

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

*На правах рукописи*



**ШИРИН Андрей Александрович**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ  
ШЛАМОВЫХ ОТХОДОВ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ  
ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ**

Специальность: 2.5.5. Технология и оборудование механической  
и физико-технической обработки

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Научный руководитель**  
кандидат технических наук,  
профессор  
Лебедев Валерий Александрович

Ростов-на-Дону – 2023

## Оглавление

Введение.....	5
Глава 1. ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ МЕТАЛЛОПРОИЗВОДСТВА.....	10
1.1. Анализ методов переработки шламовых отходов.....	10
1.2. Предпосылки применения вращающегося электромагнитного поля для переработки шламовых металлоотходов.....	16
1.2.1. Технологическая сущность магнитовибрирования в электромагнитном поле.....	16
1.2.2. Вращающееся электромагнитное поле.....	20
Глава 2. МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ ШЛАМОВЫХ ОТХОДОВ В УСТРОЙСТВАХ С ВРАЩАЮЩИМСЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ.....	23
2.1. Ферромагнитные свойства шламовых конгломератов, поступающих на операцию разрушения и измельчения.....	23
2.2. Кинетика шламовых частиц во вращающемся электромагнитном поле и оценка их энергетического состояния.....	25
2.2.1. Формирование магнитовибрирующего слоя.....	25
2.2.2. Энергетическое состояние конгломератов и ферромагнитных агрегатов во вращающемся электромагнитном поле.....	31
2.3. Моделирование взаимодействия конгломератов в магнитовибрирующем слое и их разрушение.....	33
2.3.1. Модель разрушения конгломератов на составляющие их компоненты.....	33
2.3.2. Модель измельчения ферромагнитных агрегатов в магнитовибрирующем слое.....	36
2.3.3. Управление процессом измельчения ферромагнитных частиц шламовых отходов во вращающемся электромагнитном поле.....	41

Глава 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЛИЯНИЯ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА РАЗРУШЕНИЕ И ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ ШЛАМОВЫХ ОТХОДОВ.....	44
3.1. Технологическое оборудование, реализующее вращающееся электромагнитное поле.....	45
3.2. Образцы шламовых отходов и их анализ.....	46
3.3. Исследование влияния вращающегося электромагнитного поля на энергетическое состояние магнитовибрирующего слоя.....	51
3.3.1. Индукционная ЭДС как показатель оценки магнитных свойств вращающегося электромагнитного поля.....	51
3.3.2. Влияние пространственной ориентации магнитного поля ферромагнитного агрегата во вращающемся электромагнитном поле на величину индукционной ЭДС.....	59
3.3.3. Исследование влияния вращающегося электромагнитного поля на физические параметры магнитовибрирующего слоя шлама	68
3.4. Исследование процесса разделения конгломератов шламовых отходов на магнитную и немагнитные компоненты.....	71
3.4.1. Методика экспериментальных исследований.....	71
3.4.2. Результаты экспериментальных исследований.....	74
3.5. Исследование процесса измельчения ферромагнитных агрегатов шламовых отходов.....	80
3.5.1. Методика экспериментальных исследований.....	80
3.5.2. Результаты экспериментальных исследований.....	85
Глава 4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПЕРЕРАБОТКИ ШЛАМОВЫХ ОТХОДОВ ШЛИФОВАЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ.....	95
4.1. Технология и средства подготовки шламового сырья для разделения входящих в него основных компонент.....	95

4.1.1. Очистка шлама от технологической жидкости.....	95
4.1.2. Сушка шлама, очищенного от технологической жидкости....	99
4.2. Технологический комплекс разделения шламовых отходов на компоненты с применением устройств с вращающимся электромагнитным полем.....	100
4.3. Организация переработки шламовых отходов.....	104
Глава 5. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРАКТИЧЕСКОМУ ПРИМЕНЕНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	107
5.1. Технологические рекомендации по реализации процесса переработки шламовых отходов в устройствах с вращающимся электромагнитным полем.....	107
5.2. Выбор технических характеристик устройств с вращающимся электромагнитным полем.....	108
5.3. Техничко-экономическая оценка эффективности применения предложенного комплекса для переработки шламовых отходов.....	111
5.4. Основные направления использования сырья переработки шламовых отходов и перспективы дальнейшего развития результатов исследования.....	115
Заключение .....	117
Список литературы.....	119
Приложение А. Справка о внедрении.....	131
Приложение Б. Расчет параметров электромагнитного поля при разрушении конгломератов и измельчении ферромагнитных частиц.....	132
Приложение В. Устройство для очистки шламовых отходов от технологической жидкости.....	134
Приложение Г. Устройство для сушки шламовых отходов.....	137
Приложение Д. Устройство для разрушения, разделения и измельчения шламовых отходов.....	140

## Введение

**Актуальность работы.** На машиностроительных предприятиях во время выполнения шлифовальных операций образуется большое количество отходов в виде шламов, представляющих собой совокупность мелкодисперсных металлических и абразивных частиц, а также технологической жидкости (ТЖ). Для того чтобы получить из отходов шлифовального производства вторичное сырье требуемого гранулометрического состава, которое могло бы эффективно использоваться в порошковой металлургии, литейном и инструментальном производстве, необходимо реализовать выполнение ряда последовательных технологических этапов по их переработке: отделению ТЖ, сушку, разделение отходов на составляющие компоненты с последующим измельчением. Большой вклад в решение этой задачи внесли российские научные школы НПО «ЦНИИТМАШ», ДГТУ, ЮРГПУ, КубГАУ, ВЛГТУ, а также школы стран Англии, Беларусь, Латвии.

Анализ существующих технологий и механических устройств, предназначенных для выполнения наиболее ответственных за качество перерабатываемого сырья этапов, связанных с разрушением и измельчением конгломератов шламов, свидетельствует, с одной стороны, о сложности этой проблемы, что привело к их многообразию, а с другой стороны, показывает, что эффективного решения этой проблемы на сегодняшний день нет. В качестве основных факторов, сдерживающих их применение и внедрение в отечественную практику, можно выделить следующие:

- налипание на частицы металлического компонента шлама неметаллических мелкодисперсных частиц, что снижает качество и эксплуатационные свойства получаемого продукта;
- высокую энергоёмкость и материалоёмкость конструкций;
- сложность управления процессом переработки шламовых отходов для получения продуктов с наименьшими гранулометрическими характеристиками и соответствующим исходному сырью качеством;
- высокую степень износа металлических средств измельчения.

Достижения в области магнетизма позволяют путем использования устройств с вращающимся электромагнитным полем на качественно новом уровне подойти к решению проблемы, связанной с разрушением и измельчением шламовых отходов. Вышеизложенные аспекты и особенности переработки шламовых отходов металлопроизводства обуславливают актуальность настоящего исследования.

Работа выполнялась в рамках фундаментальных исследований гранта РФФИ № 20-38-90006 «Разработка физико-технологических основ разделения магнитной и немагнитной компонент шламовых отходов металлопроизводства с применением электромагнитного поля».

**Целью работы** является разработка эффективного способа разрушения и измельчения конгломератов шламов во вращающемся электромагнитном поле, выработка практических рекомендаций по его реализации в технологии переработки шламовых отходов шлифовального производства.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Обосновать параметры, обеспечивающие формирование во вращающемся электромагнитном поле магнитовибрирующего слоя шламовых частиц, и расчетные зависимости, позволяющие определить их энергетическое состояние.
2. Разработать модель механизма разрушения и измельчения конгломератов шлама во вращающемся электромагнитном поле.
3. Разработать методику и средства контроля энергетического состояния и гранулометрических характеристик перерабатываемой среды.
4. Исследовать закономерности влияния режимов электромагнитного поля на характер движения конгломератов во вращающемся электромагнитном поле и производительность процесса.
5. Установить расчетные зависимости управляющих воздействий, позволяющих осуществить выбор характеристик магнитовибрирующего слоя, в котором обеспечивается получение ферромагнитных материалов заданного гранулометрического состава, и экспериментально подтвердить их адекватность.

6. Разработать рекомендации по конструкторско-технологическому обеспечению и организации переработки шламовых отходов шлифовального производства с применением устройств с вращающимся электромагнитным полем.

**Объектом исследования** является технология переработки шламовых отходов.

**Предметом исследования** является процесс разрушения конгломератов и измельчения ферромагнитных частиц шламовых отходов в условиях вращающегося электромагнитного поля.

**Положения, выносимые на защиту:** кинетические особенности магнито-вибрирующего слоя, формируемого из шламовых частиц в устройствах с вращающимся электромагнитным полем, и расчетные зависимости, позволяющие оценить энергетическое состояние частиц; модель, раскрывающая механизм и условия разрушения конгломератов и измельчения ферромагнитных частиц шлама в электромагнитном поле; расчетные методы выбора параметров управляющих воздействий, обеспечивающих получение ферромагнитных материалов заданного гранулометрического состава; экспериментальные исследования эффективности процессов разрушения конгломератов и измельчения ферромагнитных частиц шлама в устройствах с вращающимся электромагнитным полем; рекомендации по конструкторско-технологическому обеспечению переработки шламовых отходов шлифовального производства с применением электромагнитных устройств.

**Научная новизна** проведенных исследований заключается:

– в разработке наиболее эффективного способа разрушения и измельчения конгломератов шламов в условиях вращающегося электромагнитного поля, в котором, в отличие от существующих способов, разрушение и измельчение происходит за счёт их взаимного ударно-импульсного соударения (п. 5, 7 паспорта научной специальности 2.5.5);

– установлении взаимосвязи между механическими и магнитными характеристиками ферромагнитных материалов и управляющими воздействиями вращающегося электромагнитного поля, необходимыми для разделения магнитной и немагнитной компонент шлама и получения дисперсной среды требуемой степени измельчения (п. 2, 3 паспорта научной специальности 2.5.5).

**Теоретическая значимость.** Установлены расчетные зависимости, позволяющие обосновать: энергетическое состояние шламовых частиц в устройствах с вращающимся электромагнитным полем; пороговые значения индукции магнитного поля, обеспечивающие разрушение и измельчение конгломератов шламовых отходов и являющиеся исходной предпосылкой для выбора характеристик устройств реализации этих процессов переработки.

**Практическая значимость.** Разработаны технологические рекомендации и конструкторско-технологические решения технических средств, а также технология по реализации основных этапов переработки шламовых отходов шлифовального производства с применением электромагнитного поля.

**Методы исследования и достоверность результатов.** Теоретические исследования выполнены на базе научных основ теории электромагнетизма, прочности и разрушения твердых тел. Экспериментальные исследования проведены в лабораторных условиях НИИ «Вибротехнология», НОЦ «Материалы» ДГТУ с использованием: опытно-экспериментальной установки, обеспечивающей обработку образцов шламовых отходов во вращающемся электромагнитном поле; современных средств спектрального и гранулометрического анализа образцов; специальных устройств измерения индукции магнитного поля; с применением методов математической статистики обработки результатов.

Достоверность результатов обеспечена обоснованным изучением объема научной литературы, использованием современных средств и методик проведения исследований и подтверждается согласованностью теоретических выводов с результатами их реальной экспериментальной проверки.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях и симпозиумах, в числе которых: научная конференция «Перспективные направления развития отделочно-упрочняющей обработки и виброволновых технологий» (г. Ростов-на-Дону, 2019–2020 гг.); научно-техническая конференция «Жизненный цикл конструкционных материалов» (г. Иркутск, 2019 г.); научный симпозиум технологов-машиностроителей «Фундаментальные основы физики, химии и динамики науко-



ёмких технологических систем формообразования и сборки изделий» (г. Ростов-на-Дону, 2019–2020 гг.); научный семинар технологов-машиностроителей «Перспективные направления развития финишных и виброволновых технологий» (г. Ростов-на-Дону, 2021 г.); научная конференция «Intelligent Manufacturing and Materials 2021» (г. Ялта, 2021 г.); XVII международная научно-техническая конференция «Динамика технических систем “ДТС-2021”» (г. Ростов-на-Дону, 2021 г.); научно-техническая конференция «Современные тенденции развития инструментальных систем и металлообрабатывающих комплексов» (г. Ростов-на-Дону, 2021 г.); научный симпозиум технологов-машиностроителей «Фундаментальные основы физики, химии и механики наукоемких технологических систем формообразования и сборки изделий» (п. Дивноморское, 2022 г.); Международная научно-техническая конференция «Машиностроительные технологические системы (METS2022)» (г. Азов, 2022 г.).

**Публикации.** По материалам диссертационной работы опубликовано 16 научных работ, в том числе 6 статей в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 1 статья в базе данных Scopus.

**Личный вклад автора.** Предложен способ и технические средства для переработки шламовых отходов, реализована методика моделирования процесса разрушения и измельчения шламовых отходов во вращающемся электромагнитном поле, проведены экспериментальные исследования, обработка и интерпретация полученных результатов, сформулированы основные результаты в виде публикаций, научных докладов и рукописи диссертации.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и общих выводов, библиографического списка, включающего 114 источников. Работа изложена на 143 страницах, содержит 61 рисунок, 27 таблиц, 5 приложений.

# **Глава 1. ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕРАБОТКИ ШЛАМОВЫХ ОТХОДОВ МЕТАЛЛОПРОИЗВОДСТВА**

## **1.1. Анализ методов переработки шламовых отходов**

Из общей массы шламовых отходов металлообрабатывающего производства наибольший процент (83–85 %) составляют шлифовальные, полученные при обработке сталей [34]. Так как количество этих отходов велико и по прогнозным данным будет возрастать, использование их в качестве вторичного сырья для различных отраслей промышленности является важной народно-хозяйственной задачей.

Состав и свойства шламов в значительной степени зависят от технологических режимов механической обработки и применяемых технологических жидкостей. Наибольшее распространение в практике металлообработки получили эмульсионные ТЖ и растворы поверхностно-активных веществ (ПАВ) с различными функциональными добавками. Основными компонентами шламов являются окисленные и наклепанные металлические частицы, абразивные включения, а также масла или нефтепродукты, используемые при шлифовании. В этой связи они не могут использоваться в качестве вторичного сырья без предварительной переработки [1; 54].

Наиболее ценной для последующей переработки шламов и использования его в качестве вторичного сырья является их твердая фаза. Получение из таких отходов кондиционного порошка, как металлического, так и абразива, представляет собой специфический процесс. Следует отметить, что этой проблеме, особенно в последнее 20-летие, уделялось недостаточное внимание, о чем свидетельствует отсутствие в научно-технической литературе публикаций по этой тематике [8; 12; 18]. Всё это определяет актуальность исследований по разработке и совершенствованию технологии переработки некондиционного сырья в виде шламовых отходов.

Первый технологический процесс получения стальных порошков из отходов металлообработки был предложен в 1951 г. [63]. Он предусматривал: сушку отходов при 110–120 °С без защитной атмосферы; прокаливание в атмосфере дис-

социированного аммиака при 500 °С в течение 1–2 ч; введение в порошок твердых раскислителей – сажи, кокса или графита; восстановительный отжиг шихты в диссоциированном аммиаке при 1 050 °С в течение 1,5–2 ч. После отжига образующую губку размалывали, а полученный порошок просеивали. Эта технология, как показали исследования, была эффективна при переработке отходов с размером частиц было 0,075 мм и позволяла в определенной степени упростить восстановительный отжиг и получать порошок с приемлемым уровнем свойств, в частности по насыпной плотности.

Дальнейшие исследования в этом направлении, проведенные отечественными и зарубежными учёными, привели к созданию ряда других технологий. Так, в ЗАО «НПО НИИТракторосельхозмаш» разработан технологический процесс переработки опилочного шлама стали ШХ15 в стальной порошок [78]. Исходные сильно окисленные стальные частицы имели размерность менее 50 мкм. Технология предусматривала удаление из отходов влаги, их обкатку, проведение восстановительного отжига и укрупнение (гранулирование). Частицы готового порошка имели крупность 0,250 мм и по своему химическому составу соответствовали стали ШХ15.

В работе [14] описан способ получения порошков из шламов, включающий операции механического отделения жидкой составляющей шлама путем отжатия ее двумя вращающимися в противоположных направлениях цилиндрическими валками. Шлам подают к отжимным валкам транспортерной лентой. После отжима остаток масла удаляют растворителем, а твердую составляющую отжигают в печи в восстановительной атмосфере. Полученную губку измельчают, металлическую фракцию отделяют от абразива магнитной сепарацией. При таком способе трудно получить материал, свободный от неметаллических включений, так как спек при размоле может образовывать конгломераты металлических частиц с абразивными включениями, которые невозможно извлечь магнитной сепарацией.

Другой метод переработки шлифовального шлама – многократная промывка растворителями, содержащими поверхностно-активные вещества, с последующей магнитной сепарацией – предложен в работе [28]. Как утверждают авторы, при об-

работке шлама быстрорежущей стали таким образом отделялось 75 % стального порошка, который после этого подвергали отжигу. Метод получения порошка из шлифовального шлама включает пятикратную магнитную сепарацию, восстановление полученного концентрата в среде водорода и размол полученной губки. Готовый порошок состоит из частиц осколочной формы размером 0,1–0,05 мм, имеет низкую насыпную плотность 1,3–1,5 г/см<sup>3</sup>, что и является недостатком данной технологии.

Краткий обзор приведённых в научно-технической литературе технологий переработки шламов [2–5; 27; 40; 41; 43; 44; 47; 48; 63; 75; 80; 83] позволяет представить обобщенную технологическую схему переработки шламовых отходов шлифовального производства для получения вторичного сырья, предусматривающую, как показано на рисунке 1.1, выполнение ряда последовательных этапов: отделение ТЖ, сушку, разрушение конгломератов, измельчение и разделение твёрдых частиц шлама.



Рисунок 1.1. Общая технологическая схема переработки шламовых отходов

По физико-химической сущности выполняемых этапов в рамках обобщенной технологической схемы переработки их подразделяют на два самостоятельных цикла. Первый цикл, предусматривающий очистку от ТЖ и сушку шламов,

реализуется путем термохимического воздействия на шламовые отходы и является подготовительным. Второй цикл, предусматривающий разрушение и измельчение конгломератов шлама, как свидетельствует проведенный анализ, реализуется путем механического воздействия на частицы шлама и является заключительным, определяющим их гранулометрический размер.

О трудоёмкости и специфике термохимических операций подготовительного цикла по очистке шлама от технологической жидкости свидетельствует тот факт, что в настоящее время ни один из применяемых в отечественной и зарубежной практике методов не отвечает полностью всем требованиям технологии подготовки исходного материала для дальнейшего возврата в производство, техники безопасности, не соответствует необходимому уровню экологичности и экономичности. Решением проблемы, как отмечается в работах [6; 7; 21; 30; 31; 34; 35], является создание комплексных участков и установок по подготовке шламов к последующей его переработке. На этих участках должно осуществляться его дробление, центрифугирование, отмывка от грязи и масел, сушка. Такая технология позволяет сохранить для повторного использования большую часть ТЖ, уменьшить токсичные выбросы в атмосферу, обеспечить высокое качество металлической составляющей шлама как исходного сырья для переработки в порошок. Относительно высокие капитальные затраты на строительство таких участков должны компенсироваться высоким качеством готовой продукции и возможностью утилизации ТЖ и масел [61; 64].

Не менее важным циклом технологической переработки шламов являются этапы, которые обеспечивают качество вторичного сырья, к ним относятся:

- разделение конгломератов на металлические и неметаллические компоненты;
- измельчение частиц компонентов для получения вторичного сырья требуемого гранулометрического состава.

В таблице 1.1 приведен обзор технических средств, разработанных и применяемых на практике для разрушения и измельчения металлических отходов металлопроизводства.

Технические средства для переработки и их сущность

Виды устройств	Сущность и технологические возможности	Источник
1	2	3
Барабанные мельницы	Измельчение осуществляется ударами мелющих тел, а также истиранием	[43]
Щековые, молотковые, валковые и конусные дробилки и бегуны	Получают частицы размером 1–10 мм	[102]
Шаровые вибрационные мельницы	Размольные тела и измельчаемый материал получают импульсы от стенок вибрирующего корпуса мельницы и совершают сложное движение	[15]
Аттриторные устройства	Размольные тела находятся в вертикально расположенном неподвижном барабане, внутри которого со скоростью $\geq 100 \text{ мин}^{-1}$ вращается вертикальная лопастная мешалка. Лопасты обеспечивают циркуляцию размольных тел и истирание измельчаемого материала. Используются для получения порошков методом механического легирования	[98]
Планетарная центробежная мельница	Измельчение материала происходит размольными телами, располагающимися в виде сегмента и движущимися вместе с барабаном	[59]
Струйные, струйно-вихревые устройства	Не содержат размольных тел; измельчение материала обеспечивается за счет энергии, сообщаемой его частицам струями сжатого газа или перегретого пара; измельчаемый материал в камере находится в псевдооживленном слое	[100]
Вихревые мельницы	Измельчение осуществляют пропеллеры или била, расположенные в рабочей камере и вращающиеся в противоположных направлениях при высоких (около 3 000 об/мин) скоростях	[11; 112]

1	2	3
Ультразвуковые устройства	При измельчении ультразвуком высокочастотные волны воздействуют на суспензию порошка в жидкости; распространяющиеся упругие колебания создают области избыточного давления и разрывы сплошности жидкости – кавитационные пузырьки; склёпываясь, эти пузырьки образуют ударные волны, достаточные для преодоления прочности твердых материалов	[17]
Ударно-центробежные мельницы периодического действия	Материал измельчается механической обработкой в динамическом режиме, реализующем область взвешенного слоя, в котором частицы совершают спиралеобразное движение, создаваемое восходящим потоком воздуха и тангенциальным действием вращающихся бил	[84]
Ударно-центробежные мельницы непрерывного действия	Измельчаемый материал подается питателем на распределительную сетку и псевдооживается потоком воздуха, материал из взвешенного слоя, подхваченный восходящим потоком воздуха, измельчается за счет ударного механического воздействия стержней и лопастей, закрепленных на вращающемся валу	[89]

Приведённый обзор разработанных устройств свидетельствует, с одной стороны, о сложности проблемы, связанной с разрушением конгломератов шламов и измельчением его твёрдых компонентов, что привело к их многообразию, а с другой – о том, что эффективного решения этой проблемы нет. В качестве основных факторов, сдерживающих их применение и внедрение в отечественную практику, можно выделить следующие:

- налипание на частицы металлического компонента шлама неметаллических мелкодисперсных частиц, что снижает качество и эксплуатационные свойства получаемого продукта, а также значительное натирание на частицы измельчаемого материала примесей со стенок рабочих органов мельниц и размольных тел;
- высокую энергоёмкость и материалоемкость конструкций, исключаяющих их подвижность и требующих стационарной установки на предприятии, что делает

их нерентабельными при эксплуатации; кроме того, наличие механически движущихся элементов в конструкции увеличивает энергозатраты и снижает срок службы. Именно по этой причине развитие техники ударного разрушения и измельчения сдерживается двумя требованиями, принципиально противоречащими друг другу:

- с одной стороны, необходимо обеспечить большую скорость удара для лучших результатов измельчения, а с другой стороны, следует учесть, что вместе с ростом скоростей рабочих органов увеличивается их износ и снижается надёжность;

- очень большие потери продуктов переработки, обусловленные налипанием частиц шлама на поверхности рабочих органов устройств, реализующих процесс разрушения и измельчения в результате их ударно-импульсного контактного взаимодействия;

- сложность управления процессом переработки шламовых отходов для получения продуктов с наименьшими гранулометрическими характеристиками и соответствующим исходному сырью качеством;

- сложность конструкции, высокую степень износа металлических средств измельчения.

## **1.2. Предпосылки применения вращающегося электромагнитного поля для переработки шламовых отходов**

### **1.2.1. Технологическая сущность магнитовибрирования в электромагнитном поле**

Достижения в области магнетизма позволяют на качественно новом уровне подойти к решению проблем, связанных с разрушением и измельчением шламовых отходов.

Как показано в исследованиях М.К. Болога, С.В. Сюткина, В.В. Тетюхина, Ю.М. Барона, Ю.М. Вернигорова, С.И. Егоровой, Д.Д. Логвиненко, В.А. Лебедева, А.А. Кочубея, Д.М. Плотникова, Н.В. Лимаренко и др. [14; 22–24; 26; 32; 37; 50-52; 55; 57; 60; 70-74; 76; 79; 81; 88; 102; 105; 111; 113; 114], частицы магнитных материа-



лов под воздействием электромагнитного поля приходят в сложное, хаотичное движение, образуя магнитовибрирующий слой (МВС), который, как показано в работах [26; 38; 88], позволяет эффективно решать большой комплекс технологических задач.

– Основными параметрами МВС, определяющими кинетику дисперсной среды и, как следствие, технологический эффект его воздействия, как установлено в работах [77; 106–107], являются следующие:

– индукция магнитного поля, при которой дисперсная система малой массы переходит в магнитовибрирующее состояние;

– средняя скорость поступательного движения частиц в состоянии развитого магнитовибрирования, зависящая от режимных и физических параметров системы, свойств ферромагнитного материала, топологии поля;

– удельная мощность, затрачиваемая на магнитовибрирование единицы массы дисперсной системы;

– порозность, являющаяся функцией индукции и частоты электромагнитного поля, числа Рейнольдса, а также отношения объемов слоя и твердой фазы.

Универсальность этих параметров магнитовибрационного слоя обусловлена их взаимосвязанностью с индукцией магнитного поля.

В работе [19] теоретически исследовано и экспериментально подтверждено, что закачка энергии в дисперсную систему в однородном поле происходит на одну вращательную степень свободы частицы. В результате столкновений частицы обмениваются между собой энергиями как вращательного, так и поступательного движений. Но в силу того, что магнитное поле возбуждает только вращательные степени свободы частиц, а поступательное движение приобретает в результате столкновений и взаимного диполь-дипольного взаимодействия, вопрос об эффективности превращения энергии вращательного движения частиц в поступательное должен играть центральное место в построении теории МВС. В конечном итоге рассматриваемый вопрос сводится к анализу эффективности превращения энергии электромагнитного поля в энергию движения частиц. Обмен энергией между вращательными и поступательными движениями частиц МВС определяется из решения задачи о столкновении двух вращающихся намагниченных шаров и определения сумматорных инвариантов столкновения, что представляется достаточно сложным.

В работах [20; 42] установлено два предельных типа движения частиц в магнитовибрирующем слое. Первый, характерный для малых концентраций, соответствует беспорядку газообразного типа при малых концентрациях, когда кинетическая энергия частиц намного превышает энергию их взаимодействия и устанавливается состояние, аналогичное состоянию молекулярного хаоса. Второй тип движения представляет собой беспорядок жидкостного типа со следами квазикристаллической упорядоченности, при котором энергия взаимодействия частиц сравнима с их собственной энергией. Для такого состояния характерно образование кластеров из нескольких частиц со сравнительно малым временем жизни –  $10^{-3}$ – $10^{-2}$  с [22]. Кроме этих типов движения частиц установлено также перемещение частиц в составе случайно блуждающих кластеров. В работе [51] отмечается очень важный аспект, связанный с движением частиц в МВС, заключающийся в том, что, несмотря на наличие хаоса в поступательном движении частиц, при определённых условиях для них характерна определенная упорядоченность в ориентации магнитных диполей в переменном поле, т. е. преимущественная часть диполей ориентируется вдоль направления поля. Этот эффект выражен особенно сильно при максимальных значениях индукции. Степень упорядоченности слабо зависит от частоты и концентрации частиц в слое.

На рисунке 1.2 представлено одно из первых технологических устройств, в котором для разделения магнитной и немагнитной фракции шламовых отходов использован магнитовибрирующий слой, создаваемый под воздействием сочетания постоянного и переменного магнитного поля [34]. Устройство представляет собой камеру, помещенную между полюсами пермеаметра (электромагнит переменного поля) и группой электромагнитов постоянного поля. Силовые линии полей пермеаметра 2 и магнитов постоянного поля 4 взаимно перпендикулярны. Через камеру 3 проходит конвейерная лента 6, на которой оседает отделившийся абразив. Электромагниты постоянного поля работают циклично для перемещения порции псевдокипящей магнитной фракции вдоль камеры к выпускной горловине 7.

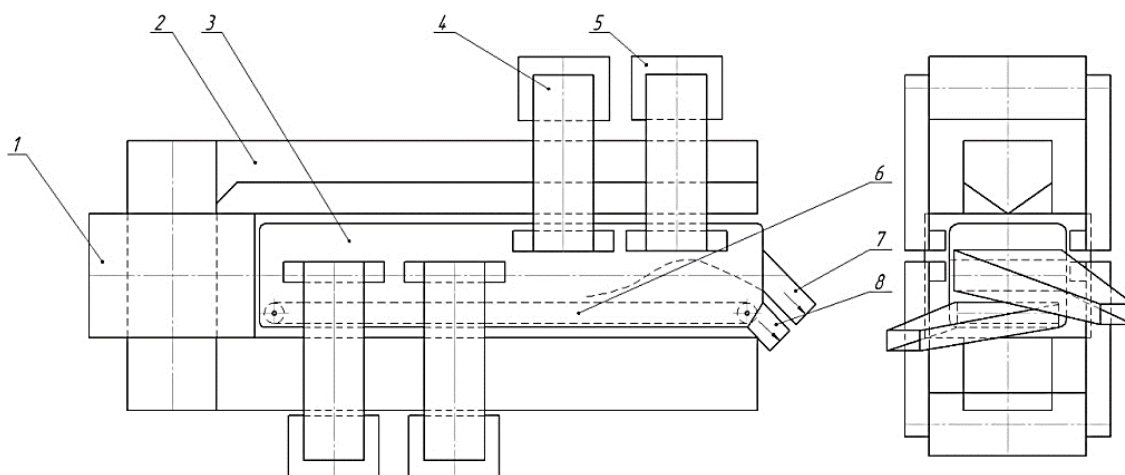


Рисунок 1.2. Камера разделения магнитной и немагнитной фракции шлама:  
 1 – загрузочная горловина; 2 – пермеаметр; 3 – камера; 4, 5 – постоянные магниты;  
 6 – конвейерная лента; 7, 8 – выпускная горловина

При попадании шлама в камеру 3 за счет действия сил притяжения, наведенного в камере электромагнитного поля постоянного магнита, происходит его притягивание в область, где создается магнитовибрирующий слой, в результате чего происходит процесс интенсивного псевдокипения шлама, при котором происходит осыпание на дно камеры абразива, удаляемого транспортной лентой на выгрузку.

В работе [50] предложена конструкция бильной мельницы (рисунок 1.3 и 1.4), которая позволяет за счет наложения на неё магнитного поля значительно интенсифицировать процессы разрушения и измельчения твердых частиц.

