = 24,5\text{ мм}$ (рисунок 4.1) при токе в обмотке электромагнита $I=2\text{ А}$ представлено на рисунке 4.16.

При исследованиях использовались частицы цилиндрической формы, материалы и размеры которых приведены в таблице 4.9. На начальном этапе исследований для различных материалов определялись граничные значения токов, при которых данный вид материала переходил из ранга легкой фракции (плавает на поверхности МЖ) в ранг тяжелой фракции (тонет в МЖ). С этой целью производилось наблюдение за процессом движения частиц в рабочем зазоре МЖС при $\alpha=10^\circ$, $\bar{v}_0 \neq 0$ (значение напряжения на двигателе устанавливалось $U_d=50\text{ В}$) и для различных значений токов I в обмотке электромагнита. Фиксировались

тесламетром ПИЭ

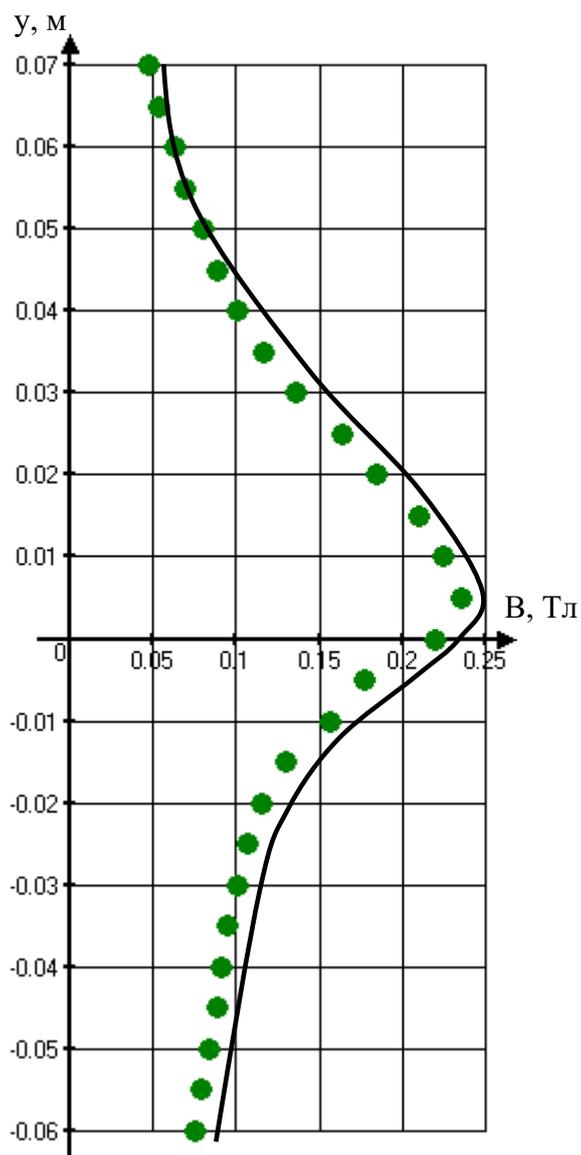


Рисунок 4.16. Изменение по высоте зазора ЭМЖС магнитной индукции B . Точки – экспериментальные значения, линии – расчетные.

поступающий в ЭМЖС объем частиц V и объемы частиц, выпадающих в легкой V_L и тяжелой V_T фракциях.

Таблица 4.9. Материалы и размеры использованных при исследованиях частиц

Материал	Диаметр d , мм	Длина l , мм	Средний объем V_{CP} , мм ³
Свинец	1,8/3,5/4,5	10/7÷9/10	25,4/76,9/159
Медь	0,8/1,4/4,9	7÷9/7÷9/8	4,3/13,1/150,8
Алюминий	5,6/4,5/2	7÷10/6÷10/8÷10	209,2/127,2/28,3

На рисунке 4.17 представлено изменение объемного коэффициента легкой фракции $k_L = V_L/V$ от величины тока I .

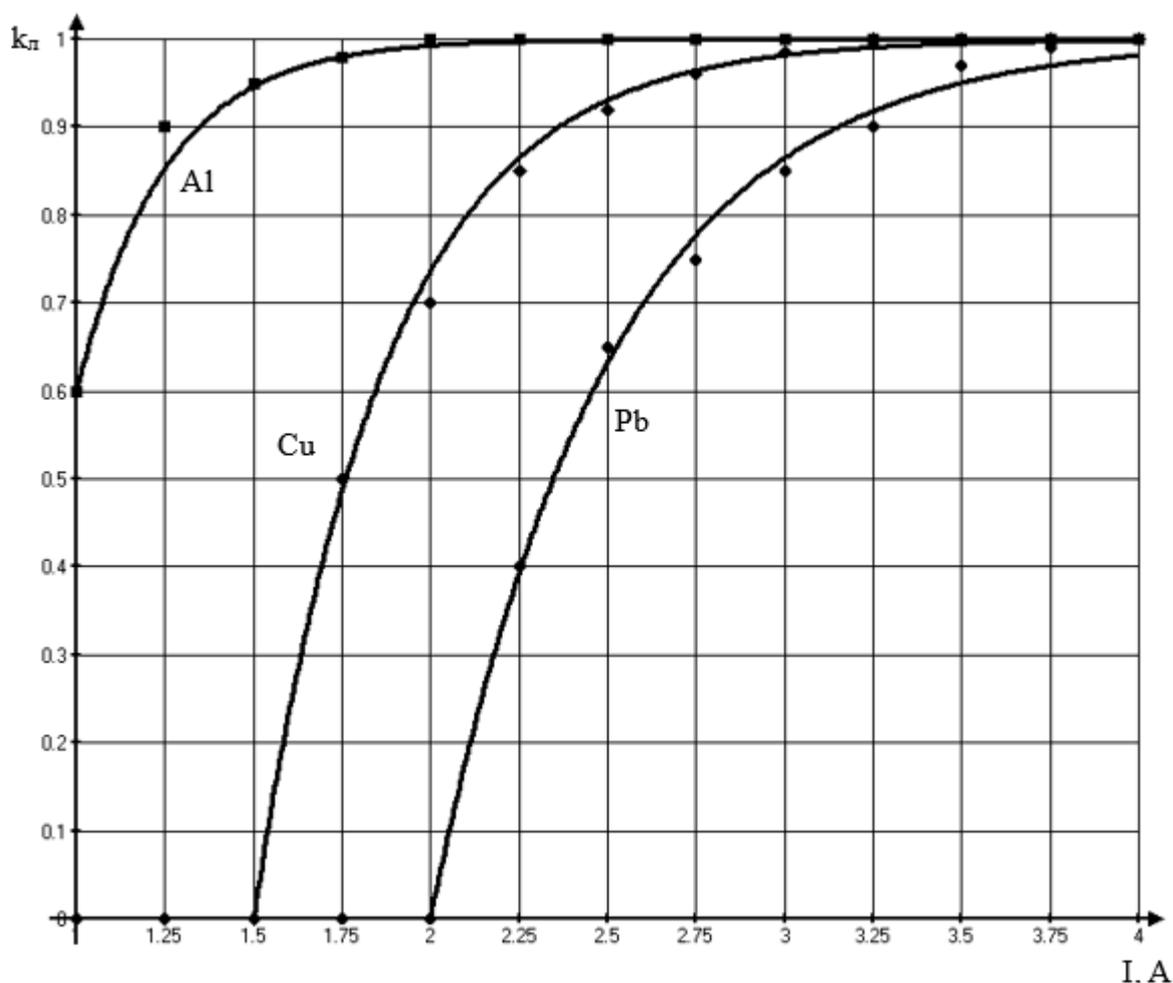


Рисунок 4.17. Зависимость объемного коэффициента легкой фракции $k_L = V_L/V$ от величины тока I в обмотке электромагнита.

Плавное изменение k_L в некотором диапазоне регулирования тока (к примеру, для меди в пределах $1,5\text{А} < I < 3\text{А}$) объясняется влиянием на процесс движения частиц в МЖ вектора начальной скорости \vec{v}_0 , с которой частица входит в МЖ из загрузочного устройства. Для различных частиц значения \vec{v}_0 по

модулю и направлению имеют случайный характер, изменяясь в некотором интервале. Под влиянием приобретенной кинетической энергии некоторые частицы проваливаются через слой МЖ, не успевая подняться на поверхность, и оказываются в приемном контейнере тяжелой фракции МЖ. Некоторые же частицы замедляют свое погружение, двигаясь вдоль верхней поверхности, и в конечном итоге попадают в приемный контейнер легкой фракции.