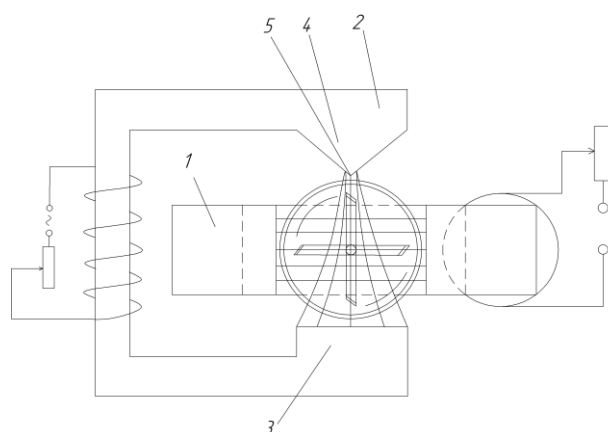


Рисунок 1.3. Схема магнитовибрационной бильной мельницы:  
 1, 2 – полюса электромагнитов; 3, 4 – поверхность полюсных наконечников;  
 5 – полюсной наконечник

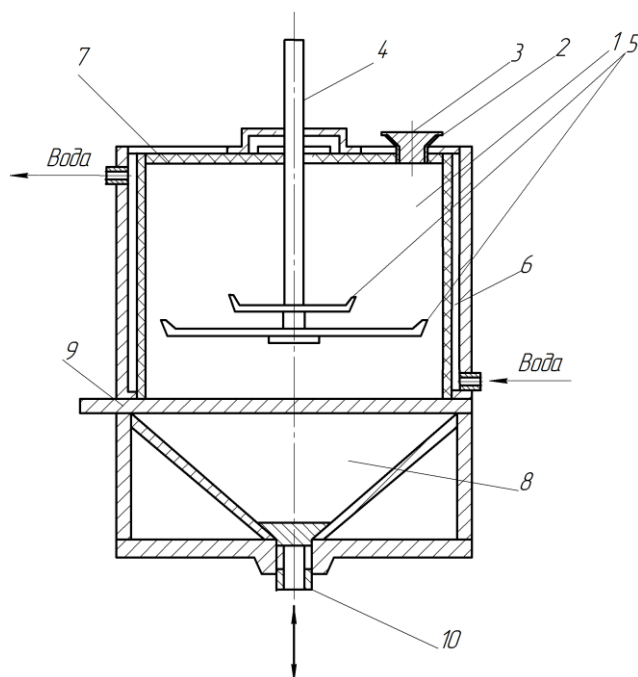


Рисунок 1.4. Рабочая камера магнитовибрационной бильной мельницы:

1 – рабочая камера; 2 – приемное отверстие; 3 – затвор; 4 – вал; 5 – била; 6 – охлаждающая рубашка; 7 – корпус; 8 – накопитель; 9 – задвижка; 10 – отверстие для выгрузки

### 1.2.2. Вращающееся электромагнитное поле

Для создания вращающегося электромагнитного поля (ВЭМП) необходимо, чтобы оси катушек были сдвинуты в пространстве относительно друг друга на определенный угол (для двухфазной системы –  $90^\circ$ , для трехфазной –  $120^\circ$ ) (рисунок 1.5 и 1.6). Кроме того, токи, питающие катушки, должны быть сдвинуты по фазе соответственно пространственному смещению катушек [9; 29; 65–69].

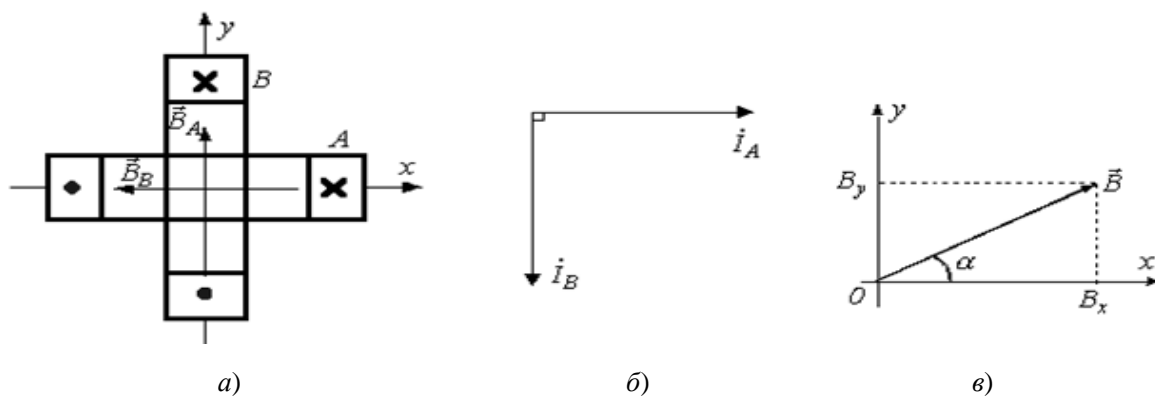


Рисунок 1.5. Двухфазная система катушек (Тесла) (а), векторная диаграмма полей (б) и проекция вектора магнитной индукции на декартовую систему координат (в)

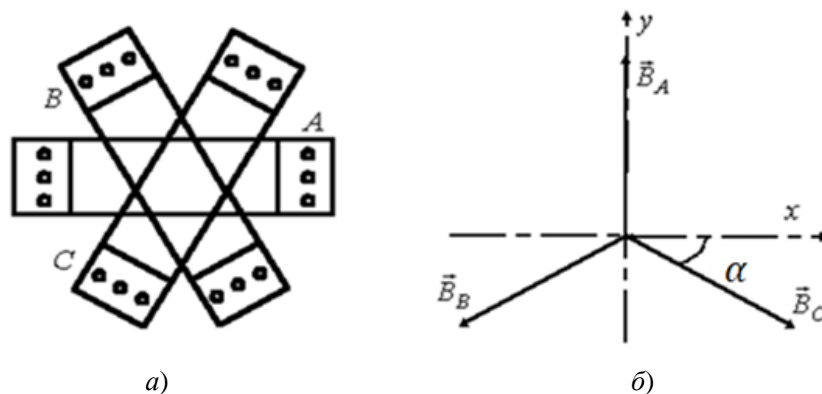


Рисунок 1.6. Симметричная трехфазная система катушек (а) и векторная диаграмма полей (б)

В работах [79; 85; 95; 96, 109] показано, что симметричная трехфазная система катушек (рисунок 1.6, а) позволяет получить круговое вращающееся магнитное поле, модуль вектора магнитной индукции которого равен

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} = \frac{3}{2} B_m = const, \quad (1.1)$$

где  $B_x = \frac{3}{2} B_m \cos \omega t$ ;  $B_y = \frac{3}{2} B_m \sin \omega t$ .

Вектор  $\vec{B}$  составляет с осью  $x$  угол  $\alpha$ , для которого  $\alpha = \omega t$ .

Представленные зависимости показывают, что результирующий вектор магнитного поля неизменен по модулю и вращается в пространстве с постоянной угловой частотой  $\omega$ , описывая окружность, что и характеризует вращающееся магнитное поле.

На рисунке 1.7 представлена принципиальная схема устройства, реализующего вращающееся электромагнитное поле [34], основным элементом которого является индуктор 2, обеспечивающий управляющее воздействие на технологические процессы, выполняемые в рабочей зоне устройства 3.

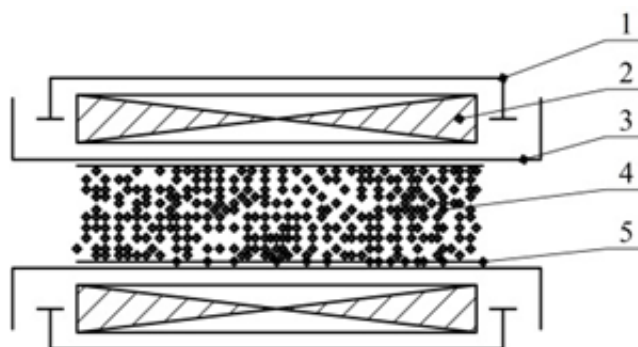


Рисунок 1.7. Схема устройства с вращающимся электромагнитным полем:  
 1 – корпус; 2 – индуктор; 3 – рабочее пространство; 4 – ферромагнитные тела;  
 5 – сменная вставка

Основными управляющими параметрами устройств, влияющих на производительность и качество выполняемых в них технологических процессов, являются частота вращения и напряженность электромагнитного поля, создаваемого индуктором, масса загрузки, размеры и магнитные свойства частиц.

В работах [70; 71; 79] установлено, что движение большого количества ферромагнитных неравноосных частиц, помещённых в электромагнитное вращающееся поле, приводит к формированию магнитовибрирующего вращающегося слоя.

Под воздействием вращающегося электромагнитного поля МВС интенсифицируется целый ряд технологических процессов за счет комплексного протекания в рабочей зоне физико-химических эффектов, таких как перемешивание и диспергирование, акустические и электромагнитные явления, трение, высокие локальные давления, электролиз и ударно-импульсные взаимодействия. Магнитовибрирование во вращающемся поле, в отличие от однородного поля, как показано в работах [79; 107], обладает большей интенсивностью поступательного движения. Возникновение во вращающемся поле так называемого циркулярного движения системы как целого приводит к перекачке энергии на три степени свободы вращательного движения частиц, что, естественно, позволяет передать большую энергию поступательным степеням свободы частиц при их взаимодействиях. Наконец, магнитовибрирование во вращающемся электромагнитном поле позволяет передавать энергию сразу на поступательные степени свободы частиц. При этом также работает механизм перекачки энергии поля вращательным степеням свободы частиц.

Использование устройств с вращающимся электромагнитным полем для переработки шламовых отходов шлифовального производства имеет научное и практическое значение. Устройства позволяют практически исключить контактное взаимодействие конгломератов со стенками рабочей камеры, применение других средств для их разрушения и измельчения, вследствие чего снижается материалоемкость технических средств и повышается эффективность процесса разрушения, обеспечивающего разделение магнитной и немагнитной компонентов шлама, а также их разрушение и измельчение.

## Глава 2. МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ ШЛАМОВЫХ ОТХОДОВ В УСТРОЙСТВАХ С ВРАЩАЮЩИМСЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

### 2.1 . Ферромагнитные свойства шламовых конгломератов, поступающих на операцию разрушения и измельчения

После удаления ТЖ, обезжиривания и сушки шлам, подлежащий дальнейшей переработке (разрушению и измельчению) в устройствах с вращающимся электромагнитным поле, представляет собой совокупность гранулированных конгломератов произвольной формы, состоящих, как показал проведённый анализ, из ферромагнитных агрегатов (металлические отходы, составляющие 80–85 %) и агрегатов, не обладающих ферромагнитными свойствами (абразивные отходы) [46]. Ферромагнитные агрегаты, составляющие основу конгломератов, представляют совокупность ферромагнитных частиц разных размеров с высокоразвитой поверхностью, связанных между собой большой силой межчастичного взаимодействия когезионной и магнитной природы (рисунок 2.1).

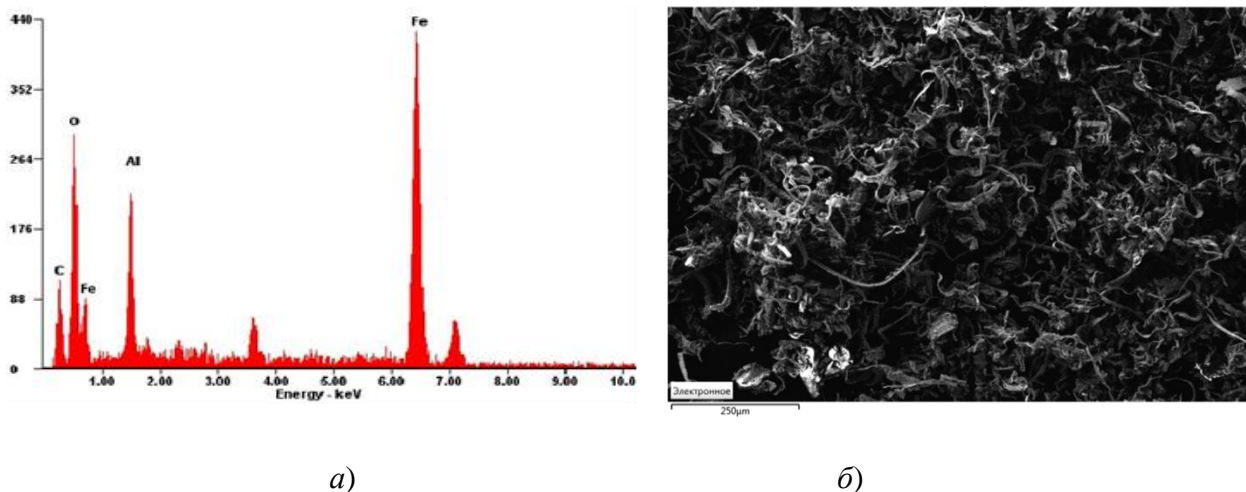


Рисунок 2.1. Спектральный состав шламов после удаления ТЖ:

*a* – спектрограмма элементного распределения составляющих шламов;

*б* – вид конгломератов шламов, полученные на электронном микроскопе при 60х

Как показал спектральный анализ, содержание ферромагнитных агрегатов в исследуемом образце составило 81,5 % от массы исследуемого образца, остальное – агрегаты, не обладающие ферромагнитными свойствами.

Таким образом, конгломераты шламовых отходов можно охарактеризовать как твердое тело, обладающее ферромагнитными свойствами, основными характеристиками которых являются магнитная проницаемость и магнитный момент.

Магнитный момент конгломерата может быть выражен через вектор намагниченности  $\vec{p}'_m$ :

$$\vec{p}_m = \vec{p}'_m V, [A \cdot m^2], \quad (2.1)$$

где  $V$  – объем конгломерата,  $[m^3]$ ;  $p'_m$  – магнитный момент единицы объёма конгломерата (намагниченность) при насыщении равный  $\vec{p}'_m = \vec{H}_1(\mu - 1)$ ,  $[A/m]$ ;  $\mu$  – магнитная проницаемость ферромагнитного материала.

Вектор напряженности магнитного поля  $\vec{H}_1$  внутри конгломерата, в случае, когда конгломерат намагничивается внешним полем напряженностью  $\vec{H}$ , имеет вид

$$\vec{H}_1 = \vec{H} - J\vec{p}'_m, [A/m], \quad (2.2)$$

где  $J$  – коэффициент, учитывающий размагничивающий фактор, зависящий от формы и геометрических размеров конгломерата.

В работе [82] предложена эмпирическая формула для оценки размагничивающего фактора в виде:

$$J = \frac{\frac{\lambda}{\sqrt{\lambda^2 - 1}} \ln(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} - 1)}{\lambda^2 - 1}, \quad (2.3)$$

где  $\lambda$  – коэффициент формы, определяемый как отношение среднестатистического диаметра описываемой окружности конгломерата, характеризующего их гранулометрический размер, к диаметру вписываемой окружности частиц.

Анализ формы и размеров шламовых конгломератов шлифовального производства (см. рисунок 2.1) показал, что они имеют произвольную форму.

Из формулы (2.2) получаем

$$\vec{p}'_m = (\mu - 1)\vec{H} \frac{1}{1 + (\mu - 1)J}, [A \cdot m^2]. \quad (2.4)$$

Магнитный момент конгломерата из (2.1) можно выразить равенством

$$\vec{p}_m = \frac{\mu - 1}{1 + (\mu - 1)J} \vec{H} V, [A \cdot m^2].$$

Представив объем конгломерата  $V = m/\rho_k$ , где  $m$  – масса конгломерата,  $[кг]$ ;



$\rho_k$  – плотность конгломерата,  $[\text{кг}/\text{м}^3]$ , и выразив напряжённость вращающегося электромагнитного поля от его индукции в виде  $\vec{H} = \vec{B}/\mu_0$ , получим формулу для определения магнитного момента конгломератов:

$$p_m = \frac{Bm(\mu-1)}{\rho_k\mu_0(1+(\mu-1)J)}, [\text{А}\cdot\text{м}^2]. \quad (2.6)$$

Для произвольной ферромагнитной частицы конгломерата по аналогии с (2.6) формула для определения магнитного момента  $p_i$  будет иметь вид:

$$p_i = \frac{Bm_i(\mu-1)}{\rho_k\mu_0(1+(\mu-1)J)}, [\text{А}\cdot\text{м}^2], \quad (2.7)$$

где  $m_i$  – масса ферромагнитной частицы конгломерата,  $[\text{кг}]$ .

## 2.2. Кинетика шламовых частиц во вращающемся электромагнитном поле и оценка их энергетического состояния

### 2.2.1. Формирование магнитовибрирующего слоя

Если конгломераты, помещённые в электромагнитное поле, намагничены до насыщения, то их можно рассматривать как элементарные магнитные диполи.

Определим кинетические характеристики конгломератов с массой  $m$  и магнитным моментом  $p_m$ , помещённых в электромагнитное поле с индукцией  $\vec{B} = \vec{B}_v \cos \omega t$  и вращающихся с угловой скоростью  $\omega$  (рисунок 2.2).

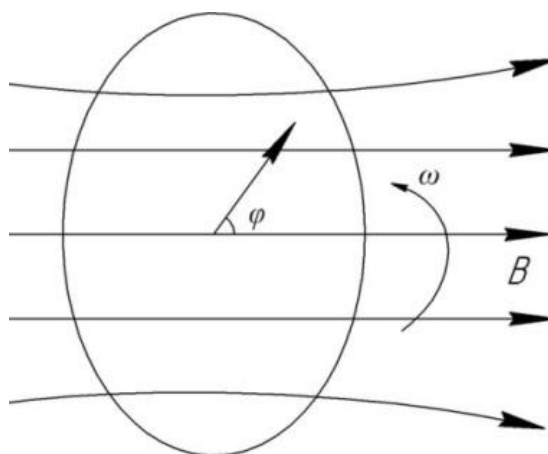


Рисунок 2.2. Ориентация ферромагнитного конгломерата шлама во вращающемся электромагнитном поле

В результате многочисленных научных исследований [16; 24; 33; 56; 88] установлено, что ферромагнитные тела, имеющие произвольную несимметричную форму, под воздействием вращающегося электромагнитного поля совершают сложное движение, которое описывается следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} I\ddot{\varphi} &\approx p_m B_v \cos \omega t \cos \varphi - \lambda \dot{\varphi}; \\ m\ddot{y} &\approx p_m \left( \frac{dB_v}{dy} \right) \cos \omega t \sin \varphi - k\dot{y}, \end{aligned} \quad (2.8)$$

где  $k$  и  $\lambda$  – коэффициенты сопротивления среды поступательному и вращательному движению ферромагнитных тел;  $\varphi$  – угол между  $\vec{B}$  и  $\vec{p}_m$  непосредственно после столкновения конгломератов;  $I$  – момент инерции конгломерата, [кг·м<sup>2</sup>].

В соответствии с формулой (2.8) примем, что первое уравнение определяет колебательно-вращательное движение конгломератов шлама относительно собственной оси инерции, а второе – их колебательно-поступательное движение, обусловленное переносным движением центра масс и контактным ударно-импульсным взаимодействием между собой, при следующих допущениях:

- монодисперсная система конгломерата с магнитным моментом  $p_m = \sum_{i=1}^n p_i$  сформирована адгезионными и магнитостатическими силами ферромагнитных агрегатов с магнитным моментом  $p_i$ ;

- магнитный момент агрегата  $p_i$  связан со структурой конгломерата настолько жестко, что его ориентация в магнитном поле приводит к повороту всего конгломерата;

- диссипация энергии в магнитовибрирующем слое компенсируется подкачкой энергии из магнитного поля;

- приращением  $p_m$  магнитного поля пренебрегаем и считаем магнитный момент конгломерата постоянным;

- повышение индукции магнитного поля приводит к повышению устойчивости конгломерата к внешним воздействиям.

На находящийся во вращающемся электромагнитном поле конгломерат действуют момент, стремящийся повернуть его в направлении внешнего переменного электромагнитного поля, а также смещающая (переносная) сила.

В результате действия этих сил конгломераты осуществляют движение с абсолютной угловой скоростью  $\vec{\omega}_a$ , которая в неподвижной системе координат равна векторной сумме переносной  $\vec{\omega}_e$  и относительной угловой скорости  $\vec{\omega}_r$ :

$$\vec{\omega}_a = \vec{\omega}_e + \vec{\omega}_r. \quad (2.9)$$

Так как векторы переносной и относительной угловой скорости взаимно перпендикулярны, выражение модуля абсолютной угловой скорости можно записать в виде

$$\omega_a = \sqrt{\omega_e^2 + \omega_r^2}. \quad (2.10)$$

Для определения относительной угловой скорости конгломератов в зависимости от энергии, передаваемой от внешнего поля вращательным степеням свободы, запишем первое уравнение (2.8), описывающее его вращение относительно неподвижного вектора магнитной индукции, без учета сопротивления вращательному движению:

$$I\ddot{\varphi} = p_m B \sin\varphi, \quad (2.11)$$

где  $I$  – момент инерции конгломерата, [кг·м<sup>2</sup>];  $\varphi = \varphi_0 + \varphi_1$  – угол между  $\vec{B}$  и  $\vec{p}_m$  непосредственно после столкновения конгломератов;  $\varphi_0$  – угол между векторами  $\vec{B}$  и  $\vec{p}_m$  при  $t = t_0$ .

Выразив индукцию вращательного магнитного поля как  $B = B_v \cos\omega t$ , уравнение (2.11) перепишем в виде

$$I\ddot{\varphi} \approx p_m B_v \cos\omega t \sin\varphi. \quad (2.12)$$

Интегрируя выражение (2.12) по времени, получим

$$\dot{\varphi} = \frac{p_m \sin\varphi_0}{I} \int B_v \cos\omega t \sin\varphi dt. \quad (2.13)$$

Введем следующие обозначения:  $\omega t = x$ ;  $dt = \frac{1}{\omega} dx$ . Тогда формула (2.13) принимает следующий вид:

$$\dot{\varphi} = \frac{p_m \sin\varphi B_v}{I\omega} \int \cos x dx. \quad (2.14)$$

Проинтегрировав и сделав замену переменных в уравнении (2.14), получим выражение для определения относительной угловой скорости вращательного движения конгломератов во вращающемся электромагнитном поле:

$$\omega_r = \dot{\varphi} \cong \frac{p_m B_v}{I\omega} \cdot \sin\varphi \sin\omega t, [c^{-1}]. \quad (2.15)$$

На основе экспериментальных исследований, приведённых в работах [22–24; 33; 58; 86; 93; 94; 101], показано, что с большой степенью корреляции переносная скорость движения конгломератов, инициируемая смещающей (переносной) силой поля  $F_{см}$ , практически равна скорости вращения внешнего магнитного поля. Это позволяет записать, что  $\omega_e \approx \omega$ . Принимая это допущение и учитывая выражение (2.15) величина абсолютной угловой скорости движения конгломератов во вращающемся электромагнитном поле будет равна

$$\omega_a = \sqrt{\omega^2 + \left(\frac{p_m B_v}{I\omega} \sin\varphi \sin\omega t\right)^2}, \quad [с^{-1}]. \quad (2.16)$$

Из уравнения (2.16) следует, что кинетика конгломератов, помещенных во вращающееся электромагнитное поле с постоянной угловой скоростью, зависит от величины момента инерции и магнитного момента конгломератов, индукции внешнего магнитного поля и угла между вектором магнитного момента и вектора индукции магнитного поля. При  $\varphi = \pi/2$  будет достигнута максимальная величина абсолютного ускорения, обеспечивающая наибольший энергетический эффект конгломератов:

$$\omega_a = \sqrt{\omega^2 + \left(\frac{p_m B_v}{I\omega}\right)^2}, \quad [с^{-1}]. \quad (2.17)$$

Кинетика отдельных конгломератов во вращающемся электромагнитном поле в больших дисперсных системах осложняется контактным взаимодействием их с другими конгломератами, приводя систему в магнитовибрирующее состояние. В результате этого под воздействием вращающегося электромагнитного поля из конгломератов формируется магнитовибрирующий слой, представляющий собой динамически устойчивое взвешенное состояние ферромагнитных конгломератов в электромагнитном поле.

Исследования поведения ферромагнитных порошков при магнитокипении, представленные в работах [12; 21–23; 41; 55; 78], позволили сделать вывод, что на процесс контактного взаимодействия и, как следствие, разрушение конгломератов существенное влияние оказывает их поступательное движение. Следует отметить, что эффект разрушения конгломератов, происходящий в результате ударно-

импульсного взаимодействия между ними при поступательном движении, а также его ферромагнитных агрегатов, обеспечивается за счет их разной массы и, соответственно, разных магнитных свойств, определяемых магнитным моментом. Для получения условия разрушения конгломератов представим второе уравнение системы (2.8) движения отдельной ферромагнитного агрегата конгломерата в виде

$$m \ddot{y} \approx -p_i \left( \frac{dB_y}{dy} \right) \cos\varphi - F + N, \quad (2.18)$$

где  $F$  – сила ударно-импульсного взаимодействия конгломератов;  $N$  – сила нормальной реакции конгломерата.

Учитывая, что ферромагнитные агрегаты, формирующие конгломерат, движутся одновременно с ним и при ударно-импульсном контактном взаимодействии конгломератов отрываются от него, т. е.  $\ddot{y} = 0$ ,  $N = 0$ , из уравнения (2.18) получим условие, определяющее значение градиента индукции вращающегося электромагнитного поля, которое требуется для обеспечения эффекта разрушения ферромагнитного агрегата:

$$\frac{dB_y}{dy} \approx \frac{F}{p_i}, \quad [\text{Тл/м}]. \quad (2.19)$$

Из условия (2.19) следует, что разрушающий градиент индукции магнитного поля зависит от прочностных свойств конгломерата, обусловленных силой взаимодействия входящих в его состав ферромагнитных агрегатов. Чем больше эти силы, тем больше потребуется величина индукции для его разрушения и наоборот.

В устойчивом режиме магнитовибрирования, используя второе уравнение системы уравнений (2.8) и условие (2.19), найдем выражение, устанавливающее величину перемещения частицы конгломерата при колебательно-поступательном движении во вращающемся электромагнитном поле:

$$y = \frac{F p_m \sin(\omega t + \alpha)}{p_i m \omega_a \sqrt{A^2 + \omega_a^2}}, \quad [\text{м}], \quad (2.20)$$

где  $A = \frac{k}{m}$ ;  $\alpha = -\arctg \frac{\omega}{A}$ ;  $k$  – коэффициент сопротивления поступательному движению конгломерата, который, в соответствии с законом Стокса [88], для сферической частицы равен

$$k = 6\pi R_q \eta, \quad [\text{кг/с}], \quad (2.21)$$

где  $\eta$  – динамическая вязкость, [Па·с];  $R_{\text{ч}}$  – радиус частицы, [м].

Продифференцировав выражение (2.20), получим формулу для определения скорости ударного контактного взаимодействия конгломератов во вращающемся электромагнитном поле:

$$v = \frac{F p_m \omega \cos(\omega t + \alpha)}{p_i m \omega_a \sqrt{A^2 + \omega_a^2}}, \text{ [м/с]}. \quad (2.22)$$

На рисунках 2.3 и 2.4 представлены зависимости амплитуды колебательно-поступательного движения ферромагнитных агрегатов и амплитуды скорости их движения в магнитовибрирующем слое от частоты вращающегося электромагнитного поля, рассчитанных по формулам (2.20) и (2.22), на примере агрегатов с диаметром описывающей окружности  $D = 20 \cdot 10^{-6}$ , [м], имеющих массу, равную  $m = 0,5 \rho D^3$ , [кг], плотность  $\rho = 7874$ , [кг/м<sup>3</sup>], момент инерции  $I = 10^{-1} m D^2$ , [кг·м<sup>2</sup>], и магнитный момент  $p_m = 10^{-7}$ , [А·м<sup>2</sup>], при условии, что магнитная индукция во вращающемся электромагнитном поле  $B_v = 9 \cdot 10^{-3}$ , [Тл], сила ударно-импульсного взаимодействия агрегатов в магнитовибрирующем слое составляет  $F = 75 \cdot 10^{-9}$ , [Н],  $p_i = p_m$ ,  $\omega_a = \omega$ , агрегаты движутся в воздушной среде, с коэффициентом сопротивления  $k = 1,73 \cdot 10^{-9}$ , [Н·с/м]. Абсолютное ускорение агрегатов  $\omega_a$  рассчитывалось по формуле (2.17).

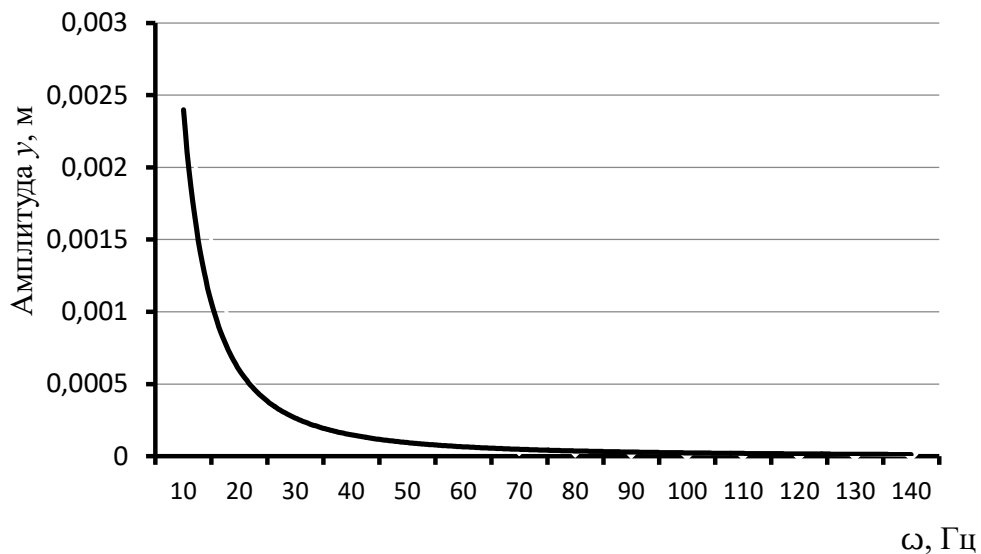


Рисунок 2.3. Изменения амплитуды колебательно-поступательного движения ферромагнитных агрегатов в МВС в зависимости от частоты вращающегося электромагнитного поля

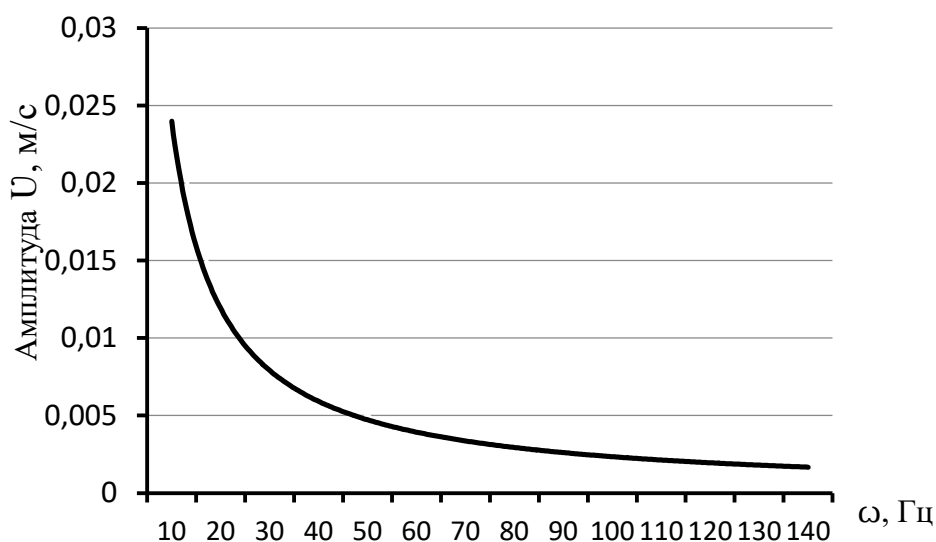


Рисунок 2.4. Изменения амплитуды скорости движения ферромагнитных агрегатов в МВС в зависимости от частоты вращающегося электромагнитного поля

При частоте магнитного поля 10 Гц амплитуда колебания частиц равна 2,4 мм (рисунок 2.3), а максимальная скорость – 0,024 м/с (рисунок 2.4) без учета процессов соударения частиц. При частотах более 10 Гц величина амплитуды и скорость частиц значительно уменьшаются, что приведет к уменьшению степени разрушения частиц за счет их взаимодействия.

На основании (2.22) получим формулу, позволяющую определить кинетическую энергию конгломератов или его ферромагнитных агрегатов, которой они обладают в момент контактного ударно-импульсного взаимодействия:

$$E_y = \frac{mV^2}{2} = \frac{1}{2m} \left[ \frac{Fp_m \omega \cos(\omega t + \alpha)}{p_i \omega_a \sqrt{A^2 + \omega_a^2}} \right]^2, \text{ [Дж]}. \quad (2.23)$$

### 2.2.2. Энергетическое состояние конгломератов и ферромагнитных агрегатов во вращающемся электромагнитном поле

Определение энергии, сообщаемой вращающимся электромагнитным полем конгломератам, произведём, сделав ряд следующих допущений:

– в условиях установившегося магнитовибрирующего слоя энергия, сообщаемая конгломератам и ферромагнитным агрегатам от внешнего поля, компен-

сируется диссипацией энергии, затрачиваемой на их разрушение в процессе контактного взаимодействия [34];

- изменения ориентации магнитных моментов конгломератов и их ферромагнитных агрегатов за время между последовательными столкновениями относительно мало, что дает возможность линеаризовать уравнение их движения во вращающемся электромагнитном поле;

- энергия от вращающегося электромагнитного поля сообщается конгломератам и агрегатам как через поступательную, так и через вращательную степени свободы;

- взаимодействия между конгломератами и агрегатами приводят к установлению эффективного равновесия между энергиями поступательного и вращательного движения;

- конгломераты и ферромагнитные агрегаты обладают замороженными магнитными моментами.

В работах [21; 23; 27; 65; 69; 77; 83; 95; 97], посвященных исследованию движения ферромагнитных частиц в магнитном поле, установлено, что среднее количество энергии, передаваемое внешним полем вращательным степеням свободы одной частице за время  $\frac{T}{2} = \frac{\pi}{\omega}$ , равно  $\frac{1}{2}I(\dot{\varphi} - \dot{\varphi}_0)^2$  при  $t = t_0 + \frac{T}{2}$  по начальным значениям  $\varphi_0$  и  $t_0$ , где  $T/2$  – время между столкновениями частиц, которое реализуются в крайних точках траектории возвратно-поступательного движения. Тогда, используя уравнение (2.15), получим выражение для определения энергии  $E_B$ , передаваемой вращающимся электромагнитным полем конгломератам и агрегатам в единицу времени при вращательно-колебательном движении:

$$E_B = \frac{1}{2}I(\dot{\varphi} - \dot{\varphi}_0)^2 \cong \frac{1}{2} \frac{(p_m B_v)^2}{\pi I \omega^2}, \quad [\text{Дж}]. \quad (2.24)$$

Для определения энергии, передаваемой конгломерату или агрегату от вращающегося электромагнитного поля с индукцией  $B_v$ , в одномерном случае, не учитывая сопротивление среды, запишем второе уравнение (2.8) поступательно-колебательного движения с учетом (2.19) в виде

$$m\ddot{y} = p_m \frac{\partial B_v}{\partial y} \sin\varphi \cos \omega t, \quad (2.25)$$



где  $m$  – масса конгломерата;  $\ddot{y}$  – ускорение поступательного движения конгломерата,  $\varphi = \varphi_0 + \varphi_1$  – угол между векторами  $\vec{B}$  и  $\vec{p}_m$ , сразу после столкновения конгломератов;  $\varphi_0$  – угол между этими векторами в начальный момент времени;  $\varphi_1$  – величина изменения угла после столкновения.

Интегрируя уравнение (2.25), а также принимая, что среднее количество энергии, передаваемое полем при возвратно-поступательном движении одного конгломерата за время  $T/2$ , равно  $\frac{1}{2}m(\dot{y} - \dot{y}_0)^2$  при  $t = t_0 + T/2$  по начальным значениям  $y_0$  и  $t_0$ , получим выражение для энергии, передаваемой вращающимся электромагнитным полем конгломератам или ферромагнитным агрегатам в единицу времени при поступательно-колебательном движении:

$$E_{\text{п}} = \frac{1}{2}m(\dot{y} - \dot{y}_0)^2 \simeq \frac{1}{2} \frac{\rho m^2}{\pi m \omega^2} \left[ \frac{\partial B_y}{\partial y} \right]^2, \quad [\text{Дж}]. \quad (2.26)$$

На основе выражений (2.24) и (2.26) предложена зависимость, позволяющая определить полную энергию, передаваемую конгломератам во вращающемся электромагнитном поле в единицу времени, а также оценить их энергетическое состояние в магнитовибрирующем слое:

$$E = E_{\text{в}} + E_{\text{п}} = \frac{1}{2\pi} \frac{\rho m^2}{\omega^2} \left[ \frac{B_{\text{в}}^2}{I} + \frac{1}{m} \left( \frac{\partial B_y}{\partial y} \right)^2 \right], \quad [\text{Дж}]. \quad (2.27)$$

## **2.3. Моделирование взаимодействия конгломератов в магнитовибрирующем слое и их разрушение**

### **2.3.1. Модель разрушения конгломератов на составляющие их компоненты**

В условиях установившегося магнитовибрирующего слоя энергия, сообщаемая конгломератам от внешнего поля, компенсируется диссипацией энергии, затрачиваемой на их разрушение в процессе контактного взаимодействия

Предположим, что при соударении разновеликих конгломератов в магнитовибрирующем слое разрушаются оба конгломерата. Кроме того, процесс взаимодействия конгломератов считаем происходящим в пределах половины периода,

т. е.  $T/2 = \pi/\omega$ . Разрушение конгломератов произойдет тогда, когда их энергетическое состояние, обеспечиваемое вращающимся электромагнитным полем согласно (2.27), будет равно или превышать величину  $E_p$  и будет достаточным для разрушения прочностных связей между частицами, входящими в их состав. Таким образом, разрушение конгломератов во вращающемся электромагнитном поле можно представить в виде соотношения:

$$\frac{\rho_m^2}{\pi\omega^2} \left[ \frac{B_v^2}{I} + \frac{1}{m} \left( \frac{\partial B_v}{\partial y} \right)^2 \right] = E_p, [\text{Дж}]. \quad (2.28)$$

Из условия (2.28) получим формулу для определения величины магнитной индукции, обеспечивающей процессы разрушения конгломератов в устройствах с вращающимся электромагнитным полем:

$$B_{vp} = \sqrt{I \left[ \frac{\pi E_p \omega^2}{\rho_m^2} - \frac{1}{m} \left( \frac{\partial B_v}{\partial y} \right)^2 \right]}, [\text{Тл}]. \quad (2.29)$$

Согласно (2.19), эффект разрушения конгломерата может быть обеспечен при соблюдении следующего условия:  $\frac{dB_v}{dy} \approx \frac{F}{p_i}$ , [Тл/м].

Считая, что в момент ударно-импульсного контактного взаимодействия конгломератов величина кинетической энергии, затрачиваемой на их разрушение, равна полной энергии, передаваемой им во вращающемся электромагнитном поле  $E_y = E$ , из выражения (2.23) получим

$$\left( \frac{\partial B_v}{\partial y} \right)^2 = \left( \frac{F}{p_i} \right)^2 = 2mE_p \left[ \frac{\omega_a \sqrt{A^2 + \omega_a^2}}{p_m \omega \cos(\omega t + \alpha)} \right]^2, [\text{Тл/м}]. \quad (2.30)$$

Подставив (2.30) в (2.29), формула для определения величины магнитной индукции, обеспечивающей процессы разрушения конгломератов в устройствах с вращающимся электромагнитным полем, преобразуем к виду:

$$B_{vp} = \frac{1}{\rho_m} \sqrt{I E_p \left[ \pi \omega^2 - \frac{2 \omega_a^2 (A^2 + \omega_a^2)}{\omega^2 \cos^2(\omega t + \alpha)} \right]}, [\text{Тл}], \quad (2.31)$$

где  $A = \frac{k}{m}$ , [с<sup>-1</sup>];  $\alpha = -\arctg \frac{\omega}{A}$ .

Конгломераты шламовых отходов, как было показано ранее, представляют собой совокупность ферромагнитных агрегатов и неметаллических частиц, удерживаемых

живаемых в общей массе конгломерата адгезионными и магнитостатическими силами. Согласно закону П. Риттингера [104; 110], работа, затрачиваемая на разрушение твердого тела, равна:

$$E_p = K_p D^2, [\text{Дж}], \quad (2.32)$$

где  $K_p$  – коэффициент пропорциональности,  $[\text{Дж}/\text{м}^2]$ ;  $D$  – диаметр окружности, описывающий тело подлежащее разрушению,  $[\text{м}]$ .

Считая адгезионные связи преобладающим видом связей, обеспечивающих удержание в конгломерате неферромагнитных агрегатов, примем за коэффициент пропорциональности для конгломератов шламовых отходов величину, равную  $K_p = E_{\text{адг}}$ , где  $E_{\text{адг}}$  – адгезия сочетания «кремний – железо».

С учетом (2.32) и (2.31), принимая  $D = D_k$ , где  $D_k$  – диаметр окружности описывающий конгломерат, подвергаемый разрушению, установлено пороговое значение индукции вращающегося электромагнитного поля, реализующее процесс разрушение конгломератов и, как следствие, выделение из их состава немагнитной компоненты (песка) в условиях устойчивого режима магнитовибрирующего слоя:

$$B_{vp} = \frac{D_k}{\rho_m} \sqrt{I E_{\text{адг}} \left[ \pi \omega^2 - \frac{2 \omega_a^2 (A^2 + \omega_a^2)}{\omega^2 \cos^2(\omega t + \alpha)} \right]}, [\text{Тл}]. \quad (2.33)$$

Обозначения, принятые в формуле (2.33), имеют следующие единицы измерения:  $E_{\text{адг}}$  – Дж/м<sup>2</sup>;  $\rho_m$  – Дж/Тл;  $B_v$  – Тл;  $\omega, \omega_a$  – с<sup>-1</sup>;  $I$  – кг·м<sup>2</sup>;  $D_k$  – м.

Если принять, что  $\omega_a \approx \omega = 2\pi \frac{1}{c}$ , сопротивление воздушной среды  $k = 0$ , выражение (2.33) примет вид

$$B_{vp} = 7,02 \frac{D_k}{\rho_m} \sqrt{I E_{\text{адг}}}, [\text{Тл}]. \quad (2.34)$$

Используя формулу (2.7) для определения магнитного момента конгломерата в виде

$$p_m = \frac{Bm}{\rho_k \mu_0 \mu}, [\text{А} \cdot \text{м}^2 (\text{Дж}/\text{Тл})], \quad (2.35)$$

подставив ее в (2.34), получим

$$B_{vp} = \sqrt{7,02 \frac{D_k \rho_k \mu_0 \mu}{m_k} \sqrt{I_k E_{\text{адг.ч}}}}, [\text{Тл}]. \quad (2.36)$$

Выразим массу и момент инерции конгломерата через диаметр описывающей его окружности:

$$m_k = 0,5\rho_k D_k^3, \text{ [кг]}; \quad (2.37)$$

$$I_k = \frac{m_k D_k^2}{12}. \quad (2.38)$$

Тогда выражение (2.36) преобразуется к виду

$$B_{vp} = \sqrt{14,04\mu_0\mu \left(\frac{\rho_k D_k E_{адг.ч}}{24}\right)^{0,5}}. \quad (2.39)$$

Установлено, что конгломерат представляет собой совокупность ферромагнитных и неферромагнитных частиц, соизмеримых с размером абразивных частиц (абразива)  $D_ч$ . В результате этого плотность конгломерата в целом в 2–3 раза ниже плотности входящих в него металлических частиц. Если принять, что  $\rho_k \approx 0,5 \cdot \rho_ч$ , а  $N = 0,85 \cdot \frac{D_k}{D_ч}$ , где  $N$  – количество частиц, формирующих ферромагнитный агрегат после удаления из конгломерата неферромагнитной компоненты, тогда в окончательном виде получим формулу для определения величины магнитной индукции, обеспечивающей процесс разрушения конгломератов шлама в устройствах с вращающимся электромагнитным полем:

$$B_{vp} = 8 \cdot \sqrt{\mu_0\mu\pi(\rho_ч N D_ч E_{адг.ч})^{0,5}}, \text{ [Тл]}. \quad (2.40)$$

Зависимость (2.40) позволяет на стадии проектирования операции по переработке шламовых отходов обосновать параметры магнитного поля, обеспечивающие в условиях вращающегося электромагнитно поля разделение магнитной и немагнитной компонент, содержащихся в шламовых отходах, а также характеристики устройства для реализации процесса их переработки.

На рисунках 2.5–2.7 представлены характерные зависимости, иллюстрирующие изменение порогового значения индукции вращающегося электромагнитного поля, обеспечивающего разрушение конгломератов шламовых отходов и, как следствие, разделение его на ферромагнитные и неферромагнитные компоненты в зависимости от гранулометрических характеристик конгломератов и их магнитных моментов, угловой скорости вращения электромагнитного поля, прочностных свойств конгломератов, обусловленных адгезионными связями агрегатов.

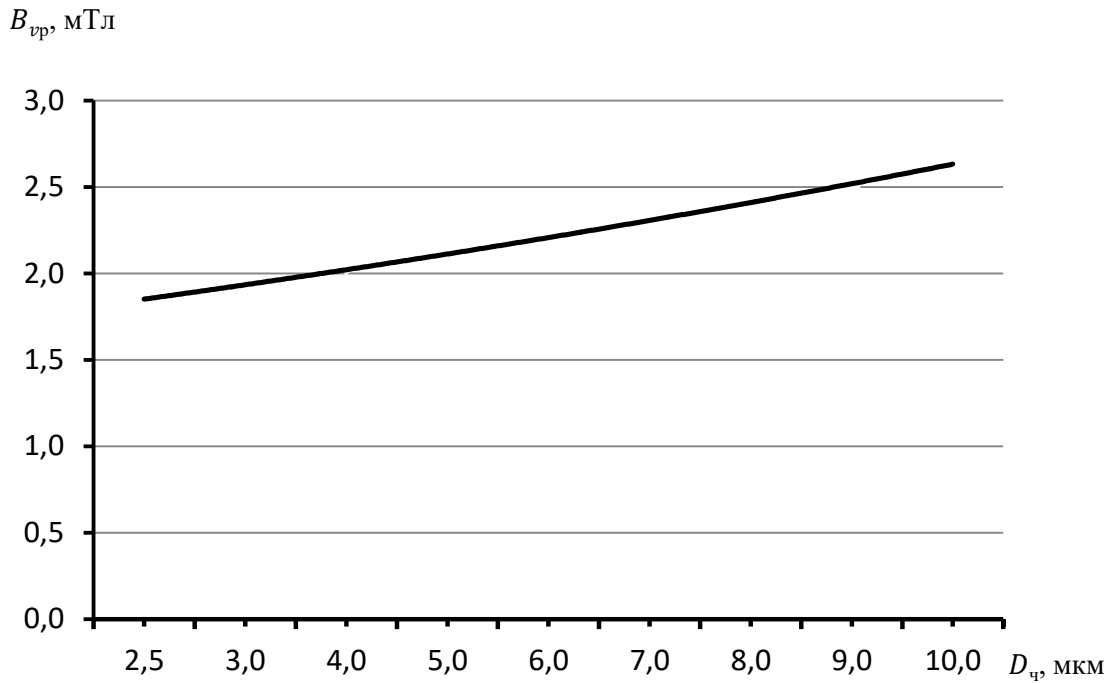


Рисунок 2.5. Изменение порогового значения магнитной индукции ВЭМП в зависимости от размера частиц конгломерата при  $E_{адг.ч} = 0,4 \text{ Дж/м}^2$ ,  $\rho_ч = 7\,814 \text{ кг/м}^3$ ,  $N = 20$  шт

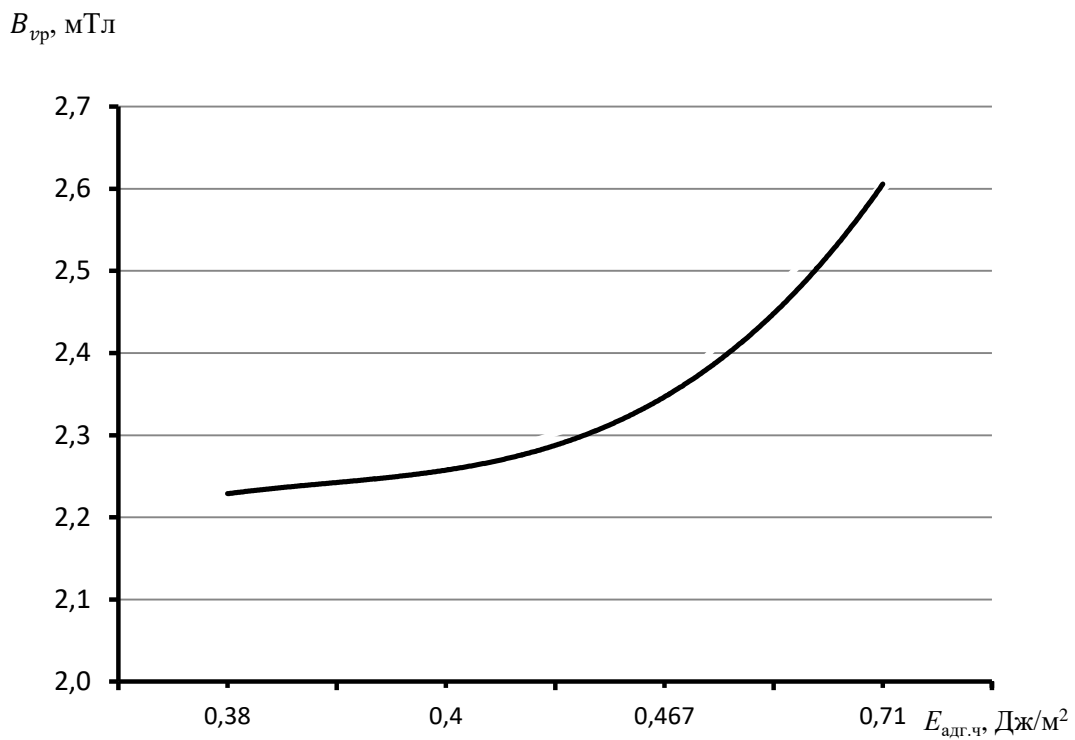


Рисунок 2.6. Изменение порогового значения магнитной индукции ВЭМП в зависимости от прочностных связей частиц в конгломерате при  $\rho_ч = 7\,814 \text{ кг/м}^3$ ,  $N = 20$  шт,  $D_ч = 6 \text{ мкм}$

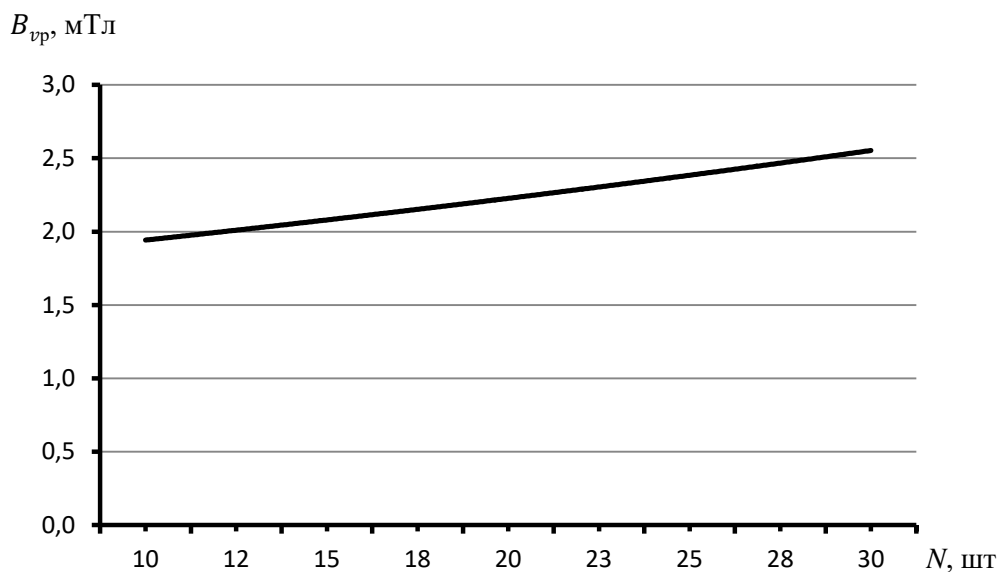


Рисунок 2.7. Изменение порогового значения магнитной индукции ВЭМП в зависимости от количества частиц входящих в конгломерате, при  $E_{\text{адг.ч}} = 0,4 \text{ Дж/м}^2$ ,  $\rho_{\text{ч}} = 7814 \text{ кг/м}^3$ ,  $D_{\text{ч}} = 6 \text{ мкм}$

### 2.3.2. Модель измельчения ферромагнитных агрегатов в магнитовибрирующем слое

После разрушения конгломератов и выделения из них немагнитных компонентов (частиц песка) формируются ферромагнитные агрегаты шлама размером  $D_{\text{ч.н}}$ , которые в целях получения более качественного сырья для порошковой металлургии могут подвергаться дальнейшему разрушению-измельчению до заданного размера ферромагнитных агрегатов  $D_{\text{ч.к}}$ .

Предположим, что при соударении разных по массе ферромагнитных агрегатов в магнитовибрирующем слое:

- разрушается один из агрегатов;
- процесс взаимодействия агрегатов происходит в пределах половины периода, т. е.  $\frac{T}{2} = \frac{\pi}{\omega}$ ;
- агрегат обладает запасом кинетической энергии, определяемой выражением (2.15).

Согласно закону В.Л. Кирпичёва и Ф. Кика [104; 110], расход энергии на дробление материала пропорционален объёму или весу дробимого тела:

$$E = \frac{\sigma^2 \Delta V}{2E}, [\text{Дж}], \quad (2.41)$$

где  $\Delta V$  – изменение объема тела, подлежащего разрушению, [ $\text{м}^3$ ];  $\sigma$  – напряжение деформации, [Па];  $E$  – модуль Юнга, [Па].

Примем за напряжение деформации предел прочности ферромагнитного агрегата и его частиц  $\sigma_B$ , а изменение объема определим из соотношения

$$\Delta V = \frac{\pi D_{\text{ч.к}}^3}{6} (Z_u^3 - 1), \quad (2.42)$$

где  $Z_u = \frac{D_{\text{ч.н}}}{D_{\text{ч.к}}}$  – степень измельчения агрегата.

Тогда при многократном ударно-импульсном контактном взаимодействии количество энергии  $E_p$  необходимое для измельчения ферромагнитного агрегата шлама:

$$E_p = \frac{\pi \sigma_B^2 D_{\text{ч.к}}^3}{12E} (Z_u^3 - 1), [\text{Дж}], \quad (2.43)$$

где  $\sigma_B$  – предел прочности ферромагнитного агрегата и его частиц, [Па];  $E$  – модуль упругости ферромагнитного материала агрегата, [Па].

С учетом принятых допущений и формулы (2.31), измельчение ферромагнитного агрегата до заданного размера частиц  $D_{\text{ч.к}}$  может быть реализовано при выполнении следующего условия:

$$B_{\text{ви}} = \frac{\sigma_B}{\rho_m} \sqrt{I \frac{\pi D_{\text{ч.к}}^3}{12E} (Z_u^3 - 1) \left[ \pi \omega^2 - \frac{2\omega a^2 (A^2 + \omega a^2)}{\omega^2 \cos^2(\omega t + \alpha)} \right]}, [\text{Тл}]. \quad (2.44)$$

Допустив, что  $\omega_a \approx \omega = 2\pi$  рад/с,  $k = 0$ , из формулы (2.44) получим зависимость, позволяющую на стадии проектирования операции по переработке шламовых отходов обосновать параметры магнитного поля, обеспечивающие в условиях вращающегося электромагнитного поля измельчение ферромагнитных агрегатов с требуемым гранулометрическим размером, а также характеристики устройства для реализации процесса измельчения:

$$B_{\text{ви}} = 6,23 \cdot \frac{\sigma_B}{\rho_{\text{м.ч}}} \cdot \sqrt{I \cdot \frac{D_{\text{ч.к}}^3}{3E} \cdot (Z_u^3 - 1)}, [\text{Тл}]. \quad (2.45)$$

С учетом (2.37) и (2.38) получим формулу для определения величины магнитной индукции, обеспечивающей процесс измельчения ферромагнитных агрегатов шлама в устройствах с вращающимся электромагнитным полем:

$$B_{ви} = 3,42 \cdot \sqrt{\frac{\sigma_B \mu_0 \mu D_{к.к}}{Z_{и}} \cdot \pi \left[ \frac{\rho_{ч}}{E} \cdot (Z_{и}^3 - 1) \right]^{0,5}}, \text{ [Тл]}. \quad (2.46)$$

На рисунках 2.8–2.10 представлены характерные зависимости, иллюстрирующие изменение порогового значения индукции вращающегося электромагнитного поля, обеспечивающей измельчение ферромагнитных агрегатов шламовых отходов в зависимости от степени измельчения, гранулометрических характеристик частиц, получаемых в процессе измельчения, и от предела прочности. Расчет по формулам (2.40) и (2.46) представлен в приложении Б.

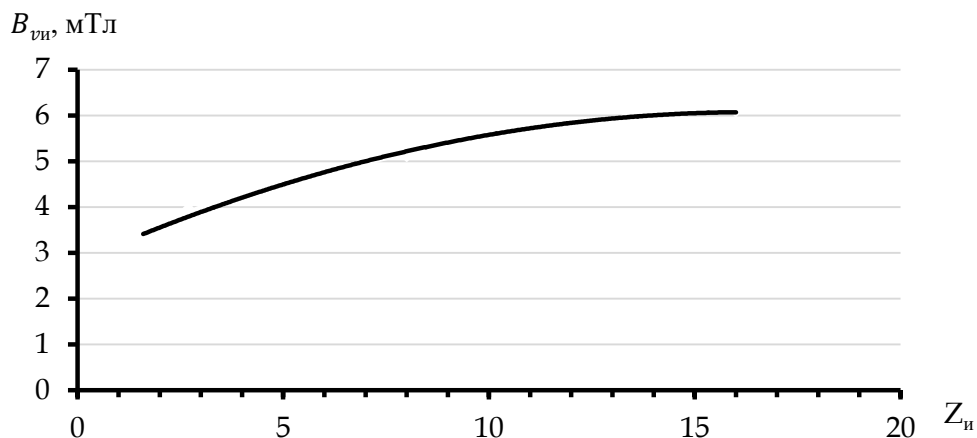


Рисунок 2.8. Изменение порогового значения магнитной индукции ВЭМП в зависимости от степени измельчения при  $\sigma_B = 250$  МПа,  $\rho_{ч} = 7\,814$  кг/м<sup>3</sup>,  $D_{к.к} = 10$  мкм

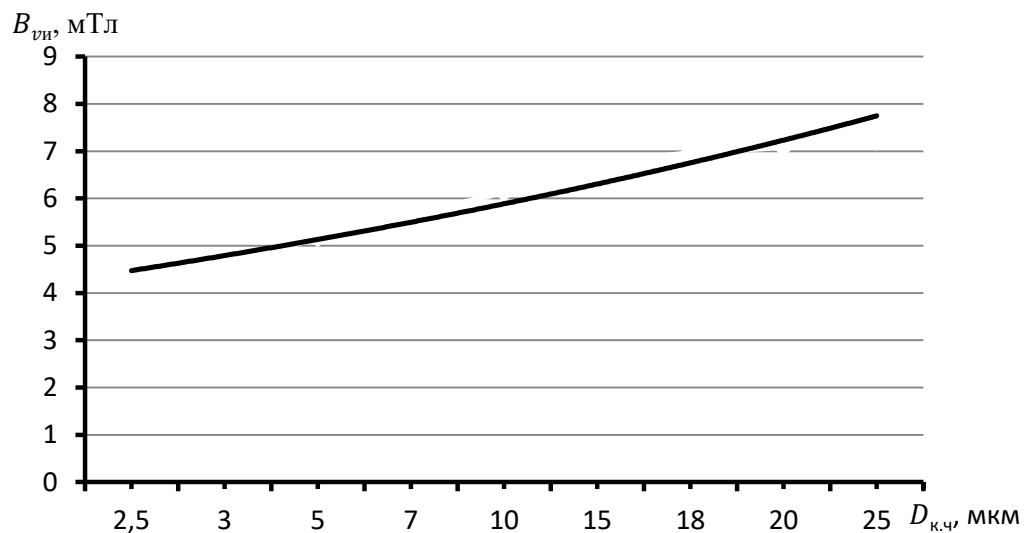


Рисунок 2.9. Изменение порогового значения магнитной индукции ВЭМП в зависимости от конечного размера измельченных ферромагнитных частиц при  $\sigma_B = 250$  МПа,  $\rho_{ч} = 7\,814$  кг/м<sup>3</sup>



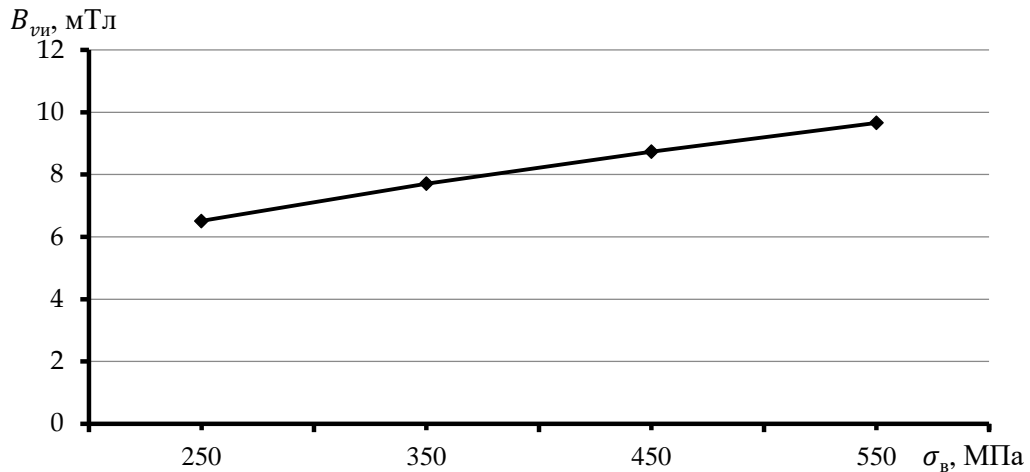


Рисунок 2.10. Изменение порогового значения магнитной индукции ВЭМП в зависимости от предела прочности ферромагнитных частиц при  $Z_{и} = 5$

### 2.3.3. Управление процессом измельчения ферромагнитных частиц шламовых отходов во вращающемся электромагнитном поле

Преобразовав (2.46), найдем соотношение между конечными и начальными размерами измельчаемого ферромагнитного агрегата и индукцией вращающегося электромагнитного поля:

$$D_{к.ч} = \frac{0,46EB_{ви}^4}{\rho_k D_{н.ч} \sigma_B^2 \mu_0^2 \mu^2}, \text{ [м]}. \quad (2.47)$$

Соотношение (2.47) позволяет оценить влияние параметров вращающегося электромагнитного поля и магнитных свойств шлама на достижение гранулометрических характеристик, получаемых в процессе переработки среды.