Зависимости $k_L(I)$ позволяют оценить качество работы МЖС при разделении различных материалов. Для принятой в экспериментальной установке конфигурации рабочего зазора МЖС следует ожидать хорошее качество разделения материалов алюминий – медь при токе в обмотке электромагнита $I=1,5A$ и алюминий – свинец при $I = 1,5 \div 2 A$, так как в этом случае для алюминия $k_L=1$ (частицы движутся по верхней наклонной поверхности МЖ), а для меди и свинца $k_L=0$ (частицы тонут в МЖ). Качественное разделение материалов медь – свинец для выбранной в опыте геометрии рабочего зазора осуществить невозможно, так как не удастся подобрать такое значение тока I , при котором для меди $k_L=1$, а для свинца $k_L=0$. Дальнейшие опыты показали справедливость высказанных предположений – при изменении угла наклона полюсных наконечников в пределах $\alpha=10^\circ \div 20^\circ$, при изменении размеров частиц в пределах, указанных в таблице 4.9, при токе $I=1,5A$ наблюдалось качественное разделение частиц материалов алюминий – медь, а тем более алюминий – свинец. Засоренность выделенных фракций приближалась к 0% .

Далее были проведены исследования движения частиц, указанных в таблице 4.9, по наклонной поверхности МЖ (длиной $L_{МЖ}=160$ мм) при $\alpha=10^\circ, 15^\circ$ и 20° при различных значениях тока I . Начальная скорость движения частиц отсутствовала $\bar{v}_0 = 0$. Фиксировалось время скатывания $t_{СК}$ частиц по поверхности МЖ. Результаты представлены в таблице 4.10.

Согласно результатам таблицы 4.10 влияние исследуемых факторов (плотности и размеров частиц, тока I в обмотке электромагнита, угла наклона α полюсных наконечников) проявляется в следующем:

– при уменьшении диаметра d и длины l цилиндрических частиц их объем V и действующая на них сила тяжести F_T уменьшаются, что вызывает уменьшение касательной движущей силы F_τ . В результате время их скольжения $t_{СК}$ по наклонной поверхности МЖ увеличивается;

– увеличение α приводит к росту силы F_τ и, как следствие, к уменьшению времени $t_{СК}$;

– при уменьшении тока I напряженность H магнитного поля и модуль ее градиента $|\nabla H|$ в зазоре МЖС уменьшаются. Для сохранения состояния плавления частицы на поверхности МЖ выталкивающая сила сепарации F_C не должна изменяться. Поэтому уменьшение I приводит к большему погружению частицы в МЖ и увеличению объема погружения $V_{П}$. В итоге вязкостная сила F_B увеличивается и время $t_{СК}$ растет;

– при уменьшении плотности материала частиц действующая на них сила тяжести F_T также уменьшается и полное погружения частиц в МЖ наблюдается при меньшем значении тока I .

Таблица 4.10. Время скатывания частиц по поверхности МЖ

		$I=4$ А	$I=3$ А	$I=2,5$ А	$I=2$ А	$I=1,5$ А	$I=1$ А
Материал и размеры частиц		$t_{СК}, \text{ с при } \alpha = \begin{cases} 10^\circ \\ 15^\circ \\ 20^\circ \end{cases}$					
Pb	$d=4,5\text{мм}$ $l=10\text{мм}$	0,55	0,5	0,8**			
		0,4	0,4	0,6**	0,6***		
		0,3	0,4	0,4*	0,4***		
	$d=3,5\text{мм}$ $l=7-9\text{мм}$	0,5	0,8	0,9**			
		0,4	0,6	0,7**	0,8***		
		0,3	0,5	0,7*	0,5***		
	$d=1,8\text{мм}$ $l=10\text{мм}$	1	1	1**			
		0,7	0,7	0,7***			
		0,4	0,5	0,9**	0,7***		
Cu	$d=4,9\text{мм}$ $l=8\text{мм}$	0,7	0,6	0,7*	0,5**		
		0,4	0,6	0,6	0,9**		
		0,4	0,4	0,5*	0,5**	0,8***	
	$d=1,4\text{мм}$	1	1,5	1,5*	1,6**	2***	

	l=7÷9мм	0,8 0,5	0,9 0,8	0,9* 0,8*	1,1** 1**	1,1***	
	d=0,8мм	1,7	2,3	2*	2,3**	∞****	
	l=7÷9мм	1,1 0,9	1,2 0,9	1,3* 0,9*	1,2*** 1,4**	1,8***	
Al	d=5,6мм	0,6	0,7	0,6	0,8	0,8*	1,4**
	l=7÷10мм	0,5	0,5	0,6	0,5	0,6*	0,9**
		0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	0,6*
		0,4	0,4	0,4	0,6	0,6	0,7
	d=4,5мм	0,6	0,7	1*	0,8	0,9*	2**
	l=6÷10мм	0,5	0,5	0,6	0,5	0,6*	0,8**
0,4		0,4	0,4	0,6	0,6	0,7*	
d=2мм	1,2	1,4	1,5	1,5	3,3	∞****	
l=8÷10мм	0,8	0,8	0,9	1	1,4*	1,9**	
	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8	1,3*	

Примечание к таблице: * – частица примерно на 50% погружена в МЖ, ** – частица примерно на 80% погружена в МЖ, *** – частица движется в толще МЖ, **** – полное отсутствие движения частицы.

Далее исследовалось непрерывное движение определенного количества медных и алюминиевых частиц, поступающих на наклонную поверхность МЖ с начальной скоростью \bar{v}_0 за счет вибрации лотка подающего устройства с неизменными значениями амплитуды и частоты. Объем немагнитных частиц, загружаемый в бункер подающего устройства (поз. 2 на рис. 4.5), выбирался $V=40 \text{ см}^3$. Напряжение питания микроэлектродвигателя принималось $U_D=50\text{В}$. Полусные наконечники устанавливались к горизонту под углом $\alpha=10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$. Ток в обмотке электромагнита изменялся в пределах $I=1\div 3 \text{ А}$. Длина поверхности МЖ, на которой наблюдалось движение немагнитных частиц, составляла $L_{\text{МЖ}}=160 \text{ мм}$. Измерялось время движения частиц по поверхности МЖ в касательном направлении $\bar{\tau}$ (рисунок 4.1). Результаты эксперимента для $\alpha=10^\circ$ приведены в таблице 4.11. Для других значений угла $\alpha=15^\circ, 20^\circ$ результаты качественно имеют аналогичный характер, но отсутствует закономерное влияние угла α и тока I на время $t_{\text{СК}}$, которое присутствует и в таблице 4.11. Это можно объяснить влиянием на движение частиц начальной скорости \bar{v}_0 , которая для конкретных частиц имеет случайный характер, изменяясь в достаточно широком диапазоне по модулю и направлению.

Таблица 4.11. Время движения немагнитных частиц по поверхности МЖ при $v_0 \neq 0$ в процессе работы МЖС (для $\alpha=10^\circ$)

		I=3 А	I=2,5 А	I=2 А	I=1,5 А	I=1 А
Материал и размеры частиц		t _{ск} , с				
Cu	d=0,45мм l=7÷9мм	136,6	202	117,4*		
	d=0,8мм l=7÷9мм	90,5	60	70,3**		
	d=1,4мм l=7÷9мм			180***		
Al	d=2мм l=8÷10мм	16,7	25,6	22,1	22,7	∞ ****

Примечание к таблице: * – менее 5% частиц упали в контейнер для тяжелой фракции; ** – около 30% частиц упали в контейнер для тяжелой фракции; *** – около 60% частиц упали в контейнер для тяжелой фракции; **** – полное отсутствие движения частицы по поверхности МЖ (частицы собираются в группы и прилипают к поверхности полюсных накладок).

Прослеживаются следующие закономерности:

– при уменьшении тока I в обмотке электромагнита частицы в большей мере погружаются в МЖ. Для медных частиц движение по поверхности прекращается при I=1,5А, для алюминиевых – при I=1А;

– при неизменных параметрах вибрации лотка подающего устройства скорость движения алюминиевых частиц по поверхности МЖ больше, чем медных, так как они имеют меньшую плотность;

– в случае одновременной подачи медных и алюминиевых частиц при токе I=1,5А происходит их качественное разделение с отсутствием засоренности;

– засоренность продуктов разделения отсутствует, если значения угла наклона полюсных наконечников α , рабочей длины МЖ $L_{МЖ}$, проекций начальной скорости движения частиц в МЖ $v_{0\tau}$ и v_{0n} (рисунок 4.1) не превышают взаимосвязанных предельных значений ($\alpha < \alpha_{ПР}$, $L_{МЖ} < L_{МЖПР}$, $v_{0\tau} < v_{0\tauПР}$ и $v_{0n} < v_{0nПР}$).

4.7. Совершенствование конструкции электромагнитного магнитожидкостного сепаратора для разделения многофракционных смесей

Предлагается совершенствование конструкции ЭМЖС, способствующее увеличению эффективности и производительности сепарации. Это достигается тем, что при разделении исходной смеси немагнитных материалов на K фракций K пар симметричных и параллельных полюсных наконечников формируют K участков межполюсного зазора.