С целью оценки продолжительности процессов разрушения конгломератов и измельчения ферромагнитных агрегатов шламовых отходов в магнитовибрирующем слое воспользуемся теоретико-вероятностной моделью, предложенной в работах [10; 45] для практических расчётов продолжительности виброударной упрочняющей обработки:

$$t = \frac{n}{Pf}, \quad (2.48)$$

где  $n$  – количество событий, обеспечивающих технологический эффект разрушения конгломерата и ферромагнитного агрегата;  $P$  – коэффициент интенсив-

ности обработки, определяемый как вероятность события того, что за один цикл колебаний магнитного поля во вращающемся электромагнитном поле произойдет разрушение конгломерата или ферромагнитного агрегата;  $f$  – частота колебаний частиц в электромагнитном поле, [Гц].

Технологический эффект разрушения конгломератов и измельчения ферромагнитных частиц шламовых отходов в электромагнитном поле обеспечивается в результате хаотичного и многократного соударения конгломератов, приводящего к изменению их состава и геометрических размеров, поэтому в качестве количественной величины события, обеспечивающего технологический эффект при разрушении конгломератов, вполне объективно может быть принята среднестатистическая степень их разрушения  $Z_p$ , представляющая собой отношение масс исходных конгломератов к массе выделившихся при разрушении ферромагнитных частиц.

При измельчении выделившихся при разрушении ферромагнитных частиц в качестве количественной величины события, обеспечивающего технологический эффект, вполне объективно может быть принята среднестатистическая степень их измельчения  $Z_{и}$ .

Выразив частоту колебаний через угловую скорость вращательного движения магнитовибрирующего слоя в электромагнитном вращающемся поле  $\omega = 2\pi f$ , получим формулы для определения:

– продолжительности разрушения конгломератов шламовых отходов (при загрузке среды массой, объём которой меньше объёма рабочей зоны):

$$t_p = \frac{2\pi Z_p}{P\omega}, [с]; \quad (2.49)$$

– измельчения ферромагнитных частиц шламовых отходов (при загрузке среды массой, объём которой меньше объёма рабочей зоны):

$$t_{и} = \frac{2\pi Z_{и}}{P\omega}, [с]. \quad (2.50)$$

Что касается коэффициента  $P$ , то его величина определяется кинетикой конгломератов и ферромагнитных агрегатов в магнитовибрирующем слое, зависит от его энергетического состояния, определяемого индукцией электромагнитного вращающегося поля и устанавливается экспериментально.

## Выводы по главе 2

1. Конгломераты шламовых отходов, как показал анализ, на 80–85 % состоят из ферромагнитных агрегатов, поэтому их можно охарактеризовать как твердое тело, обладающее ферромагнитными свойствами, основными характеристиками которых являются магнитная проницаемость и магнитный момент. Получена аналитическая зависимость, позволяющая определить значение магнитного момента конгломерата шлама.

2. Показано, что конгломераты шлама под воздействием вращающегося электромагнитного поля формируют магнитовибрирующий слой, в котором они в результате колебательно-вращательного, колебательно-поступательного перемещения и ударно-импульсного взаимодействия между собой совершают сложное движение.

3. Установлено, что с увеличением частоты магнитного поля амплитуда скорости и перемещения ферромагнитных тел уменьшаются, что свидетельствует о снижении хаотичности движения тел в магнитовибрирующем слое и преобразовании его при высоких частотах в моно-вращающееся тело.

4. Предложены расчетные зависимости, позволяющие определить:

- полную энергию, передаваемую конгломератам во ВЭМП в единицу времени;
- величину магнитной индукции, обеспечивающей процесс разрушения и, как следствие, разделения конгломератов шлама на ферромагнитные и неферромагнитные компоненты;

- величину магнитной индукции, обеспечивающей процесс разрушения-измельчения ферромагнитных агрегатов шлама в устройствах с ВЭМП.

5. На основе полученных расчетных зависимостей установлено соотношение между конечным и начальным размерами измельчаемого ферромагнитного агрегата и индукцией ВЭМП.

6. Для оценки продолжительности процессов разрушения конгломератов и измельчения ферромагнитных агрегатов шламовых отходов предложена теоретико-вероятностная модели.

### **Глава 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЛИЯНИЯ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА РАЗРУШЕНИЕ И ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ ШЛАМОВЫХ ОТХОДОВ**

Раскрытые во второй главе основные закономерности процессов переработки шламовых отходов в устройствах с вращающимся электромагнитным полем и сделанные при этом выводы можно считать научно обоснованными только после количественной оценки дополнительных параметров на основе экспериментальных исследований. В связи с невозможностью непосредственного наблюдения протекания ряда эффектов процесса разрушения и измельчения шлама в условиях вращающегося электромагнитного поля, была определена следующая последовательность экспериментального исследования.

Исследования управляемости технологического процесса разрушения и измельчения конгломератов проводились на образцах шлифовального шлама, получаемого непосредственно в производственных условиях после выполнения шлифовальных операций стальных деталей.

На первом этапе исследований проводился анализ состояния образцов шламовых отходов. В результате этих исследований устанавливался качественный и количественный состав образцов, их прочностные и гранулометрические характеристики.

На втором этапе исследовалось влияние режимов вращающегося электромагнитного поля на энергетическое состояние магнитовибрирующего слоя. В результате этих исследований устанавливались кинетические закономерности поведения, степень энергетической активности частиц в зависимости от частоты вращающегося электромагнитного поля, их размеров и уровня загрузки в рабочую зону устройства.

Третий этап предусматривал исследования процессов разрушения, разделения конгломератов шламовых отходов на компоненты и их измельчение. В результате этих исследований устанавливались условия, обеспечивающие реализацию этих процессов во вращающемся электромагнитном поле, подтверждалась приемлемость расчетных зависимостей, предложенных для их обоснования.

В основу исследований были положены однофакторные эксперименты. Статистическая обработка экспериментальных данных производилась по, апробированных на практике методикам. Эксперименты над образцами шламов проводились на базе НИИ «Вибротехнология» и ресурсного центра НОЦ «Материалы» ДГТУ.

### 3.1. Технологическое оборудование, реализующее вращающееся электромагнитное поле

Для проведения экспериментальных исследований разрушения и измельчения шламовых отходов шлифовального производства в условиях вращающегося электромагнитного поля разработана опытно-экспериментальная установка, общий вид и технические характеристики которой представлены на рисунке 3.1 и в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Технические характеристики опытно-экспериментальной установки

Характеристики	Обозначение	Единица измерения	Величина
Магнитная индукция в рабочей зоне	$B$	Тл	0,01
Число индукторов	–	шт	1
Объем рабочей камеры	$V$	дм <sup>3</sup>	187,5
Внутренний диаметр рабочей зоны	$D$	мм	75
Количество пар полюсов	$P$	шт	2
Частота вращения электромагнитного поля		об/мин	1 600
Потребляемая мощность		кВт	2
Коэффициент мощности	$\cos\varphi$	–	0,2
Напряжение на фазу	$U$	В	70
Ток	$I$	А	8
Частота питающей сети	$f$	Гц	50
Количество фаз	$L$	шт	3
Габариты: – рабочий блок – блок управления	–	м	0,25×0,25×0,4 1,6×0,6×0,55
Масса	–	кг	55
Тип охлаждения	–	–	Масляный
Насос (тип): – мощность насоса – производительность насоса – номинальное давление на выходе – вес – габариты	–	кВт л/мин Мпа кг мм	ПА-22 0,125 22 0,04 5,9 400×180

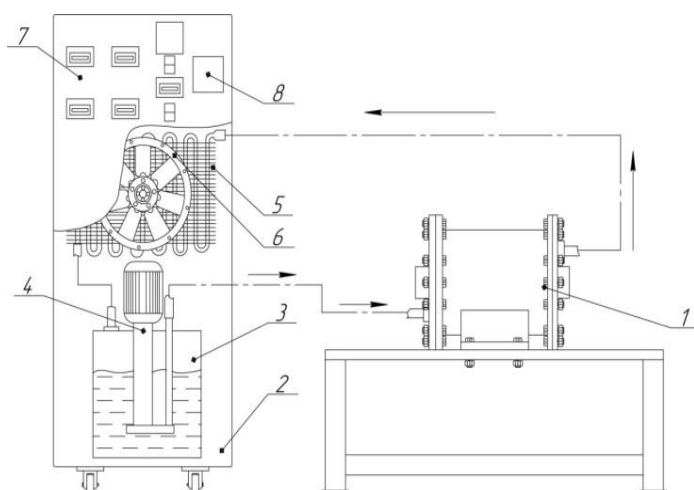


Рисунок 3.1. Опытно-экспериментальная установка:

- 1 – рабочий блок-индуктор; 2 – блок управления; 3 – маслобак;  
 4 – помпа для перекачки масла; 5 – радиатор для охлаждения масла; 6 – вентилятор;  
 7, 8 – приборы-индикаторы тока, напряжения, частоты

Загрузка образцов шлифовального шлама для проведения исследований осуществляется в рабочую зону рабочего блока 1, ограниченную цилиндрической втулкой, выполненной из парамагнитного материала. Запуск установки осуществляется путем последовательного включения автоматов «сеть ~3ф 380 В, 50 Гц», «кулер», «помпа». Далее при нажатии кнопки «пуск» напряжение 220 В подается на преобразователь частоты. При помощи преобразователя частоты осуществлялось управление индукцией рабочего блока. Охлаждающей жидкостью служит трансформаторное масло, непрерывно циркулирующее в системе «индуктор – теплообменник – маслобак – индуктор».

### 3.2. Образцы шламовых отходов и их анализ

В качестве образцов для проведения экспериментальных исследований использовались шлифовальные шламы, получаемые после выполнения шлифовальных операций стальных деталей, изготавливаемых на промышленных предприятиях Ростовской области в условиях, представленных в таблице 3.2.

Технологические параметры обработки деталей, предопределяющие состав шламовых отходов

Предприятие	Обрабатываемые материалы	Марка шлифовального круга	Применяемая технологическая жидкость (ТЖ)
ООО «10-ГПЗ»	Сталь ШХ15, ШХ15СГ, по ГОСТ 801-78, 15Г1	Круги абразивные по ГОСТ 2424-83. Белый электрокорунд марок: 14А, 20А. Зернистость: 16П, 25П. Степень твёрдости: СМ1-СМ2	ТЖ используется на водной основе: на 1 л воды: 6–10 г нитрита натрия, 8–10 г кальцинированной соды марки Б
ПАО «ТАНТК им. Г.М. Бериева»	30ХГСА по ГОСТ 4543-71	Круг керамический ГОСТ Р 52781-07, ГОСТ Р 52588-11	5-процентная эмульсия марки Blasocut 4000 CF
АО «Ростовгазо-аппарат»	Стали инструментальные марок: 3 ГОСТ 380-2005, 45 ГОСТ 1050-2013, 9ХС ГОСТ 5950-2000, У8; У8А ГОСТ1435-99	Круги абразивные по ГОСТ 2424-83. Белый электрокорунд марок: 14А, 20А. Зернистость: 16П, 25П, 40П. Степень твёрдости: СМ1-СМ2	ТЖ используется на водной основе: на 1 л воды: 6–10 г нитрита натрия, 8–10 г кальцинированной соды марки Б

Для проведения спектрального анализа исходных образцов шлама и полученных в процессе переработки применялся электронно-ионный микроскоп ZEISS Crossbeam 350, общий вид и технические возможности которого представлены на рисунке 3.2 и в таблице 3.3.



Рисунок 3.2. Электронно-ионный микроскоп ZEISS Crossbeam 350

Технические характеристики микроскопа ZEISS Crossbeam 350

Параметр	Значение
Тип катода	Шоттки
Разрешение электронной колонны	0,7 нм при 30 кВ в режиме СТЭМ 0,9 нм при 15 кВ 1,7 нм при 1 кВ 2,5 нм при 0,2 кВ
Разрешение электронной колонны при пониженном давлении	1,4 нм при 3 кВ и давлении 30 Па 1,0 нм при 15 кВ и давлении 30 Па
Ускоряющее напряжение электронной колонны	20–30 000 В
Разрешение ионной колонны	3 нм при 30 кВ 120 нм при 1 кВ 330 нм при 500 В
Ускоряющее напряжение ионной колонны	0,5–30 кВ
Ток ионного пучка	1 пА – 100 нА
Перемещения рабочего столика	$X = 100$ мм, $Y = 100$ мм, $Z = 50$ мм Вращение 360° Наклон от –4 до +70° Ось $M = 13$ мм
Тип столика	Комбинированный эвцентрик
Детекторы	Стандартные: боковой вторичных электронов внутрилинзовый вторичных электронов Опциональные: сдвоенный внутрилинзовый детектор вторичных и обратнo-рассеянных электронов вторичных электронов при переменном давлении обратнo-рассеянных электронов катодоллюминесцентный СТЭМ вторичных электронов и вторичных ионов масс-спектрометр вторичных ионов ЭДС, ВДС, ДОЭ и др.

Образцы шлифовальных шламовых отходов, как показано на фотографиях (рисунок 3.3), полученных с помощью цифрового фотоаппарата и электронного микроскопа, представляют собой вязкую пастообразную массу, образованную из металлических частиц и абразива, пропитанную технологической жидкостью со свойствами, определяемыми предысторией их образования.



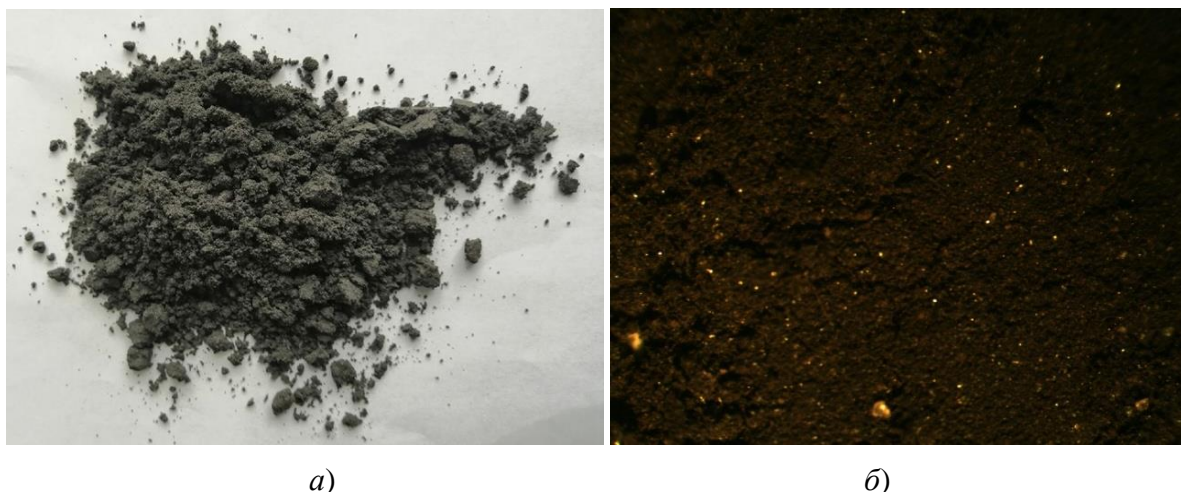


Рисунок 3.3. Фотография исходного шлифовального шлама, выполненные с помощью цифрового фотоаппарата (а) и электронного микроскопа (б)

Для дальнейших исследований образцы шламовых отходов подвергались промывке и сушке с целью удаления из состава шлама технологической жидкости. Отделение ТЖ от шлифовального шлама проводилось щелочным методом очистки [1; 27], суть которого заключается в следующем. Шлам массой 20 г засыпался в колбу с 70-процентным раствором каустической соды (NaOH): 20 г шлама + 340 мл раствора щёлочи. Затем смесь подогревалась до кипения и выдерживалась в течение 10 мин. Образовавшаяся плёнка ТЖ аккуратно сливалась и производилась 10-кратная промывка шламового осадка проточной водой. Полученный шламовый осадок просушивался и взвешивался на электронных весах модели Vibro AF с точностью до 0,0001 г.

Приведенные в таблице 3.4 результаты показали, что ТЖ в среднем составляет 19 % в общей массе шлифовального шлама.

Таблица 3.4

Содержание ТЖ в шламе шлифовального производства

Производитель шлама	Масса исходного шлама, г	Масса сухого остатка, г	Масса ТЖ, г	Содержание ТЖ, %
ООО «10-ГПЗ»	20	15,200	4,330	21,7
ПАО «ГАНТК им. Г.М. Бериева»	20	16,100	3,280	16,4
АО «Ростовгазоаппарат»	20	15,300	4,160	20,8

На рисунке 3.4 представлены фотографии, полученные с помощью цифрового фотоаппарата и электронного микроскопа, иллюстрирующие общий вид шлама после удаления ТЖ и сушки, которые наглядно показывают, что удаление ТЖ и влаги из шлама разрушает большую часть комков и придает ему сыпучесть.

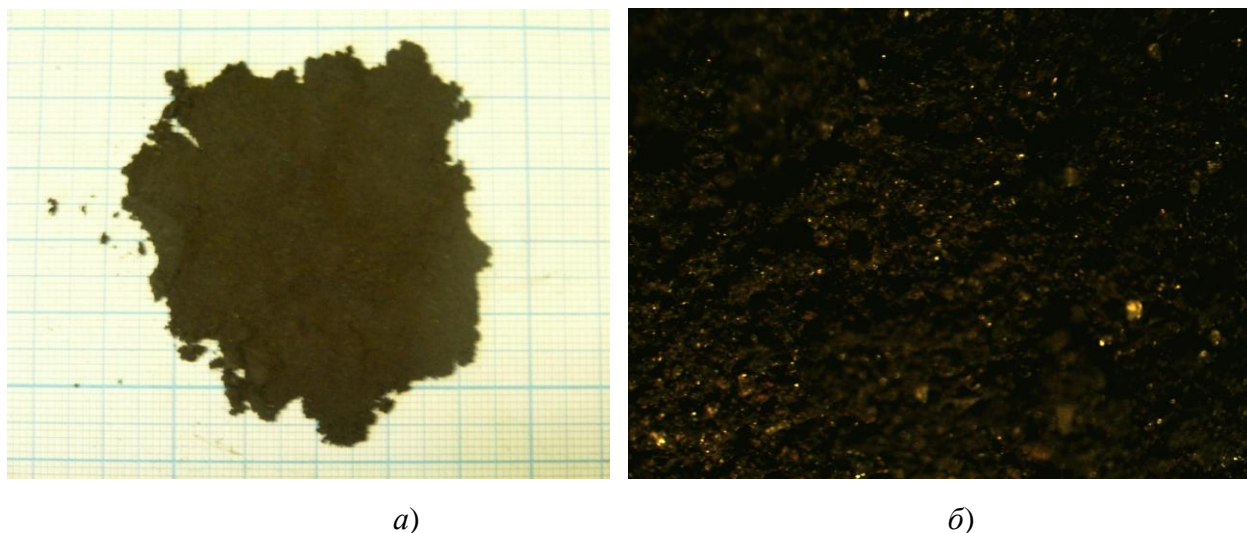


Рисунок 3.4. Фотография шлифовального шлама после удаления ТЖ, выполненные с помощью цифрового фотоаппарата (а) и электронного микроскопа (б)

Остающиеся после сушки трудно разрушимые комки представляют собой сильно окисленные конгломераты шлама, металлическая составляющая которых имеет форму стружки лезвийной обработки металла с высокоразвитой поверхностью (рисунок 3.5). Разрушение этих конгломератов требует высоких энергетических затрат при их дальнейшей переработке для получения требуемых гранулометрических характеристик.

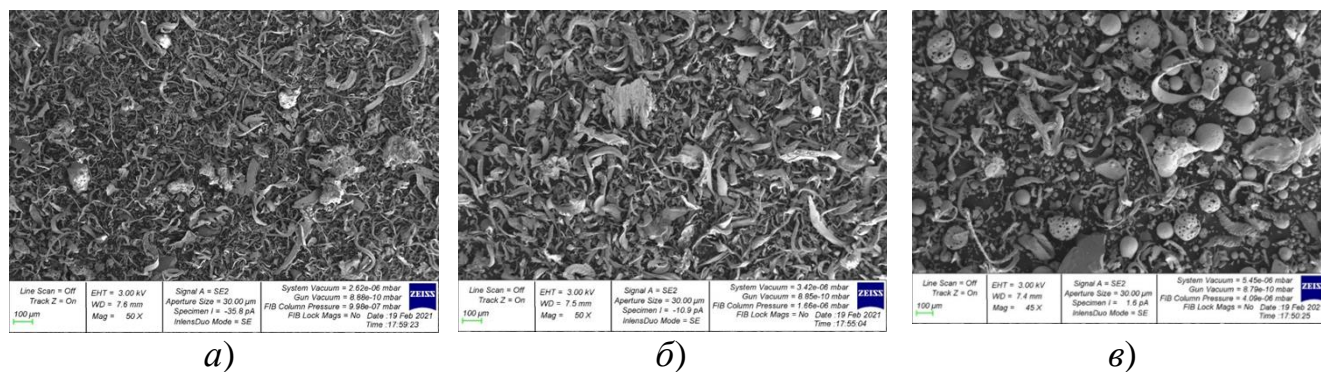


Рисунок 3.5. Вид конгломератов шламов после удаления ТЖ, полученные на электронном микроскопе:

а – ООО «10-ГПЗ»; б – ПАО «ТАНТК им. Г.М. Бериева»; в – АО «Ростовгазоаппарат»

Анализ компонентного состава исследуемых шламов, представленный на рисунке 3.6 и в таблице 3.5, свидетельствует об их схожести по своему составу и процентному соотношению составляющих его элементов.

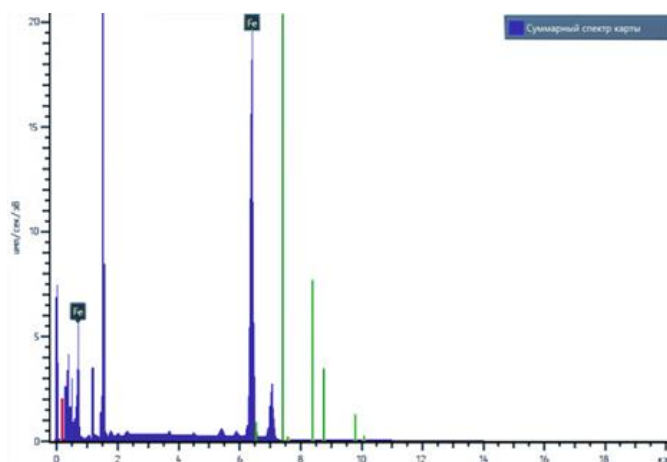


Рисунок 3.6. Спектрограмма элементного распределения составляющих шламов после удаления ТЖ

Таблица 3.5

Компонентный анализ шламов после промывки и сушки

Предприятие	Процентное содержание химического элемента, %											
	Al	C	Ca	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	O	P	S	Si
ООО «10-ГПЗ»	1	4,5	0,5	1,5	1,2	84,3	2,3	–	1,3	0,2	2,7	0,1
ПАО «ТАНТК им. Г.М. Бериева»	18	15	–	2	–	58,2	1,3	0,5	2,5	1	–	1,5
АО «Ростовгазо-аппарат»	15	18	–	3	–	57,5	2	–	4	–	–	0,5

Как следует из таблицы 3.5, содержание абразива в общей массе шламов составляет примерно 6–15 %.

Размеры очищенных от ТЖ конгломератов исследуемых шламов изменяются в пределах 40–100 мкм (рисунок 3.5). Металлическая составляющая размером от 35 до 80 мкм имеет вид стружки с высокоразвитой поверхностью, форма которой зависит от технологии обработки. В этой массе встречаются прозрачные частицы абразива с размерами 70–200 мкм.

Оценка прочности конгломератов, проведённая методом их разрушения путем сжатия их между двумя достаточно твердыми пластинами на приборе ППЗР-2 разработки ВНИИМАШ г. Волжск, показала, что прочность сцепления металлических и неметаллических агрегатов конгломератов составляет 5,9–7,3 МПа, а прочность металлических частиц в 1,5–2 раза ниже предела прочности обрабатываемого материала [108].

### **3.3. Исследование влияния вращающегося электромагнитного поля на энергетическое состояние магнитовибрирующего слоя**

#### **3.3.1. Индукционная ЭДС как показатель оценки магнитных свойств вращающегося электромагнитного поля**

Во вращающемся электромагнитном поле при определенных значениях индукции конгломераты переходят в магнитовибрирующее состояние. На рисунке 3.7 проиллюстрирован характер движения конгломератов шламовых отходов, освобождённых от ГЖ, размером 40–80 мкм, помещенных в рабочую зону устройства с вращающимся электромагнитным полем в зависимости от индукции электромагнитного поля и массы их загрузки. Шламовые отходы, помещенные во вращающееся электромагнитное поле, совершают сложное движение: поступательно-колебательное и вращательно-колебательное.

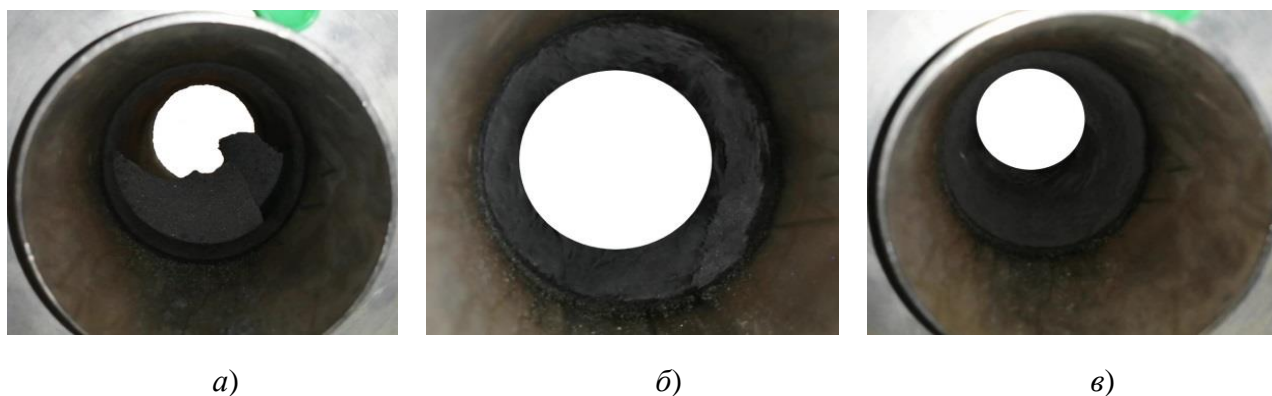


Рисунок 3.7. Характер движения шламовых частиц при различных частотах вращающегося электромагнитного поля:

*a* – 0 Гц; *б* – 60 Гц; *в* – 100 Гц



Определение индукции вращающегося электромагнитного поля, наводимого в экспериментальном устройстве, изготовленного для проведения экспериментальных исследований, проводилось с помощью тесламетра по схеме, представленной на рисунке 3.8. Результаты замеров магнитной индукции, наводимой в экспериментальном устройстве, отражены в таблице 3.6. На рисунке 3.9 приведен график изменения магнитной индукции вращающегося электромагнитного поля, реализуемого в условиях экспериментального устройства, в зависимости от частоты питающего тока индуктора и частоты вращения наводимого им магнитного поля.

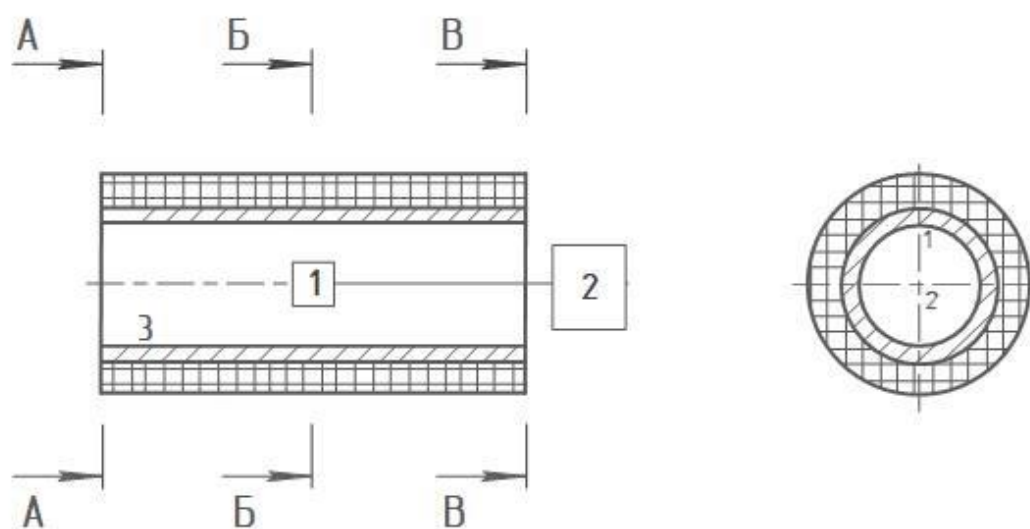


Рисунок 3.8. Схема измерения индукции вращающегося электромагнитного поля устройства:

1 – датчик Холла; 2 – тесламетр; 3 – индуктор устройства

Таблица 3.6

Значения магнитной индукции в различных точках экспериментального устройства, реализующего вращающееся электромагнитное поле

Частота питающего тока, Гц	Частота вращения магнитного поля, Гц	Магнитная индукция $B$ в различных точках индуктора, мТл						
		А-1	Б-1	В-1	А-2	Б-2	В-2	$B_{\text{ср}}$
50	100	8,7	8,8	8,6	8,8	8,9	8,8	8,8
40	80	8,5	8,6	8,4	8,5	8,7	8,5	8,5
30	60	8,2	8,3	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2
20	40	7,7	7,9	7,6	7,7	7,8	7,9	7,8
10	20	7,2	7,5	7,3	7,2	7,3	7,6	7,6

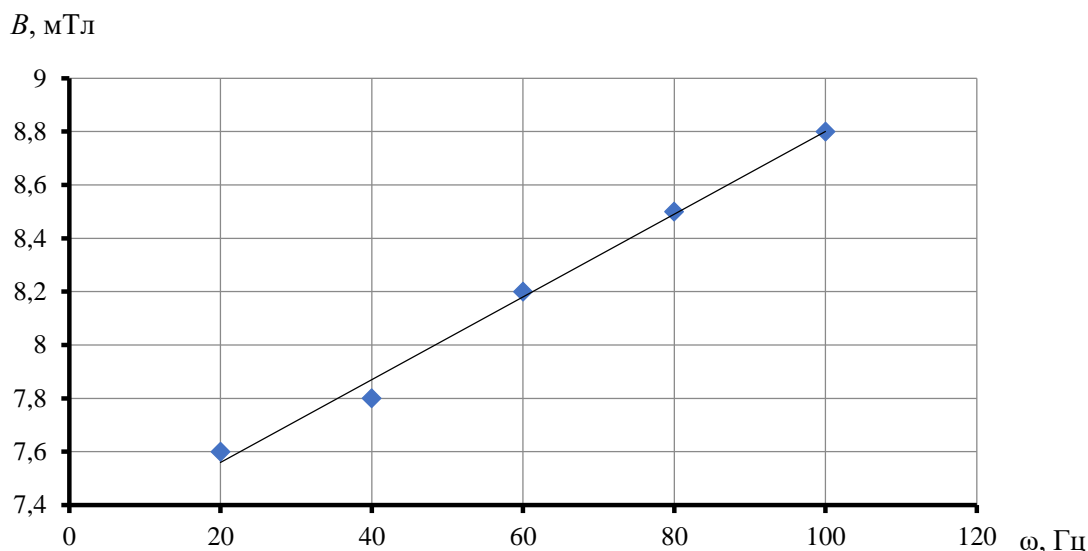


Рисунок 3.9. График изменения магнитной индукции вращающегося электромагнитного поля от частоты вращения магнитного поля

Замеры магнитной индукции в различных точках экспериментального устройства, реализующего вращающееся электромагнитное поле, позволяют сделать вывод о его однородности и сформировать представление о равномерности его воздействия на технологический материал и общую стационарность протекающего процесса.

Для исследования процессов взаимодействия конгломератов шлама и его ферромагнитных агрегатов в магнитовибрирующей фазе, оценки свойств поведения, их структурирования и фазовых переходов в работе был использован индукционный метод измерений. В основе этого метода положена зависимость индукционной ЭДС от индукции и частоты электромагнитного поля, а также магнитных и инерционных свойств ферромагнитных частиц магнитовибрирующего слоя. Для этих целей широкое применение находят измерительные катушки.

ЭДС, получаемая на выходе измерительной катушки, связана с магнитной индукцией вращающегося электромагнитного поля экспериментального устройства, в соответствии с законом электромагнитной индукции следующим соотношением:

$$\varepsilon = - \frac{d\psi}{dt}, \quad (3.1)$$

где  $\psi = N\Phi$  – потокосцепление;  $N$  – число витков измерительной катушки.

Магнитный поток, проходящий через контур катушки, определяется как

$$\Phi = BS_{\text{к}}, \quad (3.2)$$

где  $B$  – индукция вращающегося электромагнитного поля, [Тл];  $B = B_0 \cos \omega t$ ;  $B_0$  – амплитуда индукции вращающегося электромагнитного поля, [Тл];  $S_{\text{к}}$  – площадь контура катушки, [м<sup>2</sup>];  $S_{\text{к}} = \pi r^2$ ;  $r$  – средний радиус контура катушки, [м].

С учетом формул (3.1) и (3.2) индукционная ЭДС равна

$$\varepsilon = NB_0 \omega \pi r^2 \sin \omega t, \quad [\text{В}]. \quad (3.3)$$

Принимаем, что угловая скорость вращения электромагнитного поля равна  $\omega = \frac{2\pi f_{\text{T}}}{n}$ , где  $f_{\text{T}}$  – частота питающего тока, [Гц];  $n$  – количество пар полюсов устройства (в разработанной экспериментальной установке  $n = 3$ ).

Выражение, позволяющее рассчитать величину ЭДС индукции, наводимой в измерительной катушке в зависимости от индукции вращательного электромагнитного поля, будет иметь вид

$$\varepsilon = \frac{2}{3} NB_0 \pi^2 r^2 f_{\text{T}} \sin \omega t, \quad [\text{В}]. \quad (3.4)$$

Согласно формуле (3.4), эффективное значение ЭДС будет максимальным, когда плоскость измерительной катушки составит угол  $90^\circ$  к направлению силовой линии магнитного поля. Таким образом выражение (3.4) можно записать как

$$\varepsilon = \frac{2}{3} NB_0 \pi^2 r^2 f_{\text{T}}, \quad [\text{В}]. \quad (3.5)$$

Из (3.5) получим формулу, позволяющую по величине ЭДС индуктивного преобразователя определить амплитуду индукции вращающегося электромагнитного поля:

$$B_0 = \frac{3\varepsilon}{2N\pi^2 r^2 f_1}, \quad [\text{Тл}]. \quad (3.6)$$

Для оценки адекватности зависимости (3.5) применен индукционный метод измерения ЭДС, основой которого является датчик в виде катушки индуктивности. Для изготовления катушки использован каркас шириной  $H = 25$  мм и внутренним радиусом  $R_2 = 17,5$  мм. Обмоточный провод – ПЭЛ ГОСТ 2773-78 с диаметрами: по меди  $D_1 = 0,15$  мм, в изоляции  $D = 0,18$  мм. Площадь сечения провода –

$S = 0,01767 \text{ мм}^2$ . Измеренное сопротивление катушки составило 34,65 Ом. Индуктивность – 2,95 мГн. Общее число витков – 316, длина провода – 34,65 м.

Датчик относится к трансформаторному типу, так как сигналом служит приращение комплексного напряжения, возникающее в измерительной обмотке. По способу расположения датчик относится к проходному типу с наружным расположением. Измерительная катушка при контроле подключалась к устройству для обработки информации по схеме, приведенной на рисунке 3.10.

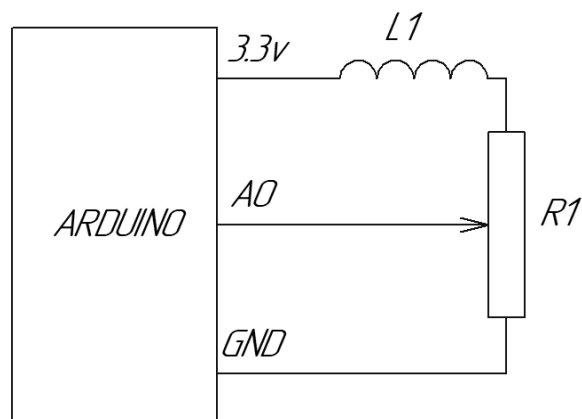


Рисунок 3.10. Схема подключения измерительной катушки к плате Arduino

В качестве устройства обработки и вывода информации использовалась плата Arduino на базе микроконтроллера ATmega328P (рисунок 3.11), позволяющая принимать, обрабатывать напряжение с катушки и передавать его на ПК.



Рисунок 3.11. Общий вид платы Arduino UNO R3



Плата Arduino имеет шесть каналов аналогового-цифрового преобразования (АЦП). Любой из них можно использовать в качестве аналогового входа. АЦП Arduino Uno имеет разрешающую способность 10 бит, что соответствует значениям целых чисел в диапазоне от 0 до  $2^{10} = 1\ 023$ . Это означает, что входное напряжение в диапазоне до 5 В преобразуется в целое число от 0 до 1 023. То есть одному цифровому значению (шагу) соответствует шаг аналогового напряжения  $5:1024 = 4,9$  мВ. Наиболее распространенная схема подключения компонентов представлена на рисунке 3.12.

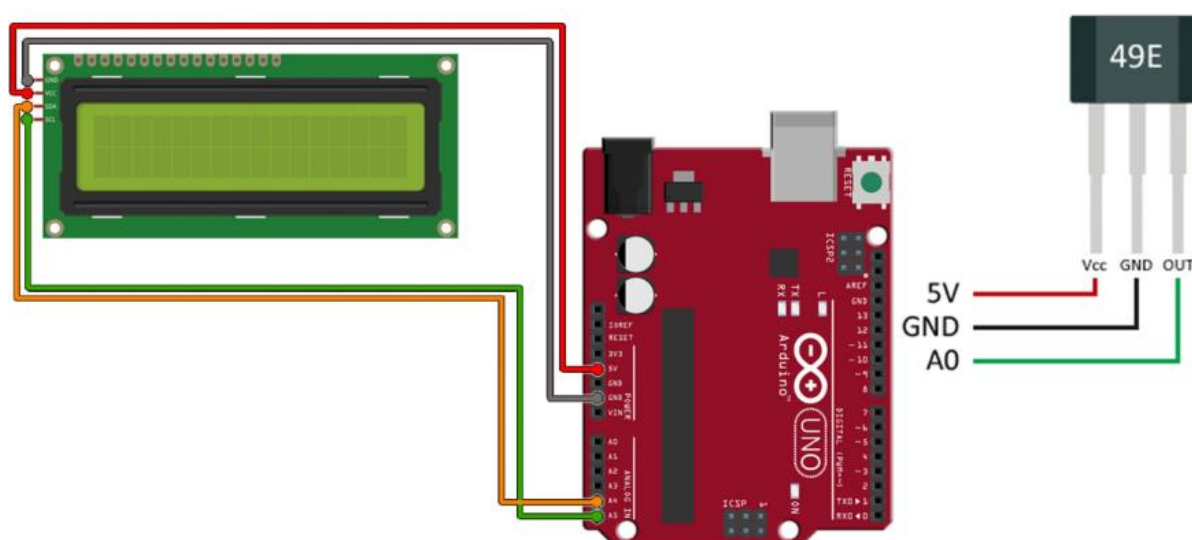


Рисунок 3.12. Схема подключения платы Arduino к измерительному датчику и дисплею

Для вывода сигнала с платы Arduino на ПК необходимо использовать соединение с помощью USB-кабеля, позволяющего производить питание платы и передачу данных. На ПК устанавливалось бесплатное программное обеспечение Arduino IDE, позволяющее производить прошивку микроконтроллера платы и выводить информацию в монитор порта или на плоттер.

В связи с тем, что плата Arduino через аналоговый вход может принимать для обработки напряжение значением максимум 5 В, в схему введен переменный резистор R1. Одновременно с функцией делителя напряжения он позволяет производить измерения напряжения больших значений. Максимальное сопротивление составляет

10 кОм. Измерительная катушка подключалась к опорному напряжению 3,3 В от платы и входу переменного резистора. Резистор соответственно заземлялся.

Значения ЭДС, наводимые в измерительной катушке, фиксировались в мониторе порта ПК, подключенного к плате Arduino через USB-кабель.

В таблице 3.7 приведены результаты измерения индукционной ЭДС, рассчитанные по формуле (3.5). На рисунке 3.13 проиллюстрирована зависимость индукционной ЭДС от индукции вращающегося электромагнитного поля.

Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных значения ЭДС показал, что их расхождение не превышает 5 %.

Таблица 3.7

Экспериментальные и расчетные значения ЭДС  
в различных точках рабочей зоны устройства с ВЭМП

Частота питающего тока, Гц	Расчётная частота вращения магнитного поля, Гц	Индукция ВЭМП, мТл	Расчетные значения ЭДС $\varepsilon_p$ , мВ	Точки координат замера ЭДС	Сечения замера ЭДС					
					А-А		Б-Б		В-В	
					$\varepsilon_3$	$\delta, \%$	$\varepsilon_3$	$\delta, \%$	$\varepsilon_3$	$\delta, \%$
50	100	8,8	267	0	255	4,5	255	4,5	254	4,9
				2	254	4,9	257	3,7	256	4,1
				3	256	4,1	255	4,5	258	3,4
40	80	8,5	206,6	0	198	4,2	216	4,5	215	4,1
				2	197	4,6	216	4,5	214	3,6
				3	198	4,2	216	4,5	216	4,5
30	60	8,2	149,5	0	143	4,3	142	5,0	144	3,7
				2	142,5	4,7	143	4,3	143	4,3
				3	143	4,3	142	5,0	143	4,3
20	40	7,2	94,8	0	96	1,3	98	3,4	98	3,4
				2	98	3,4	97	2,3	97	2,3
				3	99	4,4	99	4,4	96	1,3
10	20	7,6	46,1	0	44	4,6	44	4,6	44	4,6
				2	45	2,4	45	2,4	44	4,6
				3	45	2,4	47	2,0	45	2,4

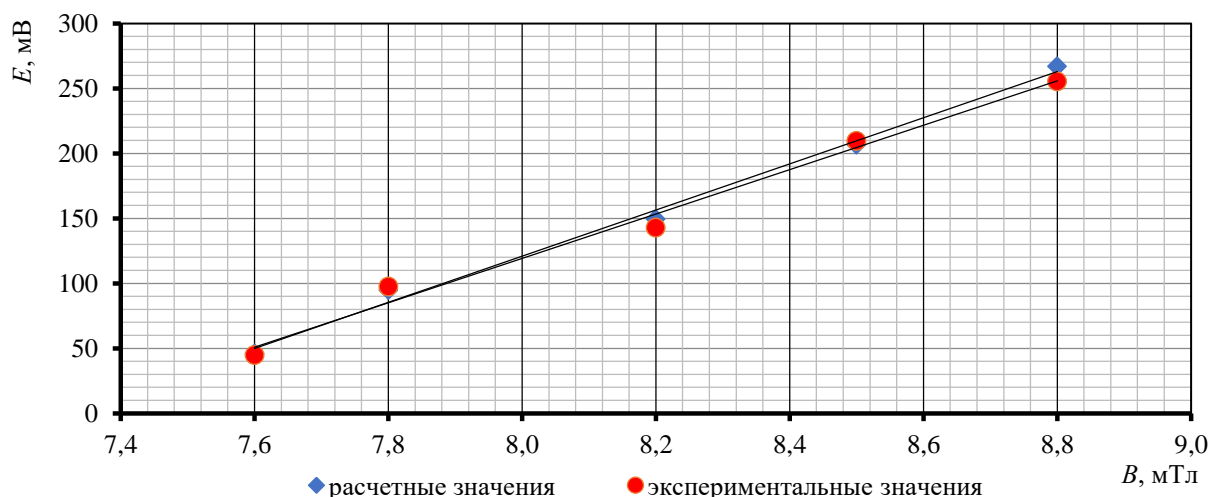


Рисунок 3.13. Зависимость индукционной ЭДС от индукции вращающегося электромагнитного поля

### 3.3.2. Влияние пространственной ориентации магнитного момента ферромагнитного агрегата во вращающемся электромагнитном поле на величину индукционной ЭДС

Магнитный момент ферромагнитного агрегата в магнитовибрирующем слое вследствие столкновительных процессов между ними ориентирован произвольно относительно плоскости измерительного витка.

Как было показано во второй главе, на ферромагнитный агрегат шламовых отходов во вращающемся электромагнитном поле действуют момент, стремящийся повернуть их вокруг центра масс, и переносная сила, смещающая их центры масс в направлении движения внешнего переменного электромагнитного поля. В результате этого их магнитные моменты под действием пондеромоторных сил совершают колебательно-вращательное и колебательно-поступательное движение по гармоническому закону в магнитном поле.

Для расчета ЭДС, наводимой в витке индукционного преобразователя, рассмотрим колебательно-вращательное движение магнитного момента ферромагнитного агрегата  $\vec{p}$ , описываемое гармоническим законом в плоскости измерительного витка  $XOZ$ , и поступательное движение вдоль оси  $OY$  (рисунок 3.14).

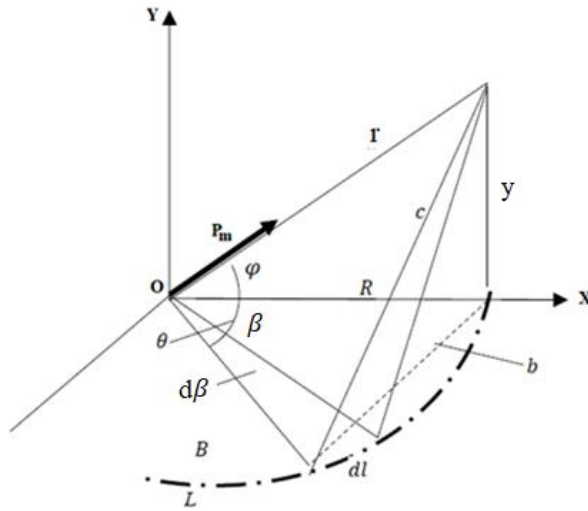


Рисунок 3.14. Ориентация магнитного момента  $\vec{p}_m$  в пространстве индукционного преобразователя

Выразим магнитный поток через поверхность, ограниченную контуром витка индукционного преобразователя  $L$ , в виде [34] выражения

$$\Phi = \oint_L^0 A_\varphi dl \cos(\vec{A}; d\vec{l}), \quad (3.7)$$

где  $A_\varphi$  – векторный потенциал поля, создаваемого магнитным моментом  $p_m$  ферромагнитного агрегата, который при симметричности магнитного поля равен

$$A_\varphi = \frac{\mu_0 \vec{p}}{4\pi r^2} \sin \theta \quad (3.8)$$

Из геометрических соотношений (рисунок 3.14) запишем соотношения:

$$\begin{cases} c^2 = r^2 \sin^2 \varphi + b^2; \\ c^2 = r^2 + R^2 \pm 2Rr \cos \theta; \\ b^2 = r^2 \cos^2 \varphi + R^2 + \pm 2Rr \cos \varphi \cos \beta, \end{cases}$$

из которых следует, что

$$\cos \theta = \cos \varphi \cos \beta. \quad (3.9)$$

С учетом формулы (3.9) выражение для векторного потенциала поля, создаваемого магнитным моментом агрегата, запишется следующим образом:

$$A_\varphi = \frac{\mu_0 \vec{p}}{4\pi r^2} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi \cos^2 \beta}, \quad (3.10)$$

а выражение (3.7) для определения магнитного потока будет иметь вид

$$\Phi = \frac{\mu_0 \vec{p} R \cos \varphi}{4\pi r^2} \int_0^{2\pi} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi \cos^2 \beta} d\beta, \quad (3.11)$$

при условии, что  $dl = R d\beta$  (см. рисунок 3.14) вектор  $\vec{A}$  совпадает с направлением вектора магнитного момента ферромагнитного агрегата  $\vec{p}_m$ , который составляет с осью  $OX$  угол, равный  $\varphi$ , и совершает колебательно-вращательное движение по закону

$$\varphi = \varphi_0 \cos \omega t, \quad (3.12)$$

что позволяет записать:

$$\cos(\vec{A}; d\vec{l}) = \cos\varphi. \quad (3.13)$$

Входящий в формулу (3.11) эллиптический интеграл, согласно [33], можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned} E(\xi, \beta) &= \int_0^{2\pi} \sqrt{1 - \xi^2 \cos^2 \beta} d\beta = \\ &= \frac{1}{2} \beta \left[ \sqrt{1 - \xi^2 \cos^2 \beta} + \frac{1}{k} \frac{\arccos(\xi \cos \beta)}{\cos \alpha} \right], \end{aligned} \quad (3.14)$$

где  $\xi = \cos \varphi$ .

При  $\beta = 2\pi$  получим

$$E(k, \beta) = \pi \left[ \sqrt{1 - \xi^2} + \frac{\varphi}{\xi} \right]. \quad (3.15)$$

Подставляя выражение для определения эллиптического интеграла (3.15) в (3.11) и представив  $\cos\varphi = R/r$ , запишем  $\Phi = \frac{\mu_0 \vec{p} R^2}{4r^3} \left[ \sqrt{1 - \xi^2} + \frac{\varphi}{\xi} \right]$ .

С учетом, что  $\xi = \cos \varphi$ ;  $\varphi = \varphi_0 \cos \omega t$ , формула для расчета магнитного потока единичного витка цепи индукционного преобразователя будет иметь вид

$$\Phi = \frac{\mu_0 \vec{p} R^2}{4r^3} \left[ \sin^2(\varphi_0 \cos \omega t) + \frac{\varphi_0 \cos \omega t}{\cos(\varphi_0 \cos \omega t)} \right]. \quad (3.16)$$

В предположении осесимметричности процессов взаимодействия ферромагнитного агрегата, совершающего колебательно-вращательное движение вокруг собственной оси и колебательно-поступательное в плоскости  $YOX$ , обусловленного ударным взаимодействием конгломератов во вращающемся электромагнитном поле, и представив  $r = \sqrt{R^2 + y^2}$ , выражение для магнитного потока (3.16) для дальнейших рассуждений можем записать в виде

$$\Phi = \frac{\mu_0 p_m R^2}{4\sqrt{(R^2 + y^2)^3}}, \quad (3.17)$$

где  $R$  – радиус индукционного витка, [м];  $y$  – амплитуда колебательно-поступательного движения ферромагнитного агрегата, [м].

Исходя из основного закона электромагнитной индукции и используя уравнение (3.2), после преобразований получим общую зависимость, устанавливающую величину ЭДС, наводимой в индукционном витке для координаты и скорости колебательного движения ферромагнитного агрегата, представляющего собой совокупность ферромагнитных частиц:

$$\varepsilon = \frac{3\mu_0 p_{\Sigma m} R^2 \omega^4 Q^2 \sqrt{(A^2 + \omega^2)^3}}{4\sqrt{[R^2 \omega^2 (A^2 + \omega^2) + Q^2]^5}}, [\text{В}], \quad (3.18)$$

где  $Q = \frac{p_m F}{p_i m}$ , [м/с<sup>2</sup>];  $A = \frac{k}{m}$ , [с<sup>-2</sup>];  $\mu_0$  – магнитная постоянная, [Н/А<sup>2</sup>];  $p_{\Sigma m}$  – суммарный магнитный момент ферромагнитных частиц, подвергаемых воздействию вращающегося электромагнитного поля, [Ам<sup>2</sup>];  $p_m, p_i$  – магнитный момент ферромагнитных частиц, [Ам<sup>2</sup>];  $m$  – масса частиц, [кг];  $F$  – сила взаимодействия агрегатов в магнитовибрирующем слое, [Н];  $\omega$  – угловая скорость вращающегося электромагнитного поля, [с<sup>-1</sup>];  $k$  – коэффициент сопротивления движения частиц, [кг/с].

Из выражения (3.18) следует, что основной вклад в индукционную ЭДС вносит магнитный момент ферромагнитной частицы, совершающей колебательно-вращательное и колебательно-поступательное движение.

Интенсивность движения ферромагнитных частиц в магнитовибрирующем слое зависит от параметров вращающегося электромагнитного поля, их размеров и ферромагнитных свойств. Для описания этого экспериментально подтвержденного факта, используя зависимость для определения магнитного момента (2.6) и приняв объём частиц, подвергаемых воздействию вращающегося электромагнитного поля равным  $V_{\text{мч}} = K\pi R^2 l$ , выражение (3.18) преобразуем к виду:

$$\varepsilon = \frac{3\pi B K R^4 l \cdot \omega^4 Q^2 \sqrt{(A^2 + \omega^2)^3}}{4\mu\sqrt{[R^2 \omega^2 (A^2 + \omega^2) + Q^2]^5}}, [\text{В}], \quad (3.19)$$

где  $l$  – активная длина измерительной катушки, [м];  $K$  – коэффициент, определяющий величину соотношения объёма частиц, загружаемых в кювету, к общему объёму активной зоны измерительной катушки  $K < 1$ .

Анализ соотношения  $Q = \frac{p_m F}{p_i m}$  показал, что оно по своей физической сущности определяет ускорение колебательно-поступательного движения ферромагнитных частиц массой  $m$  в магнитовибрирующем слое, с учетом их разрушения в процессе ударно-импульсного взаимодействия. Как отмечается в работах [22–27; 34], посвящённых исследованиям кинетики частиц в магнитовибрирующем слое, величина ускорения частиц зависит от массы их загрузки в зону воздействия на них переменного магнитного поля. Установлено, что увеличение массы загрузки частиц уменьшает долю свободного от них объема зоны, находящейся под воздействием вращающегося электромагнитного поля. Следовательно, уменьшается длина свободного пробега частицы и запас её механической энергии при столкновении с другими частицами, что приводит к снижению эффекта их разрушения. Для учета этого экспериментально установленного факта в соотношение, описывающее ускорение колебательно-поступательного движения ферромагнитных частиц массой  $m$  в магнитовибрирующем слое, введём коэффициент  $\xi$ . Допустим, что это изменение ускорения носит линейный характер и определяется зависимостью:

$$\xi = 1 - K, \quad (3.20)$$

где  $\xi$  – коэффициент, учитывающий изменение величины ускорения в зависимости от количества конгломератов, загружаемых в активную зону измерительной катушки.

Разрушение конгломератов приводит к изменению их размеров и, как следствие, к изменению магнитных моментов. Величину этого изменения, определяемого отношением  $p_m/p_i$  с достаточной точностью можно оценить коэффициентом  $Z_p$ , определяющим среднестатистическую степень разрушения конгломератов (частиц) в результате протекания столкновительных процессов:

$$p_m/p_i = Z_p. \quad (3.21)$$

Таким образом, принятое соотношение  $Q$  представим в виде

$$Q = \frac{p_m F}{p_i m} = \frac{Z_p(1-K)F}{m}, \quad [\text{М/с}^2]. \quad (3.22)$$

Для определения силы межчастичного взаимодействия  $F$ , входящей в выражение (3.22), используем формулу, предложенную в работе [34], записав её следующим образом:

$$F = \frac{\mu_0 p_m p_i}{2\pi r_m r_i (r_m + r_i)^2}, \quad [\text{Н}], \quad (3.23)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная,  $[\text{А}/\text{м}^2]$ ;  $p_m, p_i$  – магнитные моменты частиц,  $[\text{Ам}^2]$ ;  $r_m, r_i$  – радиусы описываемой окружности частиц,  $[\text{м}]$ .

С учетом (3.21) получим:

$$F = \frac{\mu_0 p_m^2 Z_p^2}{2\pi r_m^4 (Z_p + 1)^2}, \quad [\text{Н}]. \quad (3.24)$$

Используя зависимость для определения магнитного момента (2.6) и приняв объём исходной ферромагнитной частицы, помещенной в активную зону измерительной катушки, равным  $V_{\text{ч}} = 0,5 D_{\text{исх}}^3$ , выражение (3.24) преобразуем к виду:

$$F = \frac{4B^2 D_{\text{исх}}^2 Z_p^2}{\pi \mu_0 \mu (Z_p + 1)^2}, \quad [\text{Н}]. \quad (3.25)$$

Подставляя (3.25) в (3.22) и выразив массу исходных частиц как  $m = 0,5 \rho_{\text{ч}} D_{\text{исх}}^3$ , запишем выражение, позволяющее определить параметр  $Q$ , характеризующий ускорение колебательно-поступательного движения ферромагнитных частиц массой  $m$  в магнитовибрирующем слое, с учетом их разрушения в процессе ударно-импульсного межчастичного взаимодействия:

$$Q = \frac{8(1-K)B^2 Z_p^3}{\pi \mu_0 \mu (Z_p + 1)^2 \rho_{\text{ч}} D_{\text{исх}}}, \quad [\text{М}/\text{с}^2]. \quad (3.26)$$

Параметр  $A$ , входящий в формулу (3.19), определяет степень сопротивления поступательному движению ферромагнитных частиц в магнитовибрирующем слое. Для его оценки предлагается использовать зависимость, полученную с учетом формулы (2.20):

$$A = \frac{k}{m} = \frac{6\pi\eta}{\rho_{\text{к}} D_{\text{исх}}^2}, \quad [\text{с}^{-1}], \quad (3.27)$$

где  $\eta$  – динамическая вязкость воздуха при температуре  $20^\circ\text{С}$ , равная  $18,1 \cdot 10^{-6}$   $[\text{Па} \cdot \text{с}]$ ;  $\rho_{\text{к}}$  – плотность ферромагнитных частиц,  $[\text{кг}/\text{м}^3]$ .

На основе проведенного анализа и допущений получена формула для расчета величины ЭДС, наводимой ферромагнитными частицами в индукционном датчике:



$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon = \frac{3\pi B \cdot K R^4 \cdot l \cdot \omega^4 Q^2 \sqrt{(A^2 + \omega^2)^3}}{4 \cdot \mu \sqrt{[R^2 \omega^2 (A^2 + \omega^2) + Q^2]^5}}, \text{ [В]}; \\ Q = \frac{8(1-K)B^2 Z_p^3}{\pi \mu_0 \mu (Z_p + 1)^2 \rho_{\text{ч}} D_{\text{исх}}}, \text{ [М/с}^2\text{]}; \\ A = \frac{6\pi\eta}{\rho_{\text{к}} D_{\text{исх}}^2}, \text{ [с}^{-1}\text{]}. \end{array} \right. \quad (3.28)$$

Полученная зависимость (3.28) позволяет по величине и характеру изменения индукционной ЭДС провести анализ влияния режимов электромагнитного воздействия на характер и параметры движения конгломератов во вращающемся электромагнитном поле.

В таблице 3.8 и на рисунках 3.15–3.18 на основе расчетной зависимости (3.28) приведены результаты анализа влияния на изменение индукционной ЭДС различных параметров электромагнитного поля и ферромагнитной среды.