Конструкция рассматриваемого ЭМЖС представлена на рисунках 4.18÷4.21. Электромагнитная система сепаратора (рисунок 4.18 и рисунок 4.19) состоит из ферромагнитного сердечника 1 с обмоткой намагничивания 2. По длине сердечника в его верхней части расположены K пар симметричных и параллельных полюсных наконечников 3. В зазоре между наконечниками размещена камера 4 из немагнитного материала. Внутри камеры находится магнитная жидкость 5, которая удерживается в зазоре за счет магнитного поля, создаваемого обмоткой 2 при протекании по ней электрического тока I . Сепаратор содержит грузочное устройство 6 и K контейнеров 7 для продуктов разделения (рисунок 4.19). В вертикальной секущей плоскости (рисунок 4.18) воздушный зазор между парой встречных полюсных наконечников выполнен не равномерным, а расширяющимся кверху. Геометрия профиля поверхности полюсного наконечника, обращенной к межполюсному зазору, имеет либо гиперболическую, либо трапецеидальную, либо многоугольную форму (рисунок 4.20). Кромки рабочей поверхности полюсных наконечников скруглены.

В горизонтальной плоскости в направлении от входного торца сепаратора к его выходному торцу (рисунок 4.18) межполюсный зазор выполняется ступенчатым, состоящим из K участков и расширяющимся к выходному торцу сепаратора. Число участков K равно числу разделяемых фракций в смеси немагнитных материалов. Каждый участок формируется за счет присоединения к сердечнику 1 симметричных и параллельных полюсных наконечников 3.

Величина минимального зазора δ_k между наконечниками и профиль их геометрии на k -ом участке выбираются из условия $\rho_k > \rho_{k+1}$, где ρ_k – эффективная плотность магнитной жидкости на k -ом участке ($k = 1, 2, \dots, K$).

В итоге, поступающая из загрузочного устройства 6 (рисунок 4.19) смесь немагнитных материалов сортируется по величине плотности на отдельные фракции, попадающие в контейнеры 7. Количество фракций равно числу пар полюсных наконечников, формирующих межполюсный зазор.

Таким образом, в рассматриваемом МЖС при однократной загрузке сепарируемой смеси увеличивается количество разделяемых по плотности фракций, что способствует повышению эффективности и производительности работы МЖС.

Результаты, положенные в основу данной главы, были опубликованы в соавторстве в работах [84, 103, 113, 114]. Личный вклад соискателя в работах – разработка экспериментального образца ЭМЖС, проведение экспериментальных исследований и обработка полученных результатов; обоснование усовершенствования конструкции ЭМЖС.

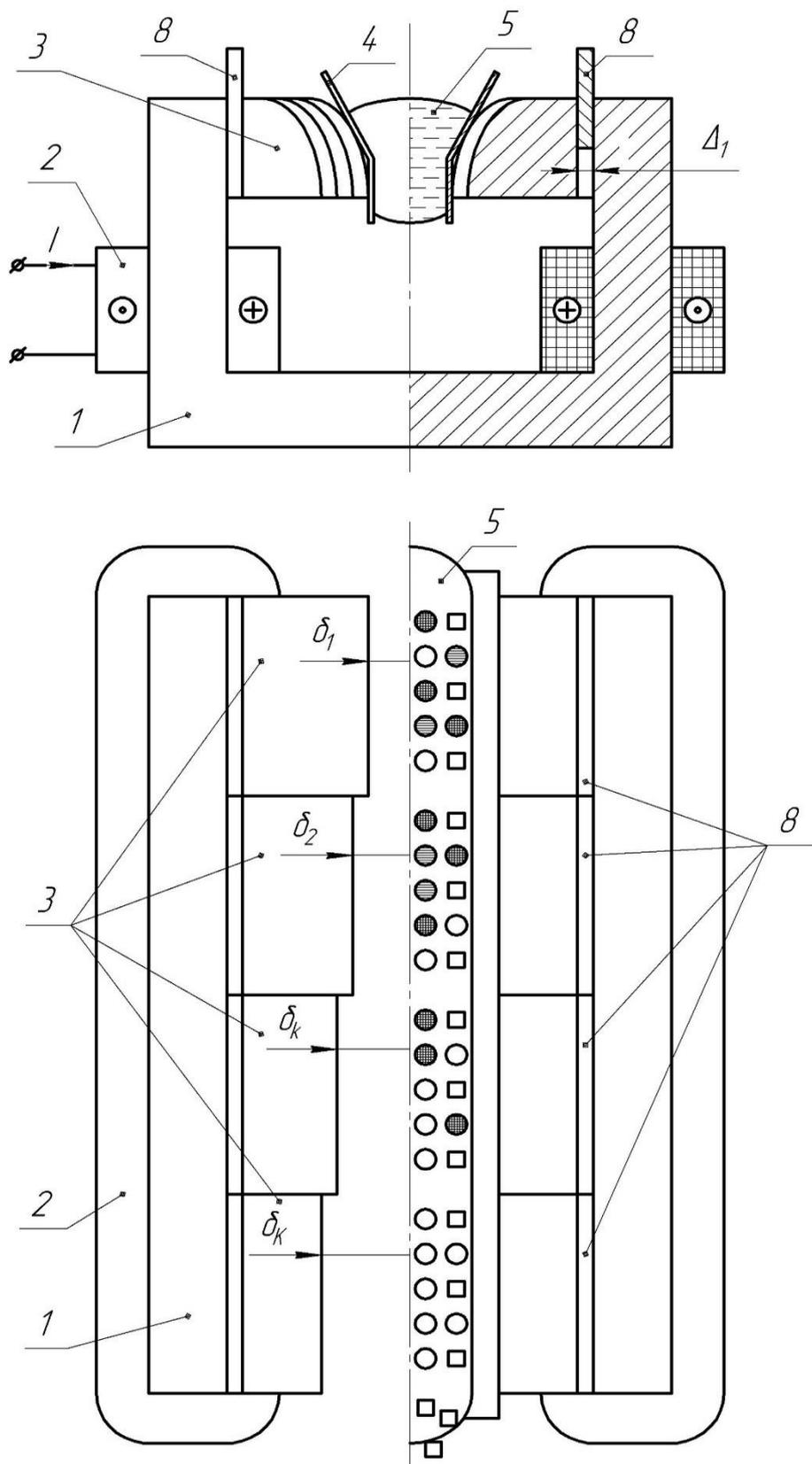


Рисунок 4.18. Электромагнитный магнитожидкостный сепаратор (вид спереди и вид сверху)

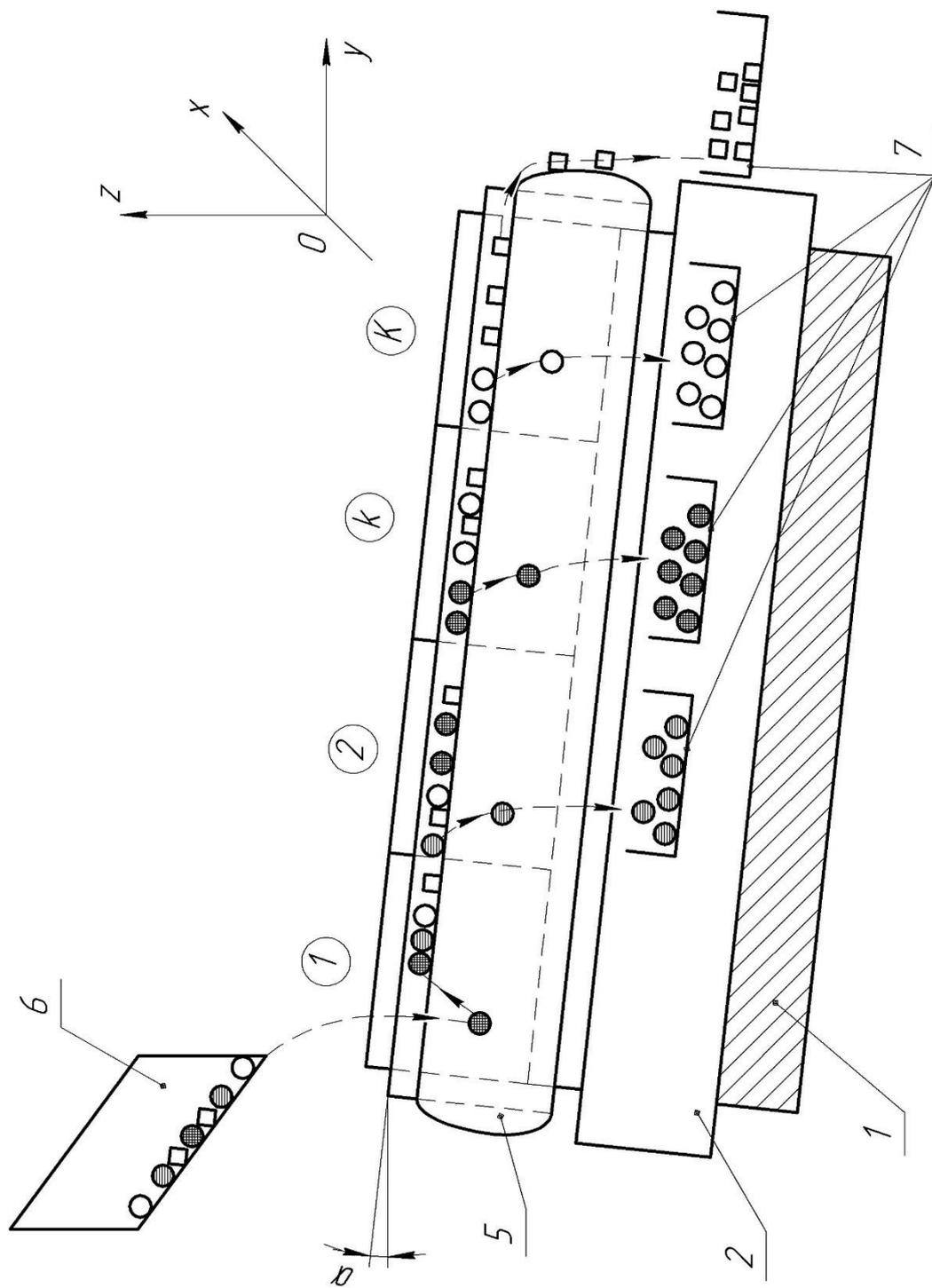


Рисунок 4.19. Электромагнитный магнитожидкостный сепаратор (вид слева)