Таблица 3.8

Расчетные значения ЭДС, наводимой ферромагнитными частицами шлама

в индукционном датчике, с  $R = 17,5 \cdot 10^{-3}$  м,  $l = 25 \cdot 10^{-3}$  м,  $\mu = 1$

$B$ , мТл	$\omega$ , Гц	$D_{\text{исх}}$ , мкм	$A$ , с <sup>-1</sup>	$K$	$Z_p$	$\varepsilon_{\text{чр}}$ , мВ
7,6	20	40	27,3	0,2	1	1 237
8,2	60	40	27,3	0,2	1	1 606
8,8	100	40	27,3	0,2	1	555
8,8	100	20	109,2	0,2	1	1 087
8,8	100	60	12,1	0,2	1	261
8,8	100	40	27,3	0,1	1	351
8,8	100	40	27,3	0,3	1	637
8,8	100	40	27,3	0,5	1	542
8,8	100	40	27,3	0,7	1	273
8,8	100	40	27,3	0,2	3	1 436
8,8	100	40	27,3	0,2	5	1 743
9,35	140	40	27,3	0,2	1	283
9,95	180	40	27,3	0,2	1	135

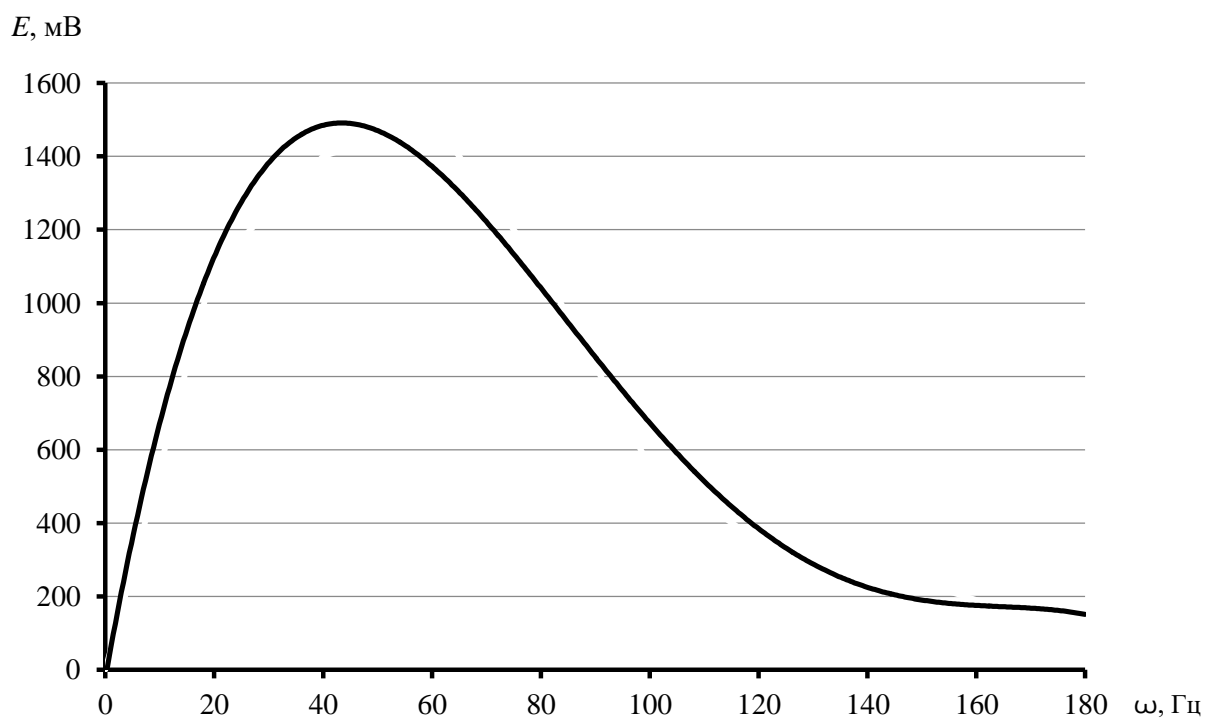


Рисунок 3.15. Зависимость индукционной ЭДС от угловой частоты магнитного поля  $\omega$ , Гц, при  $B = 8,8$  мТл,  $D_{исх} = 40$  мкм,  $K = 0,2$ ,  $Z_p = 1$

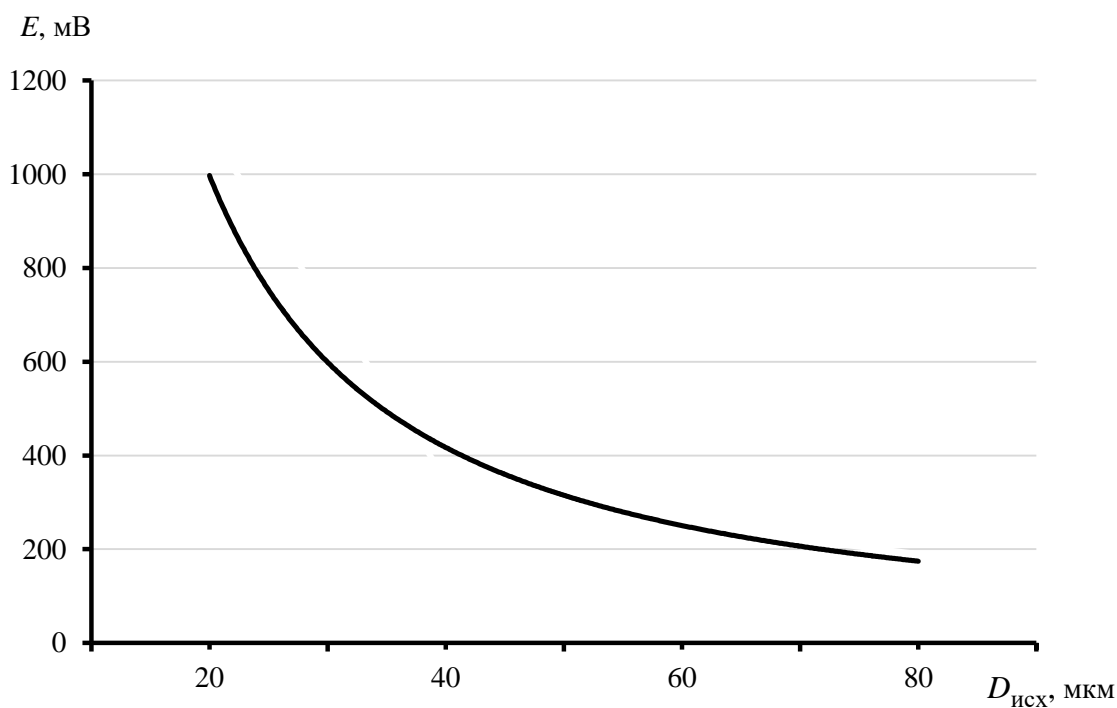


Рисунок 3.16. Зависимость индукционной ЭДС от размера ферромагнитных частиц  $D_{исх}$  при  $B = 8,8$  мТл,  $\omega = 100$  Гц,  $K = 0,2$ ,  $Z_p = 1$

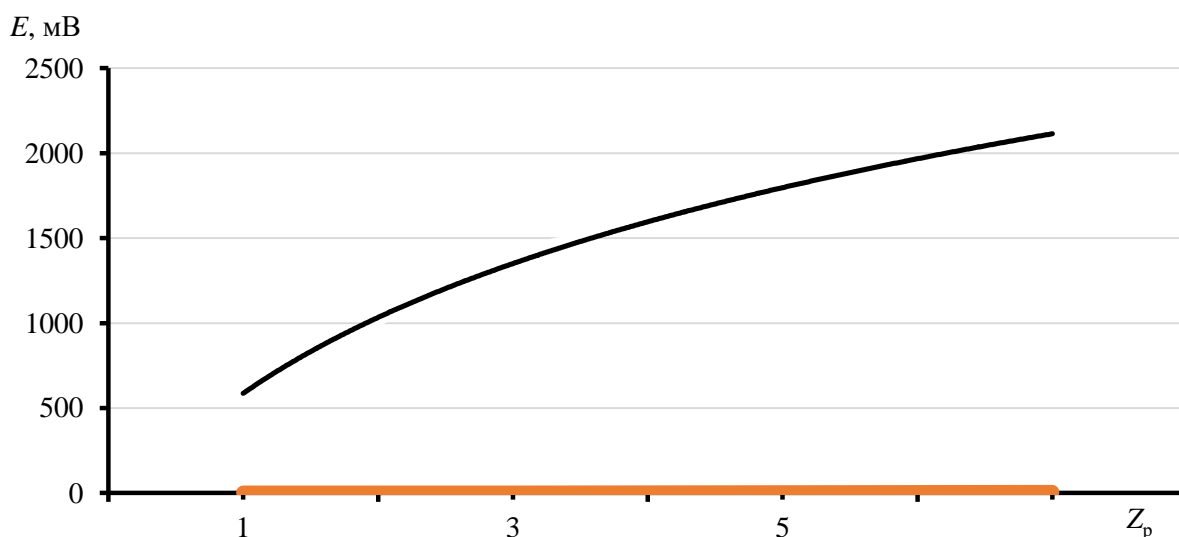


Рисунок 3.17. Зависимость индукционной ЭДС от параметра разрушения конгломерата  $Z_p$  при  $D_{исх} = 40$  мкм, при  $B = 8,8$  мТл,  $\omega = 100$  Гц,  $K = 0,2$

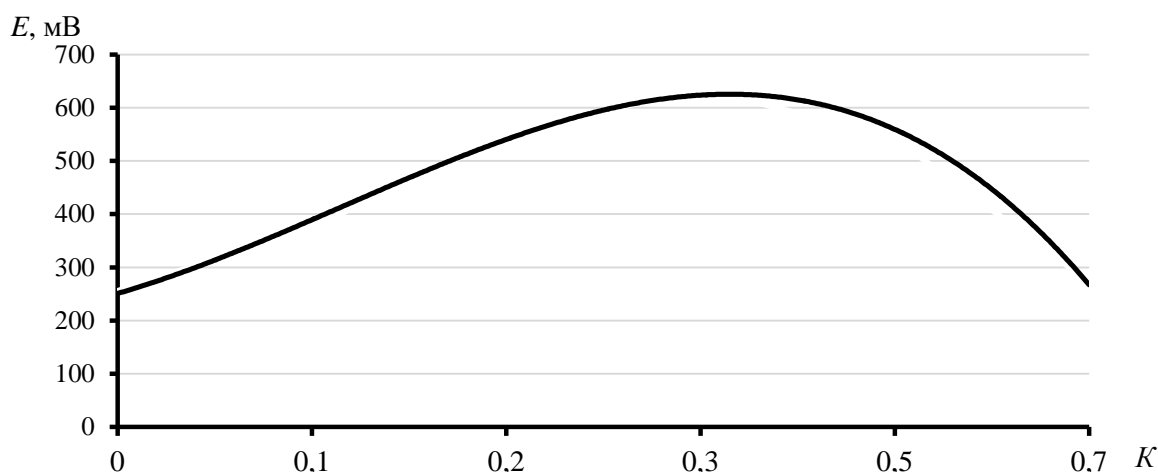


Рисунок 3.18. Зависимость индукционной ЭДС от степени загрузки ферромагнитных частиц  $K$  при  $D_{исх} = 40$  мкм,  $B = 8,8$  мТл,  $\omega = 100$  Гц

Как видно из рисунка 3.15, с увеличением угловой частоты магнитного поля значение индукционной ЭДС возрастает до значения 50 Гц, далее наблюдается спад до некоторого постоянного значения. Рисунок 3.16 показал, что с увеличением размера исходной ферромагнитной частицы значение индукционной ЭДС падает. На рисунке 3.17 с увеличением параметра разрушения индукционная ЭДС увеличивается. Как видно из рисунка 3.18, с увеличением степени загрузки наблюдается рост значения индукционной ЭДС, которое доходит до своего максимума при степени загрузки 0,35, далее наблюдается спад.

### 3.3.3. Исследования влияния вращающегося электромагнитного поля на физические параметры магнитовибрирующего слоя шлама

На рисунке 3.19 приведена принципиальная схема индукционного метода исследования интенсивности движения и энергетического состояния магнитовибрирующего слоя частиц конгломератов шлама в устройствах с вращающимся электромагнитным полем.

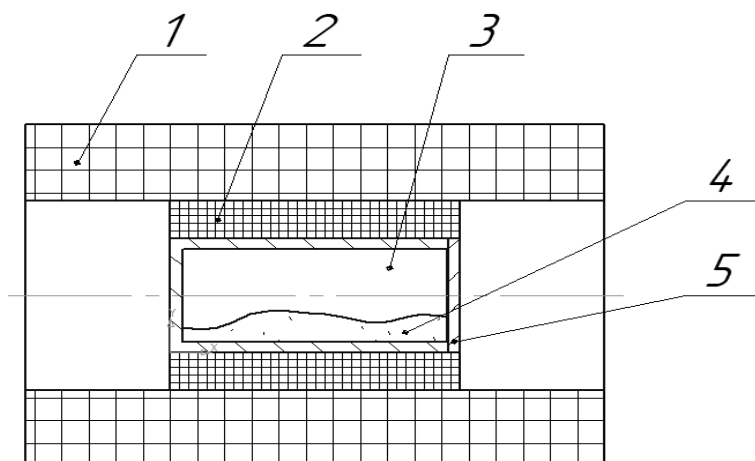


Рисунок 3.19. Принципиальная схема индукционного метода исследования состояния магнитовибрирующего слоя в условиях вращающегося электромагнитного поля:

1 – обмотки установки (возбуждающие обмотки); 2 – измерительная катушка; 3 – кювета;  
4 – измельченный шлам; 5 – крышка кюветы

Учитывая однородность магнитной индукции в рабочей зоне при выбранной частоте, для проведения исследований индуктивный датчик с кюветой размещался в центре рабочей зоны устройства и фиксировался по внутренней цилиндрической поверхности втулки, ограничивающей рабочую зону устройства.

На первом этапе фиксировалась индукционная ЭДС воспроизводимого индуктивным датчиком с пустой кюветой при выбранных параметрах устройства с ВЭМП. При этом проверялась соответствие ЭДС, наводимой в индукционном датчике вышеописанной конструкции с пустой кюветой и без кюветы, при  $N = 316$ ,  $r = 17,5$  мм,  $f_1 = 10, 20, 30$  и  $50$  Гц, продолжительность работы устройства – 5 с. Выборка полученных значений ЭДС приведена в таблице 3.9.

Таблица 3.9

Значения ЭДС наводимой в индукционном датчике при пустой кювете и без кюветы

Частота ВЭМП, Гц	$B$ , мТл	ЭДС без кюветы $\varepsilon_0$ , мВ	ЭДС с кюветой $\varepsilon_0$ , мВ	Погрешность, %
100	8,8	256	251	1,7
80	8,5	209	203	2,3
60	8,2	143	146	1,9
40	7,6	96	94,8	1,3
20	7,2	44	45	1,5

На следующем этапе проводились исследования изменения индукционной ЭДС в зависимости от состава и количества шлама, загружаемого в измерительную кювету. Объем заполнения кюветы изменялся от 0,3 до 0,5. Динамика поведения ферромагнитной среды и характер взаимодействия между её частицами в магнитном поле оценивались по изменению относительного сигнала ЭДС, наведенного в индуктивном датчике движущимися частицами исследуемой среды:

$$\varepsilon_{\text{отн}} = \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{(\varepsilon - \varepsilon_0)}{\varepsilon_0}, \quad (3.29)$$

где  $\varepsilon$  и  $\varepsilon_0$  – ЭДС, наведенная полем в индуктивном датчике движущейся средой и без неё соответственно.

План и результаты исследований представлены в таблицах 3.10, 3.11 и на рисунках 3.20, 3.21.

Таблица 3.10

Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных значений индукционной ЭДС

$B$ , мТл	$\omega$ , Гц	$D_{\text{исх}}$ , мкм	$A$ , $\text{с}^{-1}$	$K$	$Z_p$	$\varepsilon_{\text{чр}}$ , В	$\varepsilon_{\text{чэ}}$ , В	Погрешность, %
7,6	20,0	10	437,2	0,3	1,0	0,000006	0,0000062	3,1
8,2	60,0	30	48,6	0,2	1,0	0,004869	0,005	2,7
8,8	100,0	30	17,5	0,1	1,0	0,006654	0,0068	2,2

Таблица 3.11

Экспериментальные значения абсолютной и относительной индукционной ЭДС ( $E/\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon_0}$ )

при различном уровне загрузки ферромагнитной среды шлама

$\omega$ , Гц	$\varepsilon_0$ , мВ	Уровень загрузки кюветы средой $K$				
		0,1	0,2	0,3	0,5	0,7
100	251	362/0,44	643/1,56	548/1,18	419/0,67	252/0,004
60	146	760/4,2	1549/9,6	1343/8,2	3,7	307/1,1
20	45	360/7	1205/21	1080/23	12	730/4

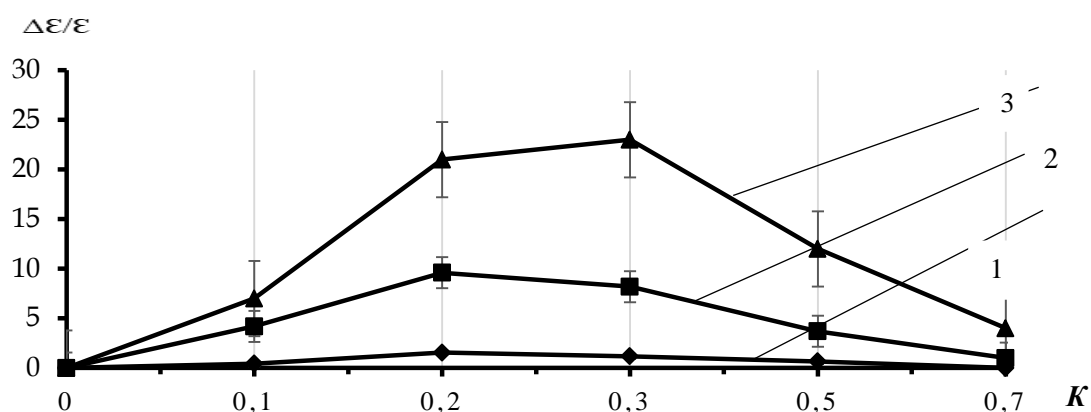


Рисунок 3.20. Экспериментальная зависимость относительного сигнала  $\Delta\varepsilon/\varepsilon$  от степени загрузки рабочей камеры ферромагнитной средой при различной частоте вращательного электромагнитного поля:

1 – 100 Гц; 2 – 60 Гц; 3 – 20 Гц

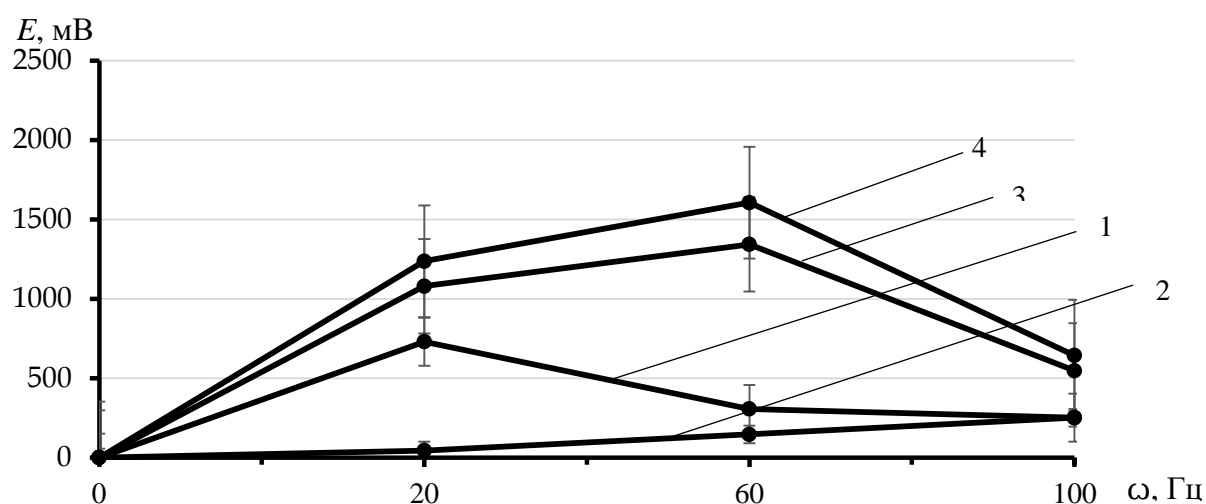


Рисунок 3.21. Экспериментальная зависимость индукционной ЭДС от угловой частоты магнитного поля  $\omega$  при степени загрузки рабочей камеры ферромагнитной средой  $K$ :

1 – 0,0; 2 – 0,7; 3 – 0,5; 4 – 0,3

Проведенные с применением индукционного метода экспериментальные исследования наглядно показали, что динамические характеристики конгломератов шламовых отходов зависят от индукции вращающегося поля. Как показано на рисунке 3.21, изменение индукции поля до значения 60 Гц способствует росту энергетической активности конгломератов в магнитовибрирующем слое. Процессы, обеспечивающие технологический эффект разрушения конгломератов шламовых отходов, протекают более интенсивно. Дальнейшее увеличение индукции приводит к снижению энергетической активности конгломератов в магнитовибрирующем слое, что и показал индукционный метод, зафиксировавший в этом диапазоне изменения индукции падение относительного сигнала. Это связано с тем, что при увеличении индукции уменьшается степень хаотизации конгломератов и из них начинают формироваться цепочные комплексы, скорость и амплитуда колебаний которых меньше скорости и амплитуды колебаний отдельных конгломератов.

### **3.4. Исследование процесса разделения конгломератов шламовых отходов на магнитную и немагнитные компоненты**

#### **3.4.1. Методика экспериментальных исследований**

Целью этого этапа экспериментальных исследований являлось:

- установление закономерностей и условий, обеспечивающих разделение конгломератов шламовых отходов на магнитную и немагнитные компоненты при их переработке во вращающемся электромагнитном поле;
- обоснование расчетных зависимостей по определению параметров магнитного поля и продолжительности переработки шламовых отходов во вращающемся электромагнитном поле;
- обоснование массоразмерного соотношения ферромагнитных и неферромагнитных компонентов в шламах – образцах шлифовального производства.

Для проведения исследований использовалась специальная оснастка, представленная на рисунке 3.22, состоящая из внешней 4 и внутренней 5 пластмассовых камер, которые последовательно устанавливались с зазором в рабочую зону устройства 5, реализующего вращающееся электромагнитное поле.

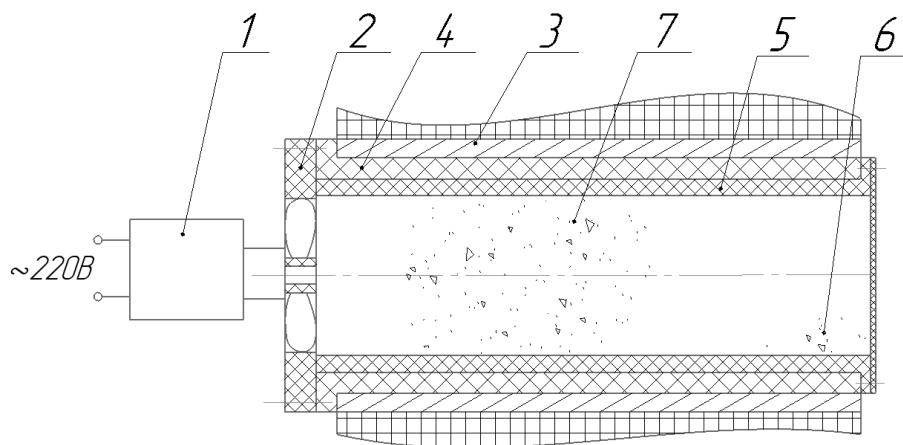


Рисунок 3.22. Технологическая схема исследований процесса разделения конгломератов шламовых отходов:

1 – блок питания; 2 – вентилятор; 3 – индуктор; 4 – внешняя камера; 5 – внутренняя камера; 6 – неферромагнитная компонента конгломератов; 7 – конгломерат шлама

На торце внутренней камеры 5 установлена сетка с размером ячейки  $1 \times 1$  мм, обеспечивающая нормальную работу вентилятора и предотвращающая высыпание частиц из камеры. С левой стороны рабочей зоны устройства 5 жестко закреплялся вентилятор 2 марки ЕС6025Н24В, диаметр которого составлял 60 мм. Переменное напряжение 220 В 50 Гц с помощью блока питания 1 АРV-12-24 преобразовывалось в постоянное 24 В, необходимое для работы вентилятора.

Исследования проводились в следующей последовательности:

1. Предварительно подготовленный шлам (освобожденный от ТЖ, просушенный в течение 4 ч в сушильном шкафу) помещался в мерную стеклянную емкость объемом  $0,00003 \text{ м}^3$  и массой  $M_0 = 0,014$  кг.

2. Стеклянная емкость со шламом взвешивалась на весах Losso CX-128, имеющих цену деления 0,001 г, и определялась масса засыпанного в стеклянную емкость шлама  $M_{\text{ш}} = M_1 - M_0$ , где  $M_1$  – масса стеклянной ёмкости со шламом.

3. Шлам с определенной массой  $M_{\text{ш}}$  засыпался во внутреннюю полость внутренней камеры 5 и вместе с ней вводился в рабочую зону устройства.

4. Устанавливались параметры магнитного поля согласно плану исследований.



5. После установки режимов и включения установки производился запуск вентилятора, который обеспечивал перемещение неферромагнитных частиц шлама к сетке.

6. Через установленный, согласно плану эксперимента, промежуток времени вентилятор выключался, и внутренняя камера 5 извлекалась из рабочей зоны устройства.

7. После удаления из рабочей зоны устройства внутренней камеры 5 с неферромагнитными частицами выключалось устройство, реализующее вращающееся электромагнитное поле, и из него извлекалась наружная камера 4 с ферромагнитными агрегатами.

8. Ферромагнитные агрегаты из наружной камеры 4 пересыпались в мерную стеклянную емкость и взвешивались. Определялась масса ферромагнитных агрегатов  $M_{\phi} = M_2 - M_0$ , где  $M_2$  – масса стеклянной ёмкости с ферромагнитными агрегатами.

9. Неферромагнитные частицы из внутренней камеры 5 пересыпались в мерную стеклянную емкость и взвешивались. Определялась масса неферромагнитных частиц  $M_{н\phi} = M_3 - M_0$ , где  $M_3$  – масса стеклянной ёмкости с ферромагнитными агрегатами.

10. Процентное содержание ферромагнитных и неферромагнитных компонентов в шламах – образцах определялось из соотношений  $M_{\phi} / M_{ш} \cdot 100 \%$ ;  $M_{н\phi} / M_{ш} \cdot 100 \%$ .

Повторяемость пунктов 1–10 осуществлялась для каждого исследования, предусмотренного планом экспериментальных исследований, приведенного в таблице 3.13.

Расчетные значения индукции вращающегося электромагнитного поля, обеспечивающего разделение конгломератов шламовых отходов на магнитную и немагнитные компоненты, для установленных планом экспериментальных исследований условий определялись по формуле (2.35) и сравнивались с экспериментальными значениями.

Продолжительность процесса разделения конгломератов шламовых отходов на магнитную и немагнитные компоненты экспериментально фиксировалась по времени стабилизации величины массы неферромагнитных частиц выделившихся из массы конгломератов, загружаемых в рабочую зону устройства. На основе этих данных по времени определялся коэффициент  $P$ , входящий в формулу (2.48), предложенный для оценки продолжительности процесса разделения конгломератов шламовых отходов на магнитную и немагнитные компоненты и представляющий собой вероятность события того, что за один цикл колебаний вращающегося электромагнитного поля произойдет разрушение конгломерата.

### 3.4.2. Результаты экспериментальных исследований

Результаты по обоснованию параметров ВЭМП, обеспечивающих разделение конгломератов шламовых отходов на магнитную и немагнитные компоненты, представлены в таблице 3.12. Пороговая величина индукции вращающегося электромагнитного поля, обеспечивающая разделение конгломератов выбранной для исследований среды шламовых отходов на магнитную и немагнитные компоненты определялась по формуле (2.40), при условии, что адгезионная прочность соединения конгломерата Fe-Si по данным [108] составляла  $0,4-0,47 \frac{Дж}{м^2}$ . В качестве варьируемого параметра исследований принималась частота вращающегося электромагнитного поля, которая изменялась в пределах 20–100 Гц. Время работы установки составляло 3–5 с. Масса загрузки контейнера средой составляла 10 г. Для выбранных условий определялась ЭДС по установленной зависимости (3.28). Индукция ВЭМП устанавливалась на уровне возможностей экспериментального устройства при частоте питающего тока 50 Гц.

Таблица 3.12

Результаты исследований эффекта разделения шламовых отходов на магнитную и немагнитную компоненты

Исследуемая среда и её характеристики	Пороговая величина индукции ВЭМП, мТл	Частота вращающегося поля, Гц	ЭДС, мВ	Экспериментальная индукция МВС, мТл	Наблюдаемость эффекта разделения
1	2	3	4	5	6
ООО «10-ГПЗ» $E_{адг} = 0,47 \frac{Дж}{м^2}$ $D_k = 80 \text{ мкм}$	2,35	20	1 100	8,8	Эффект выделения немагнитной компоненты (песка) наблюдается
		60	1 500		
		100	555		

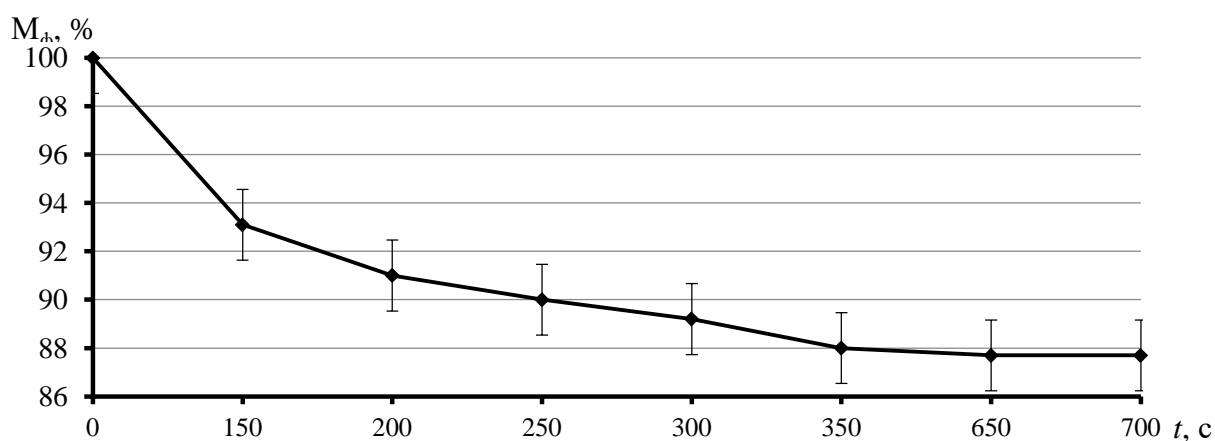
1	2	3	4	5	6
АО «РГА» $E_{адг} = 0,47 \frac{Дж}{м^2}$ $D_k = 80 \text{ мкм}$	2,35	20	1 100	8,8	Эффект выделения немагнитной компоненты (песка) наблюдается
		60	1 500		
		100	555		
ПАО «ТАНТК им. Г.М. Бериева» $E_{адг} = 0,47 \frac{Дж}{м^2}$ $D_k = 80 \text{ мкм}$	2,35	20	1 100	8,8	Эффект выделения немагнитной компоненты (песка) наблюдается
		60	1 500		
		100	555		

Как показала серия экспериментальных исследований, эффект выделения из шламовых отходов немагнитных компонент наблюдается при всех режимах работы опытно-экспериментальной установки.

Следующая серия экспериментальных исследований предусматривала оценку продолжительности переработки шламовых отходов во вращающемся электромагнитном поле и установление массоразмерного соотношения, входящих в состав шламовых отходов ферромагнитных и неферромагнитных компонентов. Обработке во вращающемся электромагнитном поле подвергался шлифовальный шлам ООО «10-ГПЗ» при режимах, обеспечивающих превышение пороговой величины индукции магнитного поля выбранного для исследований вида шлама, определяемой по формуле (2.40), при которой реализуется процесс разрушения её конгломератов: при частотах вращающегося электромагнитного поля 20, 60 и 100 Гц. Время обработки шлама изменялось до момента прекращения выделения из шлама неферромагнитной компоненты. Результаты исследований приведены в таблице 3.13 и проиллюстрированы на рисунке 3.23.

Результаты исследований разрушения конгломератов шлифовального шлама  
в зависимости от продолжительности воздействия на него вращающегося электромагнитного поля

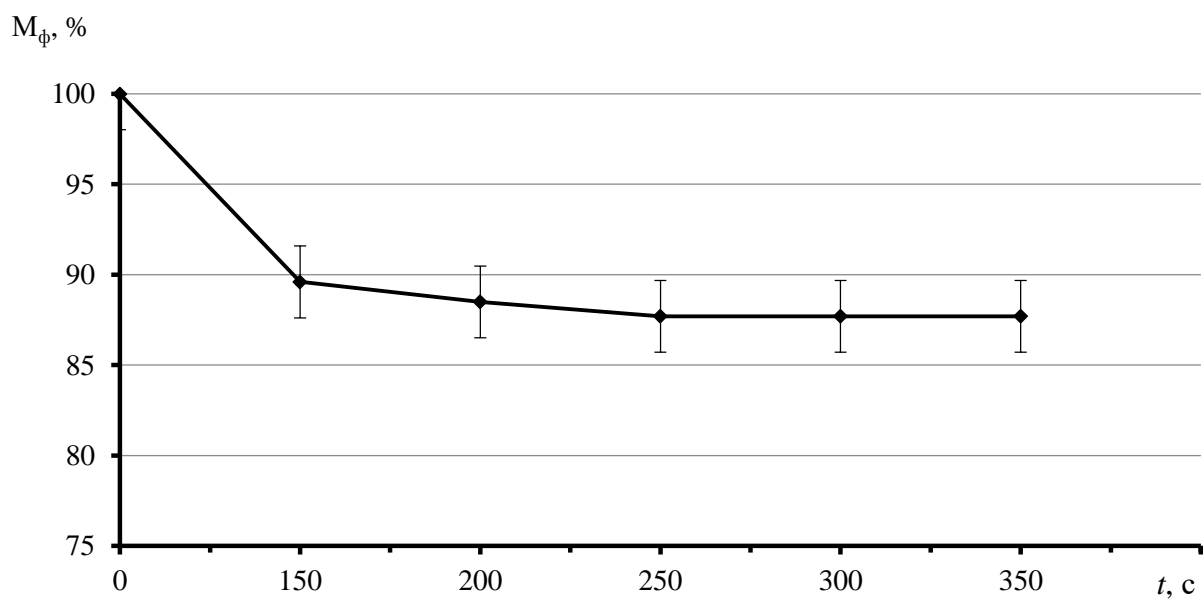
Частота ЭМП, Гц	№ опыта	Исходная масса шлама $M_0$ , г	Время обработки, с	Масса ферромагнитных частиц		Масса неферромагнитных частиц	
				$M_{\text{ф}}$ , г	%	$M_{\text{нф}}$ , г	%
20	1	10	150	9,31	93,1	0,69	6,9
	2	10	200	9,1	91	0,9	9
	3	10	250	9	90	1	10
	4	10	300	8,92	89,2	1,08	10,8
	5	10	350	8,8	88	1,2	12
	6	10	650	8,77	87,7	1,23	12,3
60	1	10	150	8,96	89,6	1,04	10,4
	2	10	200	8,85	88,5	1,15	11,5
	3	10	250	8,77	87,7	1,23	12,3
	4	10	300	8,769	87,69	1,231	12,31
	5	10	350	8,769	87,69	1,231	12,31
	6	10	650	8,769	87,69	1,231	12,31
100	1	10	150	9,28	92,8	0,72	7,2
	2	10	200	9	90	1	10
	3	10	250	8,91	89,1	1,09	10,9
	4	10	300	8,8	88	1,2	12
	5	10	350	8,77	87,7	1,23	12,3
	6	10	650	8,77	87,7	1,23	12,3



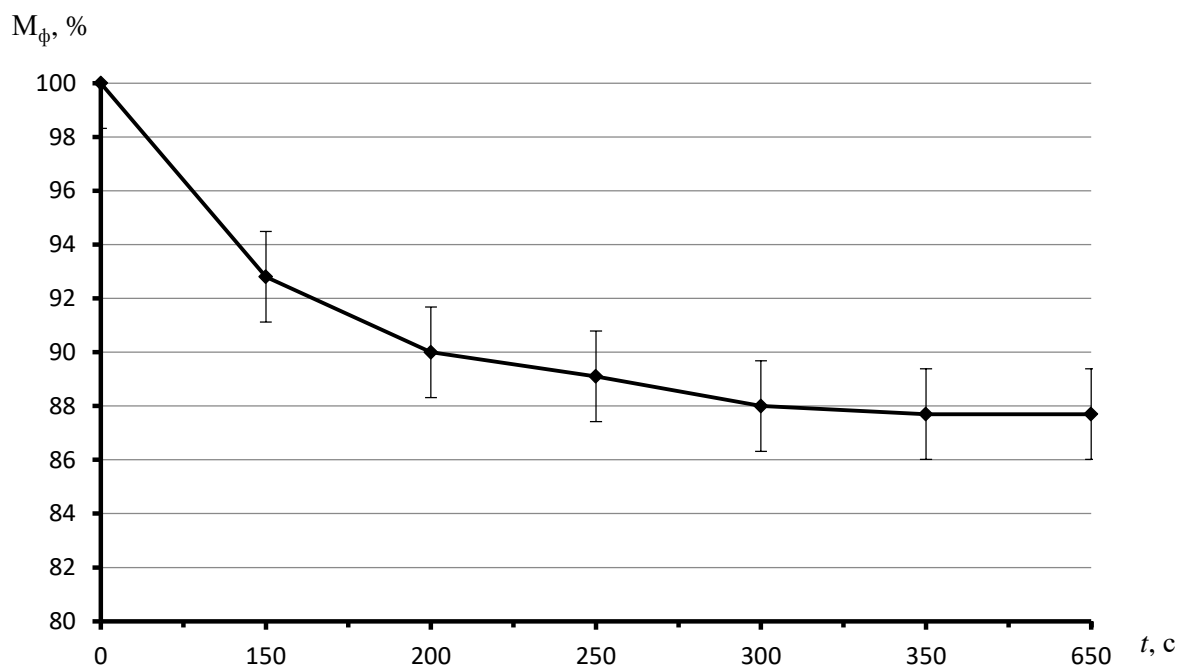
а)

Рисунок 3.23. Зависимость относительной массы отделившихся ферромагнитных частиц от времени при частотах вращающегося электромагнитного поля:

$a$  – 20 Гц;  $b$  – 60 Гц;  $c$  – 100 Гц (начало; окончание см. на с. 77)



б)



в)

Рисунок 3.23. Окончание (начало см. на с. 76)

На рисунке 3.24 приведены зависимости относительной массы отделившегося абразива от времени, в течение которого проводилось разделение. С увеличением времени разделения происходил постепенный рост количества отделившегося абразива. С увеличением частоты вращающегося электромагнитного поля происходило увеличение скорости отделения абразива (рисунок 3.25).

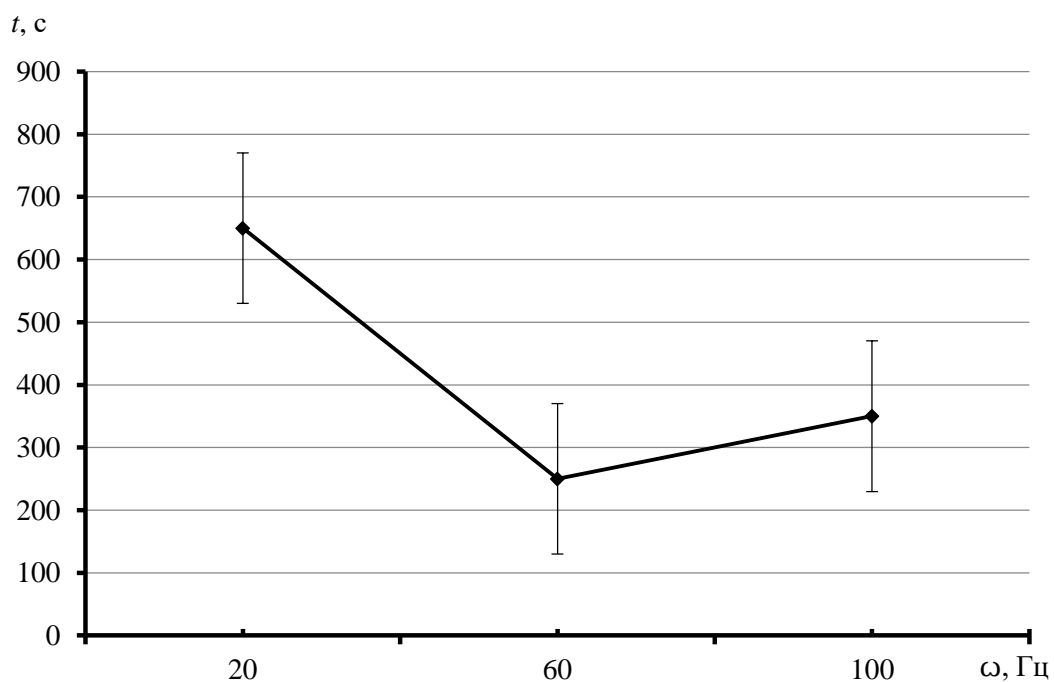


Рисунок 3.24. Зависимость времени от частоты вращающегося электромагнитного поля, при котором происходит разделение

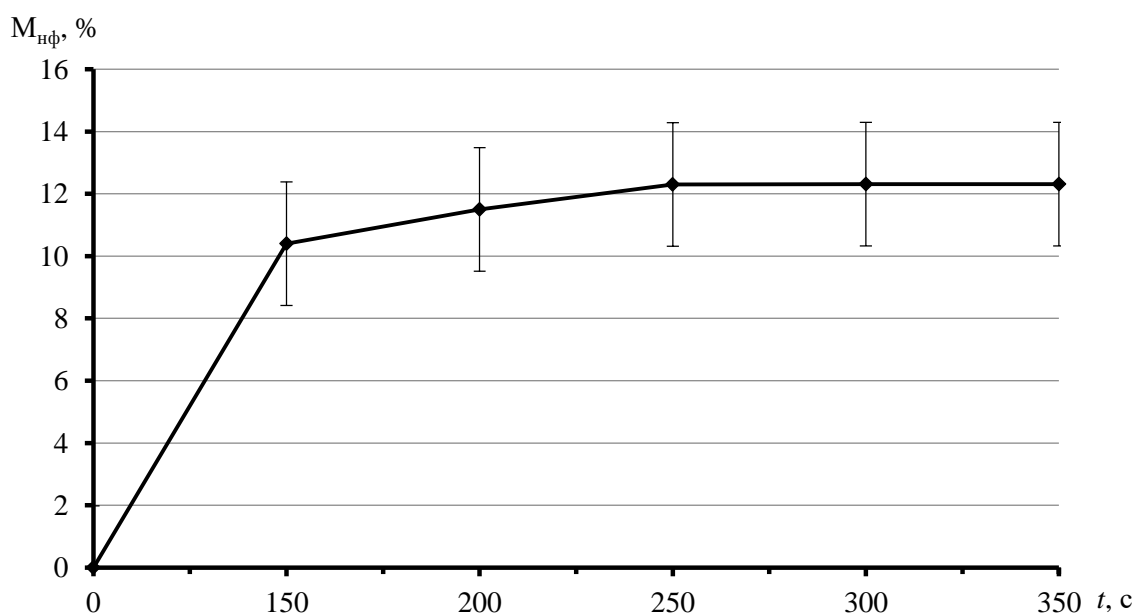


Рисунок 3.25. Зависимость относительной массы отделившихся неферромагнитных частиц от времени при частоте вращающегося электромагнитного поля 60 Гц

Как показали экспериментальные исследования, наибольшая скорость разделения наблюдается при частоте вращающегося поля 100 Гц. Данный режим характеризуется максимальной хаотизацией шлама по всему объему рабочей камеры.

В таблице 3.14 приведён сравнительный анализ экспериментальных значений продолжительности разрушения исследуемого шлама и расчетных значений, выполненных по формуле (2.49) при условии, что коэффициент интенсивности  $P = 1$ .

Таблица 3.14

Определение коэффициента интенсивности  $P$  разрушения конгломерата

Частота ВЭП $\omega$ , Гц	Экспериментальное время $t$ , с	Расчетное время $t$ , с	$P$
20	650	2,47	$3,8 \times 10^{-3}$
60	250	1,03	$4,1 \times 10^{-3}$
100	350	0,63	$1,8 \times 10^{-3}$

Для проверки адекватности расчетной зависимости (2.49), используя график на рисунке 3.26, в таблице 3.15 приведены сравнительные результаты оценки продолжительности разрушения для образцов шламовых отходов ПАО «ТАНТК им. Г.М. Бериева» и АО «РГА».

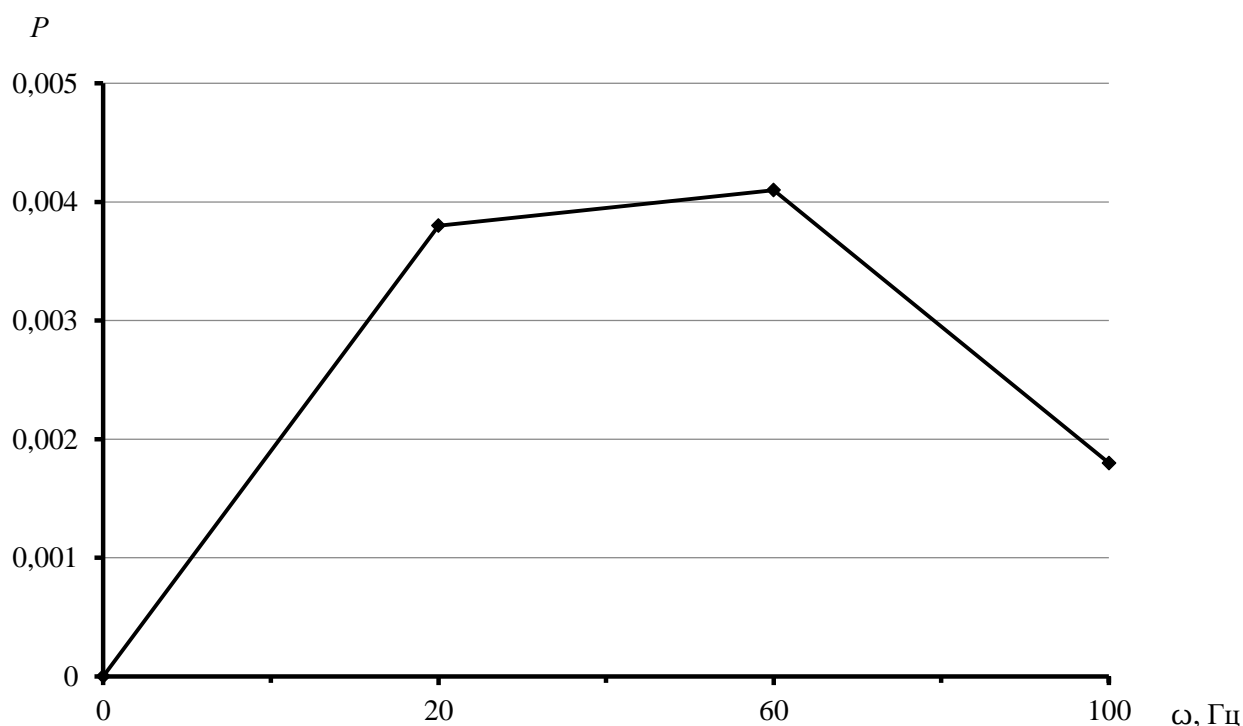


Рисунок 3.26. Зависимость коэффициента интенсивности разрушения от частоты вращающегося электромагнитного поля

Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных значений продолжительности процесса разрушения конгломератов на основные компоненты

Среда	Частота ВЭП $\omega$ , Гц	$P$	Расчетное время $t$ , с	Экспериментальное время $t$ , с	$\delta$ , %
ПАО «ТАНТК им. Г.М. Бериева»	20	$3,8 \times 10^{-3}$	672	641	4,5
	60	$4,1 \times 10^{-3}$	208	200	4
	100	$1,8 \times 10^{-3}$	284	266	5,8
АО «РГА»	20	$3,8 \times 10^{-3}$	672	637	5,2
	60	$4,1 \times 10^{-3}$	208	200	4
	100	$1,8 \times 10^{-3}$	284	264	6,7

### 3.5. Исследование процесса измельчения ферромагнитных агрегатов шламовых отходов

#### 3.5.1. Методика экспериментальных исследований

Целью этого этапа экспериментальных исследований являлось:

- установление закономерностей и условий, обеспечивающих измельчение ферромагнитных агрегатов шламовых отходов при их переработке во вращающемся электромагнитном поле;
- обоснование расчетных зависимостей по определению параметров магнитного поля и продолжительности измельчения ферромагнитных агрегатов во вращающемся электромагнитном поле до получения из них частиц заданного гранулометрического размера.

Контроль процесса измельчения ферромагнитных агрегатов проводился методом измерения удельного электрического сопротивления, сущность которого заключается в оценке падения напряжения на участке спрессованного материала при прохождении через него постоянного тока. Для реализации этого метода была разработана специальная матрица, конструкция и основные размеры которой представлены на рисунке 3.27.



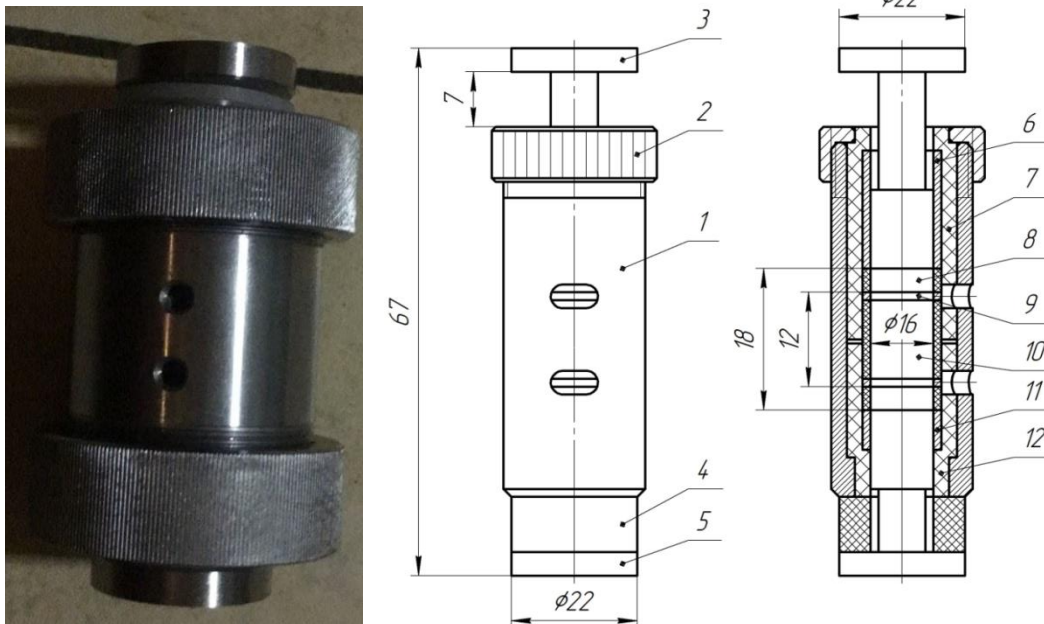


Рисунок 3.27. Конструкция матрицы:

1 – корпус; 2 – гайка; 3, 5 – пуансон; 4, 7, 8, 10, 12 – пластмассовая втулка;

6, 11 – токовый зонд; 9 – токосъемные шайбы

В корпусе матрицы установлены изоляционные втулки из пластмассы, токовые зонды и токосъемные шайбы. Неподвижность деталей в осевом направлении обеспечивается затяжкой гайки. В корпусе и втулках 7, 12 выполнены пазы для обеспечения возможности пайки проводов к токосъемным шайбам после сборки конструкции. Во внутреннюю полость матрицы устанавливаются два пуансона, между которыми находится исследуемый объем шлама. Перемещение в осевом направлении нижнего пуансона ограничивает дистанционная втулка 4. Рабочее сечение матрицы принято равным  $200 \text{ мм}^2$ .

Матрица с исследуемым объемом агрегатов устанавливается на пресс, обеспечивающий давление  $6,12 \text{ МПа}$  ( $60 \text{ кгс/см}^2$ ). Контроль усилия нагружения производится с помощью динамометра типа ДОС.

Контроль удельного электрического сопротивления реализуется с помощью измерительной цепи, схема которой показана на рисунке 3.28. К проводам токосъемных шайб подключается милливольтметр 1202 1-го класса точности для измерения падения напряжения на контролируемом образце. К нижнему пуансону подключается амперметр Э539 0,5 класса точности для измерения значения силы тока.

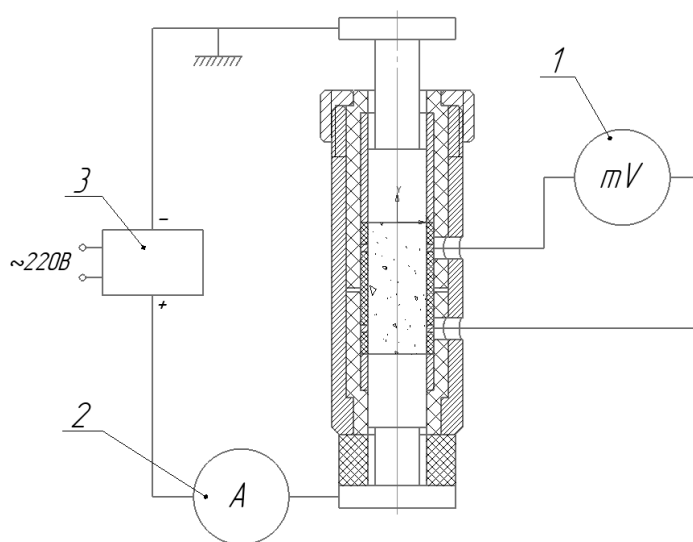


Рисунок 3.28. Схема измерительной цепи:

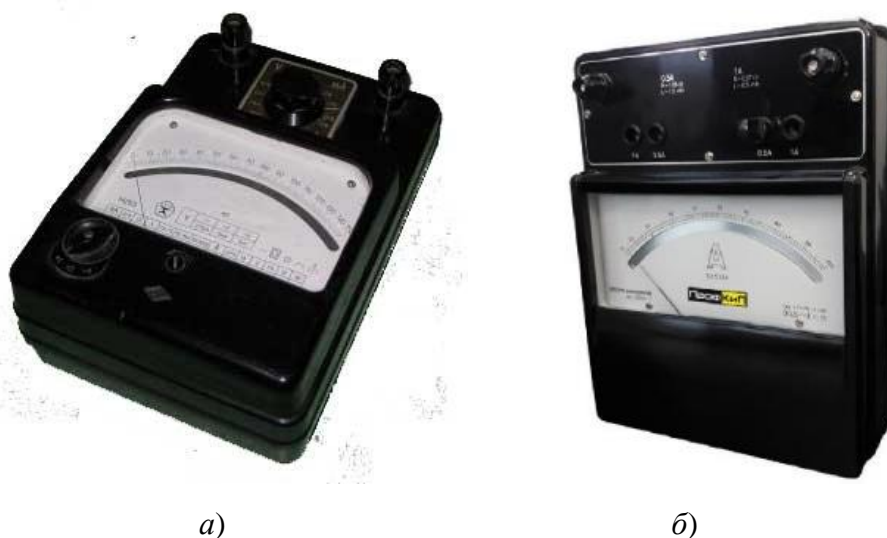
1 – милливольтметр; 2 – амперметр; 3 – источник питания

Значение удельного электрического сопротивления  $\rho_R$  рассчитывалось по формуле

$$\rho_R = \frac{U S}{I l}, [\text{Ом} \cdot \text{м}], \quad (3.30)$$

где  $U$  – падение напряжения, [В];  $S$  – сечение матрицы, [м<sup>2</sup>];  $I$  – сила тока, [А];  $l$  – расстояние между потенциальными зондами, [м].

На рисунке 3.29 и в таблицах 3.16 и 3.17 приведены технические характеристики и внешний вид измерительных приборов.



а)

б)

Рисунок 3.29. Измерительные приборы:

а – милливольтметр 1202; б – амперметр Э539

Таблица 3.16

## Техническая характеристика милливольтметра 1202

Предел допускаемой основной погрешности	Диапазон измерений, мВ	Габаритные размеры, мм	Класс точности	Рабочие условия применения	Масса, кг
±1	0–750	200×105×270	1	Температура от 10 до 35 °С; относительная влажность 80 % (при 30 °С)	3,3

Таблица 3.17

## Технические характеристики амперметра Э539

Предел допускаемой основной погрешности	Конечное значение диапазона измерений, В/А	Область частот, Гц		Рабочие условия применения	Масса, кг
		Нормальная	Рабочая		
±0,5	5/10	45–100	100–1500	Температура от 5 до 40 °С; относительная влажность 80 % (при 25 °С)	1,25

Источник питания обеспечивал преобразование переменного напряжения 220 В 50 Гц в постоянное напряжение 24 В 0,5 А. Кроме того, предусмотрена стабилизация по напряжению. Внешний вид блока питания и основные технические характеристики представлены на рисунке 3.30 и в таблице 3.18.



Рисунок 3.30. Блок питания APV-12-24

Технические характеристики блока питания APV-12-24

Выходное напряжение, В	Выходной ток, А	Мощность, Вт	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
24	0,5	12	77×40×29	0,08

Порядок проведения экспериментальных исследований:

1. Для исследований использовалась ферромагнитная среда, полученная после очистки конгломератов шлама во вращающемся электромагнитном поле от неферромагнитной компоненты.

2. Ферромагнитная среда путем ситового метода разделялась на гранулометрические по размеру фракции. Рассев порошка на отдельные фракции проводился на ситовом анализаторе А20 с виброприводом ВП-Т/220 производства ООО «Вибротехник» Средний линейный размер частиц каждой фракции уточнялся с помощью микроскопического анализа, проводимого на электронном микроскопе. Насыпная плотность и плотность после утряски полученных порошков определялись по известным механическим и весовым методикам [37; 92].

3. Масса среды каждой фракции помещалась в мерные стеклянные пробирки диаметром 16 мм.

4. Полученному объему, помещенному в матрицу, сообщалось давление 6 МПа в течение 1 мин при совпадении риски верхнего пуансона с торцом матрицы. Таким образом, размеры каждого спрессованного образца составляли:  $d = 16$  мм,  $l = 18 \pm 0,1$  мм.

5. Согласно схеме, представленной на рисунке 3.28, через верхний и нижний пуансоны пропускался электрический ток 24 В 0,5 А и с помощью милливольтметра отсчитывалось падение напряжения.

6. На основе полученных данных строились регрессионные модели, описывающие зависимость размера частиц среды от удельного сопротивления.

7. Среда после обработки в предлагаемом устройстве проходила выше указанные операции (п. 3–5), после чего с помощью регрессионных моделей (п. 6) по рассчитанному значению удельного сопротивления определялся размер частиц (продолжительность процесса измельчения).

### 3.5.2. Результаты экспериментальных исследований

На первом этапе экспериментальных исследований было проведена проверка приемлемости расчетной зависимости (2.46), определяющей величину пороговой индукции, при которой обеспечивается эффект измельчения ферромагнитных агрегатов во вращающемся электромагнитном поле. В таблице 3.19 приведены результаты изменения величины удельного сопротивления спрессованных образцов ферромагнитной среды, подвергнутой воздействию вращающегося электромагнитного поля при различных частотах и продолжительности обработки в течение 30 с.

Таблица 3.19

Результаты исследований эффекта измельчения ферромагнитных частиц

Ферро-магнитная среда	Исходное удельное сопротивление среды, Ом·м	Пороговая величина индукции (при $Z_{н} = 10$ ), мТл	Экспериментальная Величина индукции, мТл	Частота магнитного поля, Гц	Удельное Сопротивление, Ом·м	Средний диаметр измельченных частиц, мкм
ООО «10-ГПЗ» $D = 60$ мкм $\sigma_{в} = 250$ МПа	0,185	5,5	8,8	20	0,16	52
				60	0,15	40
				100	0,17	55
ПАО «ТАНТК им. Г.М. Бериева» $D = 60$ мкм $\sigma_{в} = 250$ МПа	0,185	5,5	8,8	20	0,17	55
				60	0,16	52
				100	0,165	55

Проведённые исследования показали, что принятая величина индукции вращающегося электромагнитного поля обеспечивает эффект измельчения ферромагнитных частиц, о чем свидетельствуют изменения удельного сопротивления спрессованных образцов после обработки. Кроме того, полученные за установленный промежуток времени воздействия на частицы магнитовибрирующего слоя, среднестатистические размеры частиц зависят от частоты вращающегося электромагнитного поля. Установлено, что при увеличении частоты до 60 Гц

(рисунок 3.31) процессы измельчения протекают более интенсивно. Дальнейший рост частоты снижает интенсивность измельчения в связи с уменьшением степени хаотизации частиц в магнитовибрирующем слое.

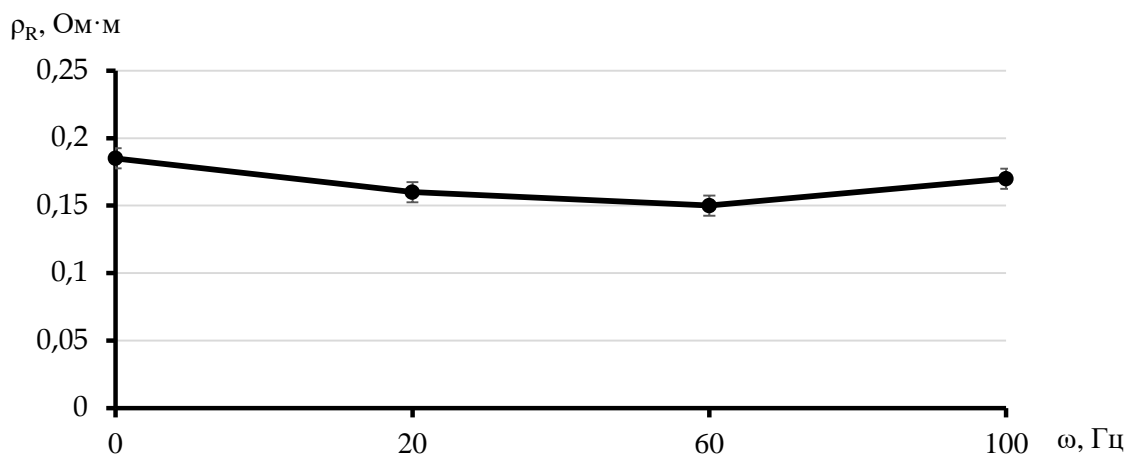


Рисунок 3.31. Влияние частоты вращающегося электромагнитного поля на эффект измельчения частиц

Для получения зависимости изменения удельного сопротивления спрессованных образцов от гранулометрических размеров, измельченных в процессе обработки ферромагнитных частиц, использовалась ферромагнитная среда шлама ООО «10-ГПЗ» после очистки его от неферромагнитных частиц в устройстве с вращающимся электромагнитным полем. Распределение, по размерам частиц, полученное ситовым методом представлено на рисунке 3.32.