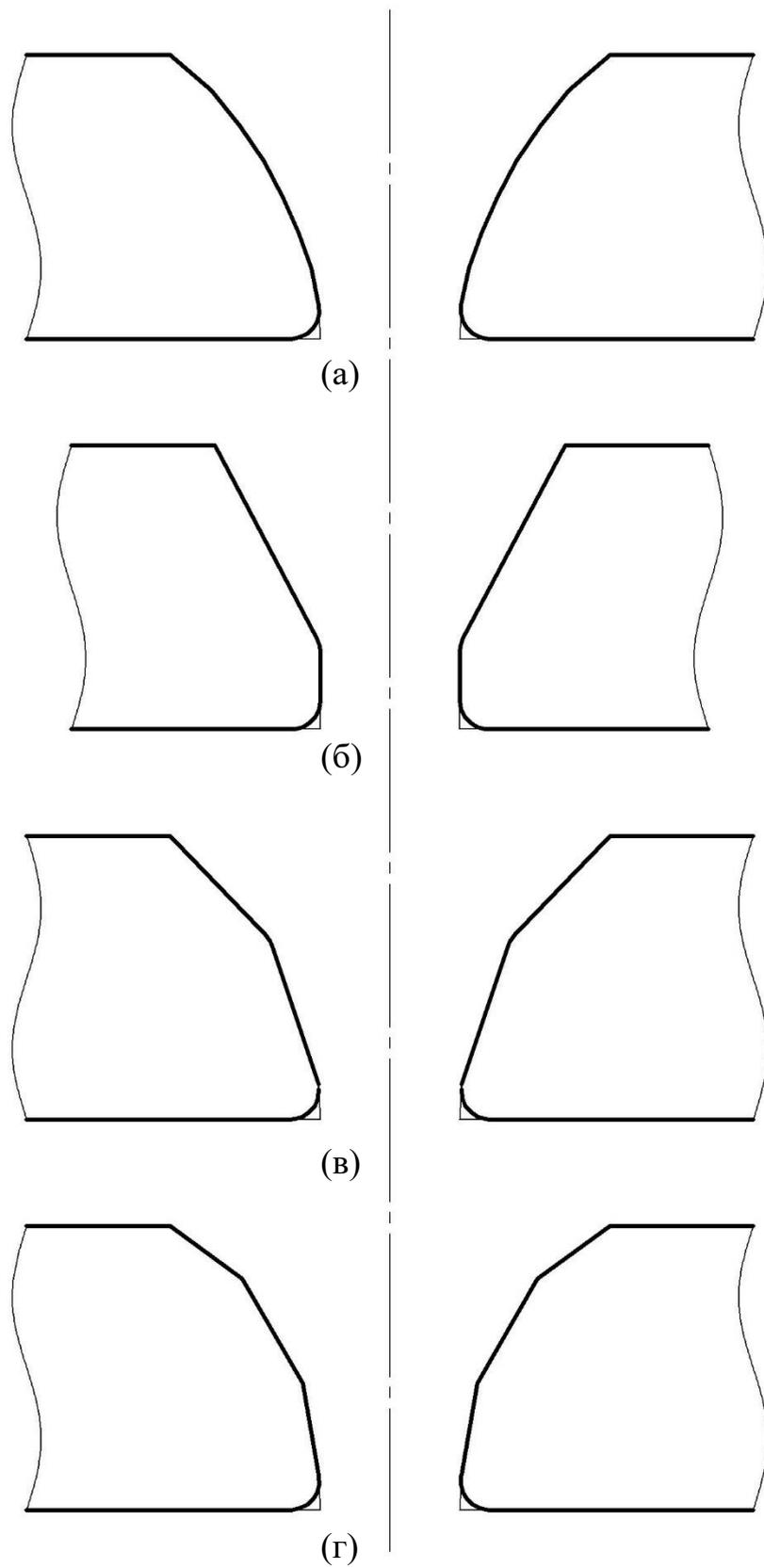


Рисунок 4.20. Формы профиля поверхности полюсного наконечника:
 (а) - гиперболический профиль; (б) – трапецидальный профиль;
 (в) и (г) – многоугольный профиль.

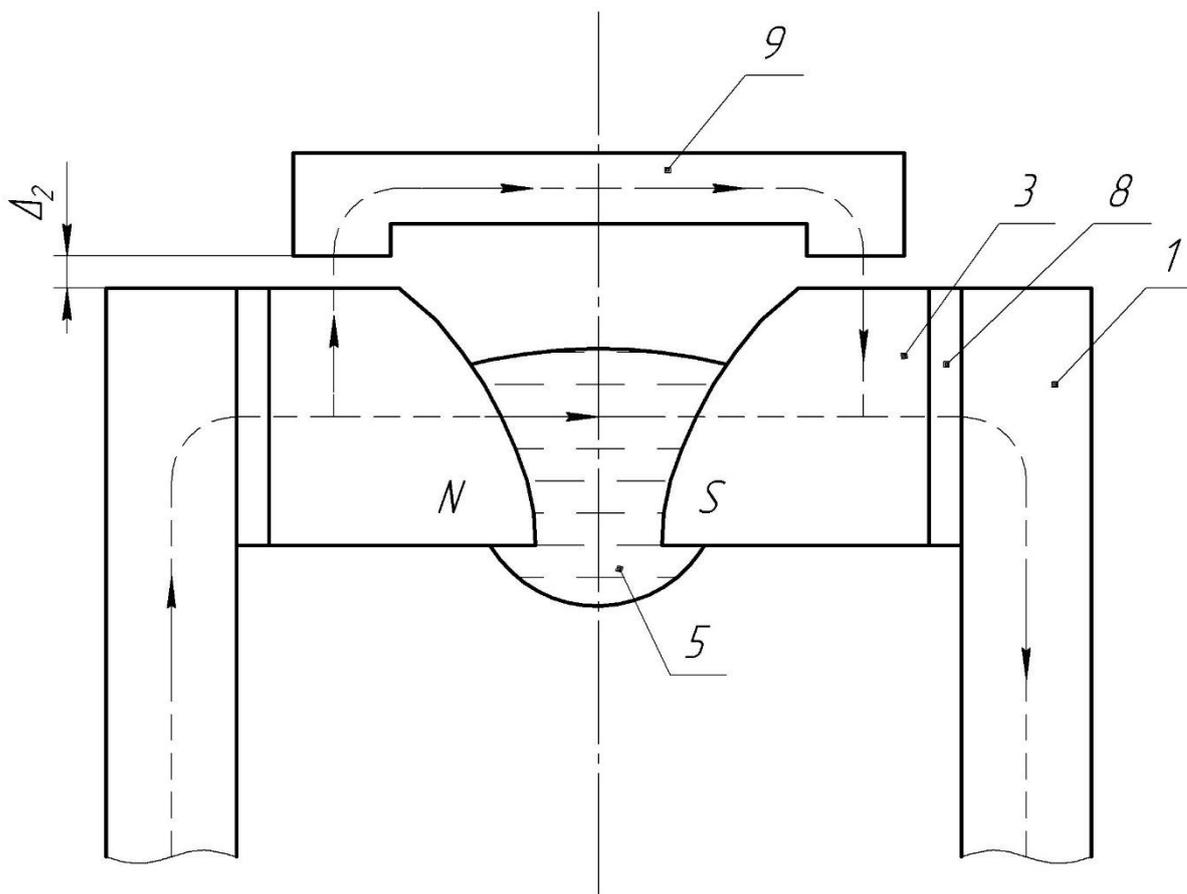


Рисунок 4.21. Расположение магнитного шунта над полюсными наконечниками

4.8. Выводы

1. Разработанный опытный лабораторный образец электромагнитного магнитожидкостного сепаратора позволяет проводить экспериментальные исследования влияния технологических факторов (плотности, размера и формы сепарируемых частиц, заполнения объема рабочей зоны) на процесс сепарации немагнитных материалов.
2. Установлено, что степень заполнения рабочей зоны ЭМЖС немагнитными частицами влияет 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.

2. Разработана патентозащищенная конструкция ЭМЖС повышенной функциональности для сепарации многофракционных смесей немагнитных материалов.
3. По результатам экспериментальных исследований процессов сепарации немагнитных материалов по плотности установлено, что погрешность теоретических исследований на основе разработанных и представленных в предыдущих разделах диссертации математических моделей не превышает более 8 %.

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 исследований 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.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Способы переработки электронного лома за рубежом. – URL: <http://metal-archive.ru/metallurgiya-zolota-i-serebra/2611-sposoby-pererabotki-elektronnogo-loma-za-rubezhom.html> (дата обращения: 5.10.2020). – Текст: электронный.
2. ELCUT: Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Версия 5.4: Руководство пользователя. - С.-Петербург, Производственный кооператив ТОР, 2007.- 297с.
3. Промышленность по переработке отходов / Справочник – URL: <http://art.vdma.org> (дата обращения: 5. 05.2018). – Текст: электронный.
4. Хефели, В. Еще раз об электрических и электронных отходах. – URL: <http://www.solidwaste.ru> (дата обращения: 5.05.2018). – Текст: электронный.
5. Kazakov, Y. Calculation of the force acting on nonmagnetic body in magnetic liquid in the presence of inhomogeneous magnetic field / Kazakov, Y., Stradomskiy, Y., Filippov, V// AMTEE 11: Tenth International Conference on Advanced Methods in the Theory of Electrical Engineering. - University of West Bohemia, Klatovy, Czech Republic. September 2011. - P. II-9 - II-10.
6. Kazakov, Y. The separators of nonmagnetic materials on base nanodispersed magnetic fluids / Kazakov, Y., Stradomskiy, Y., Filippov, V //13th INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTROMECHANICS, ELECTROTECNOLOGY, ELECTROMATERIALS AND COMPONENTS: ABSTRACTS. - Alushta, Crimea. September 19-25, 2010. P. 13.
7. Kazakov, Yu. 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). 7th - 11th January 2013. Abstract Book. - CSIR-National Physical Laboratory Dr. K.S. Krishnan Marg, New Delhi, India. P. 315-317.

8. Lungu, M. Eddy-current separation of small non-ferrous particles using a single disc separator with permanent magnet/ Lungu M., Rem P.C. // IEEE Transaction on Magnetics, 2003, No 39(4), pp. 2062-2067.
9. Mittle, V. N. Design Of Electrical Machines.// Standard Publishers Distributors. - 2005. - 616 pp.
10. Non-ferrous metal separator / URL: www.steinert.de (дата обращения: 5.10.2020). – Текст: электронный.
11. Non-ferrous metals separators Lindemann / URL: www.metsominerals.com (дата обращения: 5.10.2020). – Текст: электронный.
12. Patent JP № 55094658. Non-magnetic metal sorter with linear motor / O. Akishi // appl. date: 08.01.79; date of publ.: 18.07.80. IPC class: B03C 1/ 24.
13. Patent JP № 60143846. Linear motor - type sorting device of non-magnetic metal / O. Akishi, T. Makoti, T. Katsuhi // appl. date: 10.12.84; date of publ.: 30.07.85. IPC class: B03C 1/ 24.
14. Schloemann, E. Separation of nonmagnetic metals from solid wastes // J. of Applied Physics, 1975, vol. 46, № 11, p. 5012-5020.
15. Separation technology / URL: www.cogelme.com (дата обращения: 5.10.2020). – Текст: электронный.
16. Zhang, S. Aluminium recovery from electronic scrap by High-Force eddy-current separators / Zhang, S., Forssberg, E., Arvidson, B., Moss, W. // Resources, Conservation and Recycling, 1998, No 23, pp. 225-241.
17. Абакумов, А.М. Исследование активной подвески автомобиля с магнитореологическим амортизатором/ А.М. Абакумов, Э.Г. Чеботков, Д.Г. Рандин // Известия Московского государственного технического университета МАМИ.2015. Т. 1. № 2 (24). С. 5-10. (ВАК)
18. Абакумов, А.М. Исследование эффективности активной системы виброзащиты с магнитореологическим демпфером/ А.М. Абакумов, Д.Г. Рандин // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2016. № 6. С. 68-71. (ВАК)

19. Авторское свидетельство №1015912 3(51) ВОЗС 1/30 БИ №17,1983г. Н.Д. Кравченко, А.В. Дубинин. Всесоюзный научно-исследовательский институт вторичных цветных металлов.
20. Авторское свидетельство №1136840 БИО №4,1985г. ВОЗС 1/30. Р. Д. Смолкин и др. Государственный проектно-конструкторский институт "Гипромашуглеобогащение".
21. Авторское свидетельство №1159640 4(51) ВОЗС 1/02 БИ №21,1985г. Н.Д. Кравченко и др.
22. Авторское свидетельство №1327966 БИО №29,1987г. ВОЗС 1/30. Г.П. Попов, Ю.М. Гарин и др. Государственный проектно-конструкторский институт "Гипромашуглеобогащение" и Центр НИИ оловянной промышленности.
23. Авторское свидетельство №2000146 БИО №33-36,1993г. ВОЗС 1/30. М.В. Лукашевич. Научно исследовательский институт механики МГУ им. Ломоносова.
24. Авторское свидетельство №782870 ВОЗС 1/02, ВОЗС 1/30 БИ №14, 1980г. Р.Д. Смолкин и др.
25. Авторское свидетельство №997816 ВОЗС 1/30 БИО №7,1983г. Н.Д. Кравченко, К.П. Козловский и др. Всесоюзный научно-исследовательский институт вторичных цветных металлов.
26. Авторское свидетельство СССР №1101304 ВОЗС 1/00 БИ №25,1984г. В.С. Крохмаль, Р.Д. Смолкин и др.
27. Авторское свидетельство СССР №1103901 ВОЗС 1-30 БИ №27, 1984г. Р. Д. Смолкин, Ю.М. Гарин и др. Государственный проектно-конструкторский институт "Гипромашуглеобогащение".
28. Авторское свидетельство СССР №1151309 4(51) ВОЗС 1/30 БИ №15, 1985г.
29. Авторское свидетельство СССР №829186 ВОЗС 1/14 БИ №18, 1981г. Р.Д. Смолкин и др.

30. Александров, Г. Н. Проектирование электрических аппаратов / Александров, Г. Н., Борисов, В. В., Каплан, Г. С., Кукеков, Г. А., Карпенко, Л. Н. - Учебник для вузов. - под ред. Г. Н. Александрова, Л., Энергоатомиздат, Ленинградское отделение. -1985г. - 448 с.

31. Арефьев, И.М. Изучение термостабильности пластической вязкости магнитных жидкостей. / Арефьев, И.М., Арефьева, Т.А., Казаков, Ю.Б. // Сб. научн. тр. 14 Междун. Плесской научн. конф. по нанодисперсным магнитным жидкостям. - Плес. 7 - 10 сентября 2010. - С. 119-122.

32. Арефьев, И.М. Исследование устойчивости нанодисперсной магнитной жидкости в высокоградиентном магнитном поле/ Арефьев И.М., Арефьева Т.А., Страдомский Ю.И. // Сборник научн. трудов 14-ой Междун. Плесской научн. конф. по нанодисперсным магнитным жидкостям. - Плес. 7 - 10 сентября 2010. С. 375-379.

33. Багин, Д.Н. Электродинамические сепараторы на основе линейных индукционных машин для обработки мелких фракций лома цветных металлов: дисс. канд.техн. наук. 05.09.01 / Екатеринбург, УрФУ. - 2016. - 152 с.

34. Балде, К.П. Глобальный мониторинг электронных отходов/ К.П. Балде, В. Форти, В. Грей, Р. Кюр, П. Стегманн / 2017 год, Университет Организации Объединенных Наций (УООН), Международный союз электросвязи (МСЭ) и Международная ассоциация по твердым отходам (МАТО), Бонн/Женева/Вена.

35. Баркан, М. Технология извлечения драгоценных металлов из отходов электротехники / Баркан М., Чиненкова М. / [Электронный ресурс] <http://www.waste.ru/modules/section/item.php?itemid=233>

36. Берковский, Б.М. Магнитные жидкости / Б.М. Берковский, В.Ф. Медведев, М.С. Краков - М.: Химия, 1989. - 240 с.

37. Блум, Э.Я. Магнитные жидкости/ Блум Э.Я., Майоров М.М., Цеберс О.А. // Рига: Зинатне, 1989. - 386с.

38. Буль, О. Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов. Магнитные цепи, поля и программа FEMM: Учебное пособие для студентов высш. учеб. заведений// М.: Издательский центр "Академия". - 2005. - 336 С.

39. Володин, Г. И. Металлоуловитель цветных металлов на основе двухстороннего линейного асинхронного электродвигателя // Изв. вузов. Электромеханика, 1999, № 4, с. 16-18.

40. Володин, Г.И. Электромагнитные процессы в устройствах с произвольной подвижной частью: дисс. докт. техн. наук. 05.09.01 / Новочеркасск, ЮРГУ (НПИ). 2009. - 304 с.

41. Гогосов, В.В. Магнитожидкостные сепараторы / В.В. Гогосов. Р.Д. Смолкин // Механизация и автоматизация производства. - 1990. - №4. - С.32-33.

42. Гогосов, В.В. Промышленные сепараторы на магнитных жидкостях/ Гогосов В.В, Смолкин Р.Д., Крохмаль В.С., Сайко О.П., Мангов Л.И., Низкодубов В.И. / Магнитная гидродинамика. - 1994. - №1. - С. 111 - 120

43. Гуляихин, Е.В. Сепарация минерального сырья в псевдоутяжеленных средах / Гуляихин Е.В., Солоденко А.Б. Бочкарев Г.Р. / - Новосибирск: Наука, 1984. - 140 С.

44. Домбровский, В.В. Справочное пособие по расчёту электромагнитного поля в электрических машинах / В.В. Домбровский - Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. Отд-ние, 1983. - 256 с.

45. Дядин, В.И. Электродинамическая сепарация немагнитных дисперсных смесей / В.И. Дядин, А.С. Латкин // Цветные металлы, 2005, № 2, с. 15-18.

46. Казаков, Ю.Б. Анализ движения немагнитных частиц в нанодисперсной магнитной жидкости гидростатического сепаратора / Ю.Б. Казаков, Ю.И. Страдомский, В.А. Филиппов // Перспективные материалы. Спец. выпуск: Функциональные материалы и высокочистые вещества. - 2010. № 11. Ч.1 - С. 220-228.

47. Казаков, Ю.Б. Математическая модель движения немагнитных частиц в рабочем зазоре гидростатического магнитожидкостного сепаратора/ Казаков

Ю.Б., Страдомский Ю.И., Филиппов В.А. // Сборник научн. трудов 17-ой Междун. Плесской научн. конф. по нанодисперсным магнитным жидкостям. - Плес. сентябрь 2016. С. 178-186

48. Казаков, Ю.Б. Математическое моделирование процесса движения немагнитных частиц в рабочем зазоре гидростатического магнитожидкостного сепаратора / Ю.Б. Казаков, Ю.И. Страдомский, В.А. Филиппов // Инновационные проекты молодых ученых за 2011 г.: сб. отчетов - Иваново: ИГЭУ, 2012. Том 2. С. 16-22.

49. 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 2011. Вып. 3/ ГОУВПО Ивановский государственный университет имени В.И. Ленина. - Иваново, 2011. - С. 17-19.

50. Казаков, Ю.Б. Моделирование влияния неоднородности профиля массовой силы и концентрации твердых частиц на их сепарацию в вязкой жидкости / Ю.Б. Казаков, В.Е. Мизонов, Е.А. Баранцева, В.А. Филиппов // Сборник научных трудов Международной научно-технической конференции "Состояние и перспективы развития электротехнологии" (XVI Бенардосовские чтения). - Иваново, 2011. Т.2. - С.319 - 322.

51. Казаков, Ю.Б. Моделирование и исследование регулируемой сепарации немагнитных материалов в магнитожидкостных электроустановках / Казаков Ю.Б., Страдомский Ю.И., Филиппов В.А. // Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий АПЭЭТ-2011. Сб. научн. тр. / ФГАОУ ВПО УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина. - Екатеринбург: РИО УГТУ-УПИ, 2011. С. 171-177.

52. Казаков, Ю.Б. Моделирование и исследование электротехнической системы регулируемой сепарации немагнитных материалов с использованием нанодисперсных магнитных жидкостей / Казаков Ю.Б., Страдомский Ю.И., Филиппов В.А. / Вестник ИГЭУ 2011. Вып. 2/ ГОУВПО Ивановский государственный университет имени В.И. Ленина. - Иваново, 2011. - С. 54-57.

53. Казаков, Ю.Б. Расчет силы, действующей на немагнитное тело в магнитной жидкости в присутствии неоднородного магнитного поля / Ю.Б. Казаков, Ю.И. Страдомский, В.А. Филиппов // Сборник научных трудов междун. н.-т. конф. "Состояние и перспективы развития электротехнологии" - Иваново: ИГЭУ, 2011. Том 3. С. 158-161.

54. Казаков, Ю.Б. Расчет силы, действующей на немагнитное тело в магнитной жидкости в присутствии неоднородного магнитного поля/ Казаков Ю.Б., Страдомский Ю.И., Филиппов В.А. // "Физико-химические и прикладные проблемы магнитных дисперсных наносистем": Сборник трудов III Всероссийской научной конференции / ГОУ ВПО "Ставропольский государственный университет". - Ставрополь: Издательско-информационный центр "Фабула", 2011. С. 113-118.

55. Казаков, Ю.Б. Формирование конфигурации рабочей поверхности магнитной жидкости в магнитожидкостном сепараторе / Ю.Б. Казаков, Ю.И. Страдомский, В.А. Филиппов // Сборник научных трудов междун. н.-т. конф. "Состояние и перспективы развития электротехнологии" - Иваново: ИГЭУ, 2013. Том 3. С. 116-118.

56. Казаков, Ю.Б. Численное моделирование процессов в нанодисперсных магнитожидкостных системах/ Казаков Ю.Б., Страдомский Ю.И., Филиппов В.А.// Перспективные материалы. Спец. выпуск: Функциональные наноматериалы и высокочистые вещества. - 2008, №6. ч.1. - с. 459 - 463.

57. Кирнарский, А. С. Плотность разделения как мера технологического равновесия // Уголь Украины. - 2015. - № 1-2. - С. 71 - 72.

58. Колчанов, Н. В., Колесниченко Е. В. Вязкость магнитных коллоидных жидкостей при различных температурах и объёмных долях твёрдых частиц / Колчанов, Н. В., Колесниченко Е. В. // Вестник Пермского университета. Физика. 2017. № 4 (38). С. 37-45. doi: 10.17072/1994-3598-2017-4-37-44

59. 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.

60. Коняев, А.Ю. Моделирование электродинамического сепаратора на основе линейного индуктора / А.Ю. Коняев, Д.Н. Багин// Электротехника. 2018. №3. С. 34-40.

61. Коняев, А.Ю. Опыт разработки электродинамических сепараторов для технологий утилизации твердых отходов / А.Ю. Коняев, Д.Н. Багин, И.А. Коняев, С.Л. Назаров, Н.С. Якушев // Экология промышленного производства, 2014, № 2 (86), с.17-21.28.

62. Коняев, А.Ю. Особенности электродинамической сепарации мелкой фракции твердых бытовых отходов/ А.Ю. Коняев, Ж.О. Абдуллаев, Д.Н. Багин, И.А. Коняев // Экология и промышленность России. 2017. Т.21. № 6. С. 4-9.

63. Коняев, А.Ю. Применение линейных индукторов со встречно бегущими магнитными полями в электродинамических сепараторах/ А.Ю. Коняев, Ж.О. Абдуллаев, Д.Н. Багин, М.Е. Зязев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2019. № 32. С. 22-37. (ВАК)

64. 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.

65. Коняев, А.Ю. Электродинамические сепараторы с бегущим магнитным полем: основы теории и расчета / А.Ю. Коняев, И.А. Коняев, Н.Е. Маркин, С.Л. Назаров. - Екатеринбург: УрФУ, 2012. - 104 с.

66. Коняев, И. А. Электродинамические сепараторы с повышенной частотой магнитного поля для обработки отходов электро- и радиотехники / И. А. Коняев, Р. Ф. Талипов, Н. С. Якушев // Система управления экологической безопасностью: сборник трудов IX заочной международной научно-

практической конференции (Екатеринбург, 30-31 мая 2015 г.). - Екатеринбург: УрФУ, 2015. - С. 121-126.

67. Коняев, И.А., Электродинамические сепараторы с вращающимся магнитным полем: дисс. ... канд. техн. наук. 05.09.01 / Екатеринбург, УГТУ-УПИ. 2009. - 117 с.

68. Копылов, И.П. Математическое моделирование электрических машин: Учеб. для вузов. - М.: Высш. шк., 1994. - 318 с.

69. Кравченко, Н.Д. Магнитная сепарация отходов цветных металлов / Н.Д. Кравченко, В.И. Карамзин // М.: Metallurgia, 1986, - 129 с.

70. Кривцова, Г.Б. Электродинамическая сепарация цветных металлов перед металлургическим переделом в поле токов высокой частоты / Г.Б. Кривцова, А.Н. Пименов, В.В. Петухов // Metallurg, 2009, № 8, с. 84-88.

71. Куимов, Д.Н. Электромеханический преобразователь со вторичной дискретной частью в системах обработки нефти и нефтепродуктов / Д.Н. Куимов, А.В. Павленко, А.А. Белов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. - 2017. - №5. - С.39-47.

72. Линейный двигатель-маховик с магнитной смазкой / Геча В.Я., Захаренко А.Б., Белокурова Н.А., Надкин А.К. // Электротехника - № 10, 2018. – С. 72-75. (АО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

73. Лукьянчиков, В.Н. Разработка технологий переработки техногенного сырья цветных и черных металлов с использованием дисковых электродинамических сепараторов: автореф. дисс. канд. техн. наук. 05.15.08 / Москва, ИПКОН. 1993. -18 с.

74. Макаров, В.М. Получение магнитных жидкостей из промышленных отходов [Текст]: монография/ В.М. Макаров, С.З. Калаева. - Ярославль: Издат. дом ЯГТУ, 2016. -176 с. -535 экз. - ISBN: 978-5-9914-0534-8.

75. Максимов, Р.Н. Разделение смесей при утилизации хвостов обогащения / Максимов Р.Н., Голик В.И. // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2005. - № 4 - С. 322-325.

76. Мальцева, М.С. Магнитные жидкости из промышленных отходов для сепарации различных материалов / М.С. Мальцева, И.А. Невзоров, С.З. Калаева, В.М. Макаров, И.Н. Захарова // Сб. научн. тр. I Международной научно-практической конференции: Актуальные проблемы безопасности жизнедеятельности и экологии - Тверь, 2015. С. 276-280.

77. Маркин, Н.Е., Повышение эффективности электродинамических сепараторов с бегущим магнитным полем: дисс. ... канд. техн. наук. 05.09.01 / Екатеринбург, УГТУ-УПИ. 2011. - 136 с.

78. 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.

79. Морозов, Н.А. Нанодисперсные магнитные жидкости в технике и технологиях / Н.А. Морозов, Ю.Б. Казаков. - Иваново: ФГБОУВПО ИГЭУ, 2011. - 264 с. ISBN 978-5-89482-772-8

80. Мязин, В.П. Электродинамический сепаратор для извлечения мелких классов золота из металлоносных песков / В.П. Мязин, В.И. Дядин, А.С. Латкин // Вестник Забайкальского государственного университета, Чита, 2009, №5, с. 45-51.

81. Нестеров, С.А. Совершенствование моделей и конструкций поршневых электромеханических магнитожидкостных демпферов: дисс. канд.техн. наук. 05.09.01 / Иваново, ИГЭУ. - 2018. - 142 с.

82. Орлов, Д.В. Магнитные жидкости в машиностроении / Д.В. Орлов, Ю.О. Михалёв, Н.К. Мышкин [и др.]; под ред. Проф. Д.В. Орлова, проф. В.В. Подгоркова. - М.: Машиностроение, 1993. - 275 с.

83. Основы теории электрических аппаратов / Акимов Е.Г., Белкин Г.С., Годжелло А.Г., Дегтярь В.Г., Курбатов П.А., Райнин В.Е., Таев И.С., Шоффа В.Н. Под ред. П.А. Курбатова. - 5-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Издательство «Лань», 2015. – 592 с.

84. Патент изобретение №2464101. Магнитогидростатический сепаратор / Страдомский Ю. И., Казаков Ю.Б., Филиппов В.А. / Заявка № 2011112604 от 01.04.11. Решение о выд. патента от 15.05.12. Зарегистр. в Гос. реестре изобретений РФ 20.10.2012 г. Оpubл. 10.10.2012 Бюл. N 28.

85. Патент на изобретение RU 2690797, 05.06.2019. Способ утилизации гальваношлама / Макаров В.М., Калаева С.З., Дубов А.Ю., Дубов Г.А., Маркелова Н.Л. // Заявка №2018125193 от 09.07.2018.

86. Патент Японии № 52-42944. Сортировочное устройство для металла / Заявитель Коге Гидзюцу Инте. Заявл. 17.10.1975, № 50-124265; опубл. 27.10.1977. МКИ В03С 1/24.

87. Пелевин, А. Е. Магнитные и электрические методы обогащения. Магнитные методы обогащения: учебник / Пелевин А. Е.; Урал. гос. горный ун-т. - Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2018. - 296 с.

88. Перминов, С.М. Исследование влияния температуры на параметры и работу магнитожидкостных герметизаторов / С.М. Перминов, Т.И. Вильгельм // Тезисы 7 междунар. Плесской конференции по магнитным жидкостям / Иван. Гос. Энерг. Ун-т. - Иваново: ИГЭУ, 1996. - С. 160.

89. Петросов, А.А. Экономика и организация разработки россыпных месторождений золота артелями старателей: Учебное пособие для вузов / Петросов А.А., Фефелов А.В. - М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2004. - 342 с.

90. Полуниин, В.М. Механика нано- и микродисперсных магнитных сред / В.М. Полуниин, А.М. Стороженко, П.А. Ряполов, Г.В. Карпова; под ред. В.М. Полунина. - М.: - ФИЗМАТЛИТ, 2015. - 192 с. ISBN 978-5-9221-1640-4

91. Полуниин, В.М. Начала механики дисперсных магнитных сред: учеб. Пособие / В.М. Полуниин, А.М. Стороженко, П.А. Ряполов [и др.]; под ред. Проф. В.М. Полунина. - Курск: ФГБОУВПО "Юго-Западный государственный университет", 2014. - 135 с. ISBN 978-5-9905939-5-4.

92. Рандин, Д.Г. Электротехническая активная система виброзащиты с магнитореологическим демпфером// Автореферат дис. ... кандидата технических наук / Сам. гос. техн. ун-т. Самара, 2016 г.

93. Розенцвейг, Р. Феррогидродинамика: Пер. с англ. // М.: Мир, 1989. - 356 с.

94. Сахаров, П.В. Проектирование электрических аппаратов. - Учебное пособие для студентов электромеханических вузов. - М.: Энергия. -1971г.

95. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2011617292 "Моделирование сепарации твёрдых частиц из концентрированной суспензии" / Мизонов В.Е., Казаков Ю.Б., Филиппов В.А., Баранцева Е.А. // ГОУ ВПО ИГЭУ - Заявка № 2011615440 от 21 июля 2011 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 19 сентября 2011 г.

96. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2019616505 "Расчет траекторий немагнитных частиц в зоне разделения магнитожидкостного сепаратора" / Филиппов В.А.// ФГБОУ ВО ИГЭУ - Заявка № 2019615527 от 15 мая 2019 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 23 мая 2019 г

97. Сепаратор электродинамический СЭД1-100/8 / URL: [http // www.vniitvch.ru](http://www.vniitvch.ru).

98. Сипайлова, Н.Ю. Электрические и электронные аппараты. Проектирование: учеб. пособие / Н.Ю. Сипайлова. – М.: Издательство Юрайт, 2017. – 167 с.

99. Специальные электрические машины. Источники и преобразователи энергии: Учеб. пособие для вузов.- В 2-х кн. /А. И. Бертинов, Д.А. Бут, С.Р. Мизюрин, Б.Л. Алиевский, Н.В. Синева; Под ред. Б.Л. Алиевского - М.: Энергоатомиздат, 1993. Кн.1 - 320с.; Кн.2 -368с.

100. Страдомский Ю.И. Влияние размера и формы немагнитных частиц на выталкивающую силу, действующую на них в гидростатическом магнитожидкостном сепараторе / Страдомский Ю.И., Филиппов В.А., Казаков

Ю.Б. // Сборник научн. трудов 14-ой Междун. Плесской научн. конф. по нанодисперсным магнитным жидкостям. - Плес. 7 - 10 сентября 2010. С. 308-314.

101. Страдомский, Ю.И. Анализ геометрии рабочего зазора магнитожидкостного сепаратора / Страдомский Ю.И., Филиппов В.А. // Сборник научн. трудов 16-ой Междун. Плесской научн. конф. по нанодисперсным магнитным жидкостям. - Плес. сентябрь 2014. С. 411-416

102. Страдомский, Ю.И. Анализ движения сепарируемых частиц в зазоре сепаратора на основе нанодисперсных магнитных жидкостей / Страдомский Ю.И., Казаков Ю.Б., Филиппов В.А. // Сборник научных трудов. II Всероссийская научная конференция "Физико-химические и прикладные проблемы магнитных дисперсных наносистем" - ГОУВПО "Ставропольский государственный университет", 2009, - С. 246 - 252.

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

104. Страдомский, Ю.И. Обеспечение требуемой траектории движения легких частиц в магнитожидкостном сепараторе путем влияния на форму поверхности жидкости перераспределенным магнитным полем / Страдомский Ю.И., Филиппов В.А., Казаков Ю.Б. // "Физико-химические и прикладные проблемы магнитных дисперсных наносистем": Сборник трудов IV Всероссийской научной конференции / ФГАОУ ВПО "Северо-Кавказский федеральный университет". - Ставрополь: Издательско-информационный центр "Фабула", 2013. - С. 226-231.

105. Страдомский, Ю.И. Основы феррогидродинамики: учебное пособие / Ю. И. Страдомский. - Иваново: ИГЭУ, 2004. - 108 с.

106. Страдомский, Ю.И. Проектный расчет магнитожидкостного сепаратора дисперсных немагнитных материалов / Страдомский Ю.И., Филиппов В.А. // Материалы Международной научно-технической конференции "Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии" (XIX Бенардосовские чтения). - Иваново, 2017. Том 3. С. 211-214

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

108. Стрижко, Л.С. 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 № 3. 2013. С. 28 - 33.

109. Теляков, А.Н. Результаты испытания технологии переработки радиоэлектронного лома / Теляков, А.Н. Иконин, Л.В. // Записки горного института новые технологии в металлургии, химии, обогащении и экологии. - 2006. - Т. 169. - С. 193-195.

110. Фертман, В.Е. Магнитные жидкости: Справ. пособие Мн.: Выш. шк., 1988. - 184 с.

111. Филиппов, В.А. Анализ геометрии рабочего зазора статического магнитожидкостного сепаратора немагнитных материалов с использованием потенциальной энергии / Филиппов В.А., Страдомский Ю.И. // Состояние и перспективы развития электротехнологии: Материалы конференции / ГОУВПО Ивановский государственный университет имени В.И. Ленина. - Иваново, 2009. - 268с. С. 61

112. Филиппов, В.А. Анализ способов классификации немагнитных материалов по плотности / Филиппов В.А., Страдомский Ю.И. // Сборник трудов: "13-я международная Плесская конференция по нанодисперсным магнитным жидкостям" // ГОУВПО Ивановский государственный

энергетический университет имени В.И. Ленина, 2008 - Иваново: ИГЭУ, 2008. - С. 434-438

113. Филиппов, В.А. Влияние размера немагнитной частицы на ее поведение в магнитной жидкости / Филиппов, В.А., Арефьев, И.М. // "Физико-химические и прикладные проблемы магнитных дисперсных наносистем": Сборник трудов IV Всероссийской научной конференции / ФГАОУ ВПО "Северо-Кавказский федеральный университет". - Ставрополь: Издательско-информационный центр "Фабула", 2013. - С. 237-239.

114. Филиппов, В.А. Исследование влияния заполнения зазора магнитожидкостного сепаратора немагнитными частицами на рабочий процесс / Филиппов В.А., Страдомский Ю.И., Арефьев И.М. // "Физико-химические и прикладные проблемы магнитных дисперсных наносистем": Сборник трудов V Всероссийской научной конференции / ФГАОУ ВПО "Северо-Кавказский федеральный университет". - Ставрополь: Издательско-информационный центр "Фабула", 2015. - С. 266-270.

115. Филиппов, В.А. Магнитожидкостная сепарация и вторичная переработка электронного лома. // Материалы Международной (XX Всероссийской) научно-технической конференции "Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии" (Бенардосовские чтения). - Иваново, 2019. Т. 3. - С. 210-212

116. Филиппов, В.А. Применение магнитных жидкостей для разделения немагнитных частиц / Филиппов В.А., Страдомский Ю.И. // РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА: Пятнадцатая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл. В 3-х т. Т.2. М.: Издательский дом МЭИ, 2009. 480 с. - С.39-40.

117. 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. - Плес. сентябрь 2012. С. 301-306.

118. Филиппов, В.А. Расчет производительности электромагнитного магнитожидкостного сепаратора немагнитных материалов // Вестник ИГЭУ 2020. Вып. 1. - С. 45-52.

119. Электрические аппараты: учебник и практикум / Курбатов П.А., Акимов Е.Г., Годжелло А.Г., Райнин В.Е., Лепанов М.Г., Розанов Ю.К. Под ред. П.А. Курбатова. – М.: Издательство Юрайт, 2017. – 250 с.

120. Жерновой, А. И. Определение намагниченности магнитной жидкости по различию частот ядерного магнитного резонанса протонов при двух ориентациях цилиндрического датчика // Научное приборостроение, 2020, том 30, № 1, С. 62–67

121. Власов, А.М. Влияние конструктивных и режимных параметров на эксплуатационные показатели магнитожидкостных герметизаторов валов электродвигателей / Власов А.М., Казаков Ю.Б., Полетаев В.А. // Вестник ИГЭУ» Вып. 5, 2019. - С.40-47.

122. Кузько, А.Е. Анизотропия проводимости магнитной жидкости в постоянных магнитных полях / Кузько А.Е., Чеканов В.С. // Электронная обработка материалов, 2020, **56**(2). – С. 28–34.

123. Robert Streubel. Perspective: Ferromagnetic Liquids / Robert Streubel, Xubo Liu, XuefeiWu, Thomas P. Russell // Materials — Режим доступа: https://escholarship.org/content/qt77b130r6/qt77b130r6_noSplash_10251ad91744577a5b437ce7367808df.pdf?t=qeu4mx, свободный.

124. Prawet Rangsa. Magnetoviscosity and wettability of magnetic fluids containing magnetite nanocubes / Prawet Rangsa, Chitnarong Sirisathitkul // Jurnal Tribologi 22 (2019). – P. 117-122

ПРИЛОЖЕНИЯ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2464101

МАГНИТОГИДРОСТАТИЧЕСКИЙ СЕПАРАТОР

Патентообладатель(ли): *Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина" (ИГЭУ) (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 201112604

Приоритет изобретения 01 апреля 2011 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 20 октября 2012 г.

Срок действия патента истекает 01 апреля 2031 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2011617292

Моделирование сепарации твердых частиц
из концентрированной суспензии

Правообладатель(ли): *Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина» (ИГЭУ) (RU)*

Автор(ы): *Мизонов Вадим Евгеньевич, Казаков Юрий Борисович, Филиппов Василий Александрович, Баранцева Елена Александровна (RU)*

Заявка № 2011615440

Дата поступления 21 июля 2011 г.

Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ

19 сентября 2011 г.



Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам

Б.П. Симонов

DIPLÔME

Ginventions
Geneva

SALON INTERNATIONAL DES INVENTIONS GENÈVE

Après examen, le Jury International a décidé

de remettre à: **KAZAKOV Yuri, STRADOMSKY Yuri, FILIPOV Vasily**

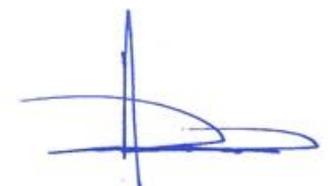
pour l'invention: **Séparateur Magnitogidrostatchesky**



MÉDAILLE D'OR
GOLD MEDAL
GOLDMEDAILLE

Genève, le 12 avril 2013


Le Président du Jury: David Tajj


Le Président du Salon: Jean-Luc Vincent

**Открытое акционерное общество
«Вторцветмет»**

153005, г. Иваново, ул. 5-я Сахалинская, 15
ИНН 3730003962 КПП 370201001 тел.37-85-84
р/сч 40702810907000000766 Ивановский филиал ОАО КБ «Севергазбанк» г. Иваново
БИК 042406773 к/сч 30101810100000000773

«УТВЕРЖДАЮ»
Генеральный директор
ОАО «Вторцветмет»
Серебряков Алексей Геннадьевич
«18» декабря 2018г



Акт внедрения

Настоящим подтверждаем, что результаты диссертационной работы Филиппова В.А. по разработке, исследованию, усовершенствованию электромагнитного магнитожидкостного сепаратора немагнитных материалов, повышению эффективности сепарации для многокомпонентных смесей с повышенной точностью разделения материалов внедрены в практику разработок ОАО «Вторцветмет».

Наиболее значимыми для нас являются:

- разработанные математические модели электромагнитного магнитожидкостного сепаратора и основных физических процессов, происходящих в нем;
- результаты математического и физического исследования процессов в электромагнитном магнитожидкостном сепараторе;
- рекомендации для разработки электромагнитного магнитожидкостного сепаратора;
- усовершенствованная конструкция электромагнитного магнитожидкостного сепаратора.

Ответственный за внедрение,
Генеральный директор
ОАО «Вторцветмет»



Серебряков А.Г.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2019616505

«Расчет траекторий немагнитных частиц в зоне разделения
магнитожидкостного сепаратора»

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования «Ивановский
государственный энергетический университет имени В.И.
Ленина» (ИГЭУ) (RU)*

Автор: *Филиппов Василий Александрович (RU)*

Заявка № 2019615527

Дата поступления 15 мая 2019 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 23 мая 2019 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

 Г.П. Ильев





«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по учебной работе ИГЭУ

Гусенков А.В.

02 _____ 2020 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Филиппова В.А.
в учебный процесс Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования «Ивановский
государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» (ИГЭУ)

Удостоверяем, что результаты диссертационной работы Филиппова
Василия Александровича «Совершенствование эффективности
электромагнитных магнитожидкостных сепараторов немагнитных материалов»
используются в материалах занятий со студентами по направлениям подготовки
13.03.02 - «Электроэнергетика и электротехника» (бакалавриат) профиль
«Электромеханика» в дисциплине «Электромеханические магнитожидкостные
устройства».

Заведующий кафедрой Электромеханики
д.т.н. профессор

Казаков Ю.Б.

К.т.н., доцент кафедры Электромеханики

Страдомский Ю.И.