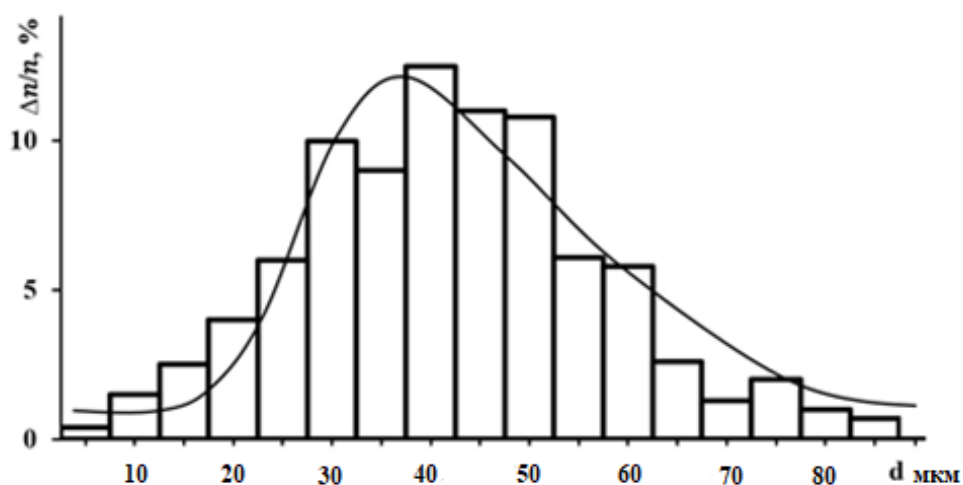


Рисунок 3.32. Распределение частиц по размерам в ферромагнитной среде шлама ООО «10-ГПЗ» после очистки его от неферромагнитных частиц

Обработка осуществлялась в устройстве с вращающимся электромагнитным полем при индукции 8,8 мТл и частоте магнитного поля 60 Гц в течение 20 мин. Объем загрузки рабочей зоны устанавливался на уровне 0,3 объема рабочей зоны. После обработки среда удалялась из рабочей зоны и путем ситового метода разделялась на гранулометрические по размеру фракции. На рисунке 3.33 приведена гистограмма измельченной среды после 20 мин воздействия на неё магнитовибрирующего слоя.

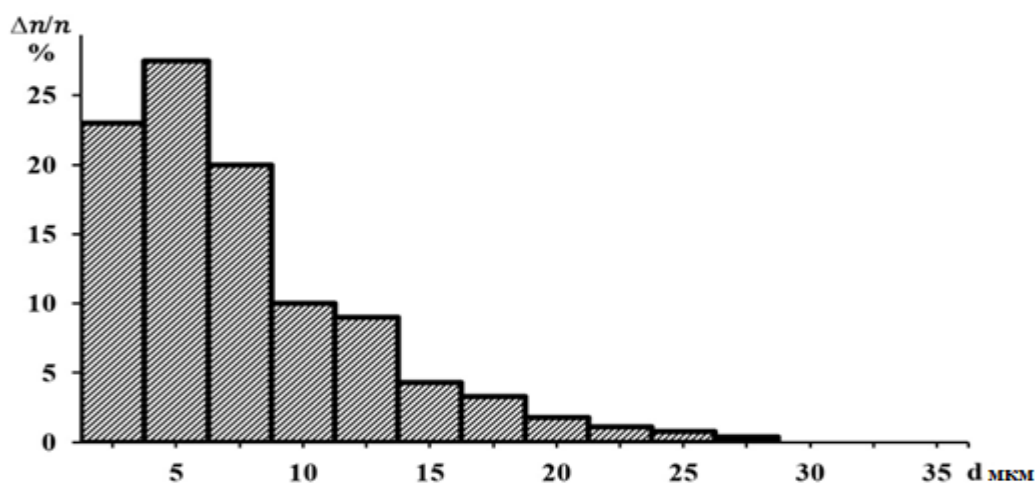


Рисунок 3.33. Гистограмма распределения частиц по размерам через 20 минут

Из каждой фракции в экспериментальной матрице (см. рисунок 3.27) формировались спрессованные образцы, относительная плотность которых представлена на рисунке 3.34, и определялось их удельное сопротивление. Измерения проводились не менее пяти раз для каждой фракции с последующим усреднением результатов. Разброс между полученными значениями удельного сопротивления отдельных проб одной и той же среды не превышал 5 %.

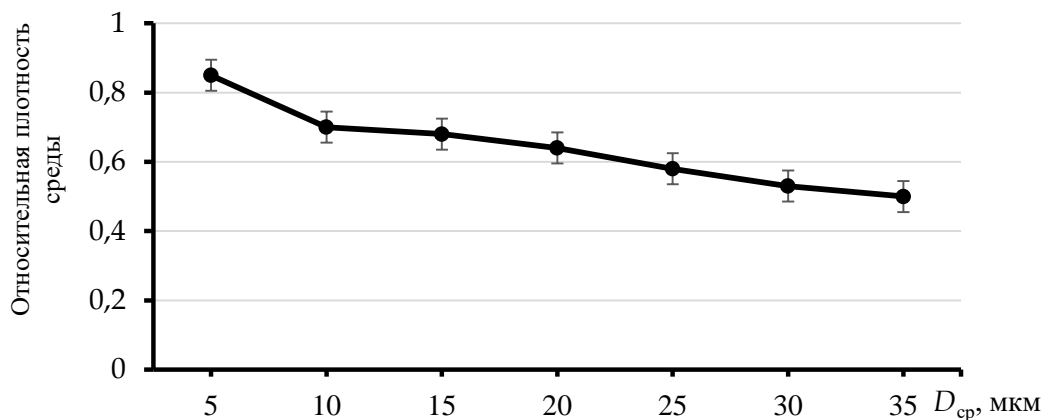


Рисунок 3.34. Зависимость относительной плотности спрессованных образцов от среднего размера измельченных ферромагнитных части

Результаты этого исследования приведены в таблице 3.20 и проиллюстрированы в виде зависимости удельного сопротивления от размеров ферромагнитных частиц на рисунке 3.35.

Таблица 3.20

Результаты исследования влияния размеров измельченных ферромагнитных частиц на удельное сопротивление образцов

Средний размер частиц, мкм	Показания милливольтметра $U$ , мВ	Удельное сопротивление, Ом·м
5	5,2	0,115
10	5,9	0,13
20	6	0,132
30	6,7	0,147
35	6,8	0,15

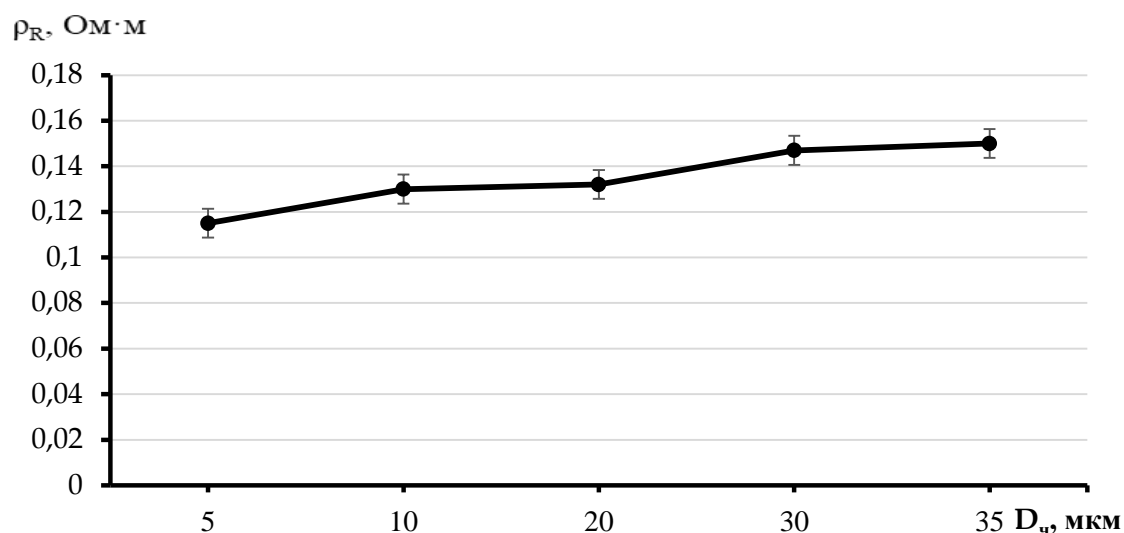


Рисунок 3.35. Зависимость изменения удельного сопротивления образцов от размера ферромагнитных частиц

Основным параметром, характеризующим эффективность процесса измельчения ферромагнитных частиц, принята степень измельчения. Если представить частицы ферромагнитного материала как сферы, массы которых равны массе частиц, то степень измельчения задаем как отношение диаметров исходной частицы и частицы после соударения.



Следующая серия экспериментальных исследований предусматривала определение продолжительности измельчения частиц до выбранного гранулометрического размера и оценку интенсивности измельчения  $P$ .

Среда с частицами загружалась во внутреннюю камеру специальной оснастки, представленной на рисунке 3.27, и помещалась в устройство с вращающимся электромагнитным полем. Под действием пондеромоторных сил среда образовывала магнитовибрирующий слой, в котором реализовывалось ударное измельчение частиц. Время воздействия вращающегося электромагнитного поля варьировалось от 2,5 до 20 мин. Через установленные планом эксперимента временные промежутки масса среды извлекалась из камеры и из неё в экспериментальной матрице (рисунок 3.27) формировались спрессованные образцы и определялось их удельное сопротивление. На основании удельного сопротивления спрессованного образца по графику (рисунок 3.35) устанавливался полученный зафиксированный промежуток времени измельчения, средний размер частиц среды анализировался на микроскопе (см. рисунок 3.2). Результаты исследований представлены в таблице 3.21 и проиллюстрированы на рисунке 3.36.

Таблица 3.21

Результаты экспериментальных исследований влияния продолжительности воздействия вращающегося электромагнитного поля на изменение размера частиц при различных режимах

Режим	Условия обработки			$U$ , мВ	$\rho_R$ , Ом·м	$D_{ср}$ , мкм
	$B$ , мТл	$\omega$ , Гц	$t$ , мин			
1	8,8	20	2,5	7,3	0,16	52
			5	6,9	0,152	40
			10	6,4	0,147	30
			15	6,2	0,138	26
			20	6	0,132	22
2	8,8	100	2,5	6,15	0,135	25
			5	6	1,132	18
			10	6	0,132	14
			15	5,8	0,13	10
			20	5,2	0,116	8
3	7,9	60	2,5	6	0,132	20
			5	5,9	0,131	12
			10	5,45	0,12	9
			15	5,35	0,118	7
			20	5,2	0,115	5

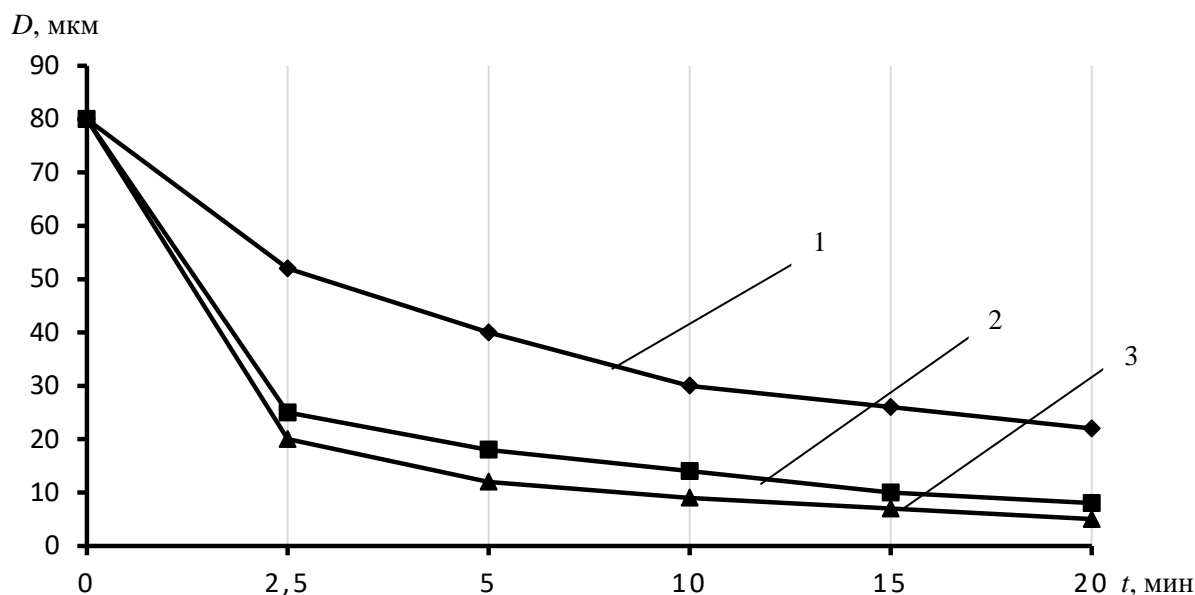


Рисунок 3.36. Зависимость среднего размера частиц от времени измельчения во вращающемся электромагнитном поле:

1 – 20 Гц; 2 – 100 Гц; 3 – 60 Гц

После 20 мин измельчения в режиме 1 (при индукции  $B = 8,8$  мТл и частоте магнитного поля  $\omega = 20$  Гц) средний размер частиц уменьшился с 80 до 22 мкм. При создании в области измельчения устойчивого магнетовибрирующего слоя в режиме 2 (при индукции  $B = 8,8$  мТл и частоте магнитного поля  $\omega = 100$  Гц) средний размер частиц уменьшается до 8 мкм; в режиме 3 (при индукции  $B = 8,8$  мТл и частоте магнитного поля  $\omega = 60$  Гц) – до 5 мкм (рисунок 3.36). Из полученных результатов следует, что значения среднего размера частиц обусловлены не только механическими условиями измельчения, но и режимами электромагнитного воздействия. При увеличении времени измельчения с 10 до 20 мин в режиме 1 степень измельчения возрастает с 2,7 до 3,6; в режиме 2 – с 5,7 до 10; а в режиме 3 – с 8,9 до 16.

Установлено, что при дальнейшем увеличении времени воздействия МВС наряду с процессом разрушения наблюдается и процесс агрегирования частиц, что объясняет меньшую степень измельчения после 20 минут воздействия МВС. С ростом частоты вращающегося поля до 60 Гц возрастает интенсивность движения частиц, как показано на рисунке 3.37, а свыше 60 Гц снижается.

Сравнительный анализ экспериментальных значений продолжительности измельчения исследуемого шлама ООО «10-ГПЗ» и расчетных значений, выполненных по формуле (2.49) при условии, что коэффициент интенсивности измельчения вероятность  $P = 1$ , приведённый в таблице 3.22, позволяет оценить интенсивность процесса измельчения ферромагнитных частиц во вращающемся электромагнитном поле.

Таблица 3.22

Оценка интенсивности измельчения ферромагнитных частиц шлама  
во вращающемся электромагнитном поле с индукцией 8,8 мТл

Частота магнитного поля, Гц	Степень измельчения $Z_{и}$	Экспериментальное время, с	Расчетное время, с	$P_э$	$P_{ср}$
20	2	300	0,63	0,0021	0,002
	3,6	600	1,13	0,0019	
60	2	90	0,21	0,0023	0,0027
	3,6	120	0,38	0,0031	
100	2	110	0,13	0,0011	0,0013
	3,6	150	0,23	0,0015	

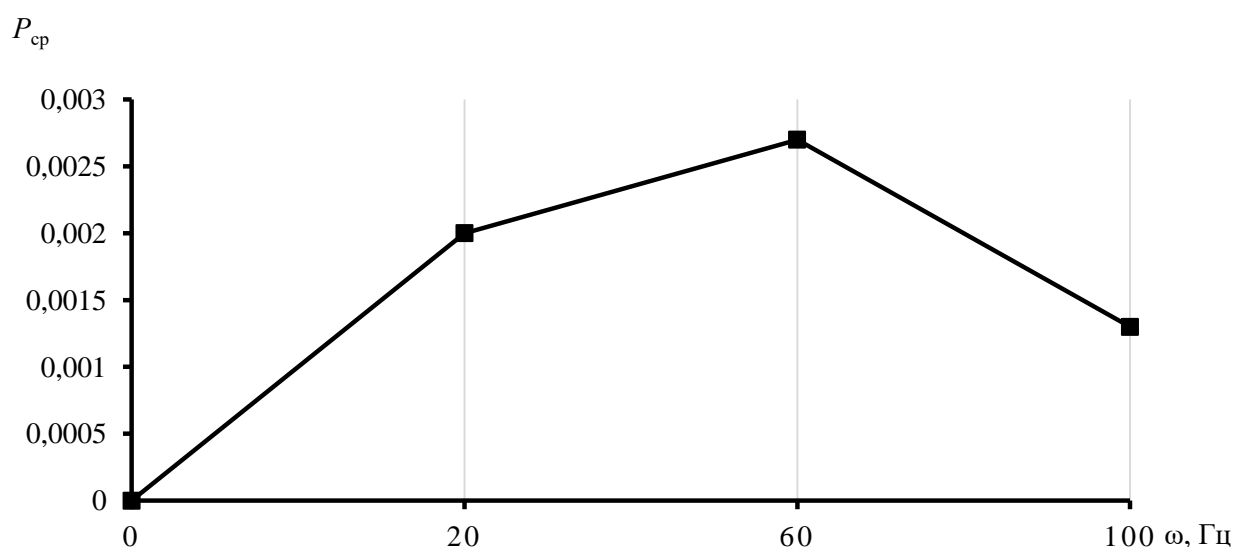


Рисунок 3.37. Зависимость интенсивности измельчения ферромагнитных частиц  $P_{ср}$  от частоты вращающегося электромагнитного поля

Для проверки адекватности расчетной зависимости (2.49), используя график на рисунке 3.37, в таблице 3.23 приведены сравнительные результаты оценки продолжительности измельчения для образцов шламовых отходов ПАО «ТАНТК им. Г.М. Бериева» и АО «РГА».

Таблица 3.23

Сравнительный анализ продолжительности измельчения образцов шламовых отходов

Ферромагнитная среда	Частота магнитного поля $\omega$ , Гц	$P_{cp}$	$Z_{и}$	Расчетное время $t$ , с	Экспериментальное время $t$ , с	$\delta$ , %
ПАО «ТАНТК им. Г. М. Бериева»	60	0,0027	2	80	90	11
АО «РГА	100	0,0013	3,6	173	180	5,6

В результате экспериментальных исследований показано, что применение устройств с вращающимся электромагнитным полем позволяет эффективно реализовать один из важных этапов переработки шламовых отходов металлопроизводства, связанного с измельчением его ферромагнитных частиц, обеспечивающего получение ферромагнитного сырья с требуемыми гранулометрическими характеристиками.

### Выводы по главе 3

1. Разработано и изготовлено опытно-экспериментальное устройство, реализующее ВЭМП и позволяющее исследовать основные закономерности переработки шламовых отходов.

2. Проведен металлографический и гранулометрический анализ шламовых образцов. Установлено:

- конгломераты исследуемых шламов изменяются в пределах 40–100 мкм;
- металлическая составляющая размером от 35 до 80 мкм имеет вид стружки с высокоразвитой поверхностью, форма которой зависит от технологии обработки;

- прочность сцепления частиц конгломератов составляет 5,9–7,3 МПа, а металлических частиц в 1,5–2 раза ниже предела прочности обрабатываемого материала;

- компонентный анализ свидетельствует об их схожести по своему составу и процентному соотношению составляющих его элементов;

- содержание абразива в общей массе шламов составляет примерно 6–15 %.

3. Для исследования кинетики процессов взаимодействия шламовых отходов во ВЭМП предложен индукционный метод измерений.

4. Доказано, что вращающееся электромагнитное поле однородно. Это позволяет сформировать представление о равномерности его воздействия на технологический материал.

5. Получена зависимость, позволяющая рассчитать ЭДС. Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных значения ЭДС показал, что их расхождение не превышает 5 %.

6. На основе анализа влияния пространственной ориентации магнитного момента ферромагнитного агрегата во ВЭМП на величину индукционной ЭДС получена формула для расчета величины ЭДС, наводимой ферромагнитными частицами в индукционном датчике, которая позволила установить и экспериментально подтвердить:

- изменение угловой частоты магнитного поля до 60 Гц способствует росту энергетической активности конгломератов в магнитовибрирующем слое;

- при увеличении угловой частоты свыше 60 Гц начинают формироваться цепочные комплексы, снижающие степень хаотизации, скорость и амплитуду колебаний конгломератов и, как следствие, ведущие к потере их энергетической активности;

- технологический эффект обработки достигает своего максимума при степени загрузки рабочей зоны устройства шламовой средой на 35–40 %;

- с увеличением исходного размера подвергаемых переработке ферромагнитных частиц их ударно-импульсная разрушающая активность конгломератов снижается, а с увеличением степени разрушения увеличивается.

7. Для исследований процессов разрушения конгломератов на компоненты и измельчения ферромагнитных частиц разработана специальная оснастка.

8. Результаты экспериментальных исследований процессов разрушения и измельчения конгломератов шламовых отходов во вращающемся электромагнитном поле позволили констатировать следующее:

– принятая для проведения экспериментальных исследований величина индукции вращающегося электромагнитного поля 8,8 мТл, превышающая в 2 раза пороговое, обеспечивает эффективное разрушение конгломератов на составляющие его компоненты, а также измельчение ферромагнитных частиц до 2,5 мкм;

– эффективность протекания процессов согласуется с теоретическими закономерностями, активности частиц в устройствах с ВЭМП.

9. Полученные зависимости интенсивности разрушения и измельчения конгломератов от частоты электромагнитного поля позволяют (с погрешностью в пределах 15 %) оценить продолжительность этих процессов.

## **Глава 4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПЕРЕРАБОТКИ ШЛАМОВЫХ ОТХОДОВ ШЛИФОВАЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ**

Как было показано ранее, для получения из шламовых отходов вторсырья требуемого качества необходима технология его переработки, включающая в себя ряд последовательных технологических операций:

- промывку шлама, предусматривающую очистку его от технологической жидкости, применяемой во время выполнения шлифовальной операции;
- сушку шлама, очищенного от технологической жидкости, применяемой во время выполнения шлифовальной операции;
- разрушение и разделение конгломератов шламовых отходов на ферромагнитную и неферромагнитную компоненты;
- измельчение ферромагнитных частиц шлама.

Ниже представлены конструкторско-технологические решения устройств, позволяющие эффективно реализовать выполнение этих операций на основе использования эффекта магнитовибрирования перерабатываемой шламовой среды.

### **4.1. Технология и средства подготовки шламового сырья для разделения входящих в него основных компонент**

#### **4.1.1. Очистка шлама от технологической жидкости**

Основным требованием к шламу после его промывки и сушки является отсутствие в полученном объеме ТЖ, масла и других загрязнений. Допустимое содержание влаги не должно превышать 5–10 % от всего объема. Соответственно, технологическая операция должна реализовываться в минимально возможные сроки, быть безопасной для обслуживающего персонала, затраты на ее реализацию должны быть минимальны. Это задача может быть решена различными способами, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки.

В работах [3; 4] предложен способ выделения масла из объема шлама с его последующей просушкой. Технология подразумевает использование установки специальной конструкции. Шлам с высоким содержанием масла и окалины загружают в вакуумную камеру печи, создают разрежение, медленно поднимают температуру до 100 °С и путем дистилляции отделяют воду, затем путем вакуумной перегонки при температуре 300–350 °С отделяют 80–95 % масла, оставшийся пастообразный продукт нагревают до температуры 850–900 °С, выдерживают 3–6 ч для осуществления процессов восстановления окислов железа. Рассматриваемый способ предусматривает длительный непрерывный процесс термической обработки шлама, что является значительным недостатком. При этом требуются большие затраты электроэнергии, так как необходимо поддерживать постоянную температуру в камере. Установка, разработанная по данной схеме, может быть выполнена только стационарно. Сложность управления процессом и достаточно сложное оборудование, используемое в данном случае, требует высокой квалификации обслуживающего персонала.

Способ, изложенный в работе [61], предусматривает операцию обезжиривания шлама в растворе соды, технического мыла и последующего ополаскивания в дистиллированной воде. Промытый порошок отделяется от воды в центрифуге и окончательно высушивается в сушильном шкафу. Рассмотренный способ не позволяет полностью удалить оксидную пленку с поверхности частиц.

Известен способ очистки шлама от ТЖ, при котором исходный объем заливают уайт-спиритом и перемешивают, затем уайт-спирит сливают и засыпают шлам в устройство центрифугирования для удаления жидкости [2]. Обработку производят от 3 до 10 мин, в зависимости от массы материала, после чего выжигают оставшееся количество ТЖ в камерной печи при температуре от 100 до 200 °С. Недостатком рассматриваемого способа является наличие стадий отжига ТЖ в камерной печи, что может приводить к ухудшению свойств ферромагнитных агрегатов, наличию продуктов горения в общем объеме и необходимости последующего их удаления.



Другой способ очистки и сушки шлама предложен в работе [4]. Он предусматривает очистку шлама путем его промывки органическим растворителем и дистиллированной водой, последующее центрифугирование для удаления жидкости и сушку в инертной атмосфере при температуре от 100 до 150 °С, что является весьма дорогостоящей технологией.

Анализ рассмотренных способов очистки шлама позволил выявить их существенные недостатки, устранить которые можно, реализовав принципиальную схему, представленную на рисунке 4.1, с использованием электромагнитного поля.

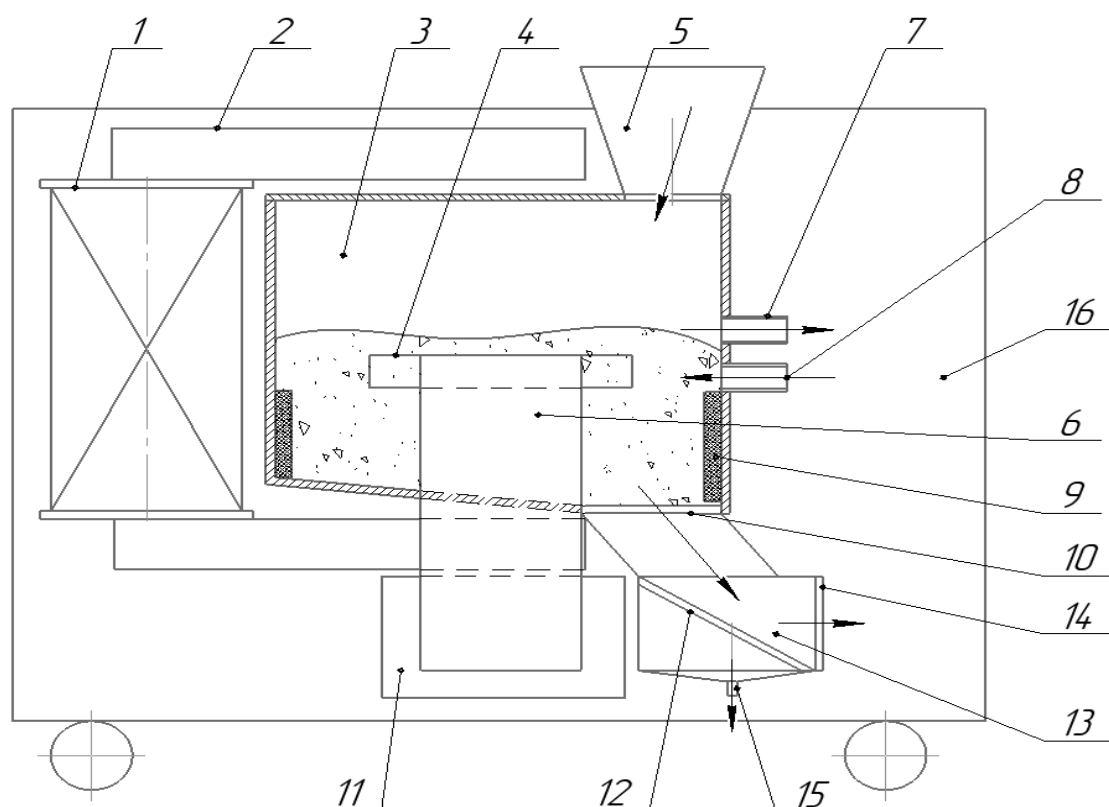


Рисунок 4.1. Технологическая схема очистки шламовых отходов:

1, 11 – катушки электромагнита и пермеаметра; 2, 6 – магнитопроводы пермеаметра и электромагнита; 3 – корпус рабочей камеры; 4 – концентратор; 5 – бункер-приемник; 7, 8, 15 – трубопровод; 9 – нагревательный элемент; 10, 14 – задвижки; 12 – фильтр; 13 – блок промывки; 16 – корпус

Шлам, прошедший обработку в центрифуге, с целью отделения основной массы ТЖ и масла засыпается через бункер-приемник 5 в рабочую камеру 3. Промывка материала производится щелочным раствором едкого калия, который поступает в камеру через трубопровод 8. Целесообразность его использования

подтверждена рядом работ, например [26; 36; 39; 53; 61]. Для приведения шлама в магнитовибрирующее состояние и обеспечения его перемешивания рабочая камера помещается между магнитопроводами пермеметра 6 и постоянного электромагнита 2. Параметры переменного электромагнитного поля, создаваемого электромагнитами в рабочей камере, следующее: постоянное магнитное поле с индукцией 17,6 мТл и переменное магнитное поле с градиентом индукции 120 мТл/м. Этот режим электромагнитного воздействия соответствует интенсивному перемешиванию шлама в щелочном растворе.

Удаление масляных загрязнений и ТЖ производится подогревом объема загрузки с помощью нагревательных элементов 9, расположенных по периметру внутренней поверхности рабочей камеры. После нагрева содержимого камеры до температуры кипения и выдержки порядка 1–3 мин, на поверхности будут присутствовать продукты загрязнения, которые удаляются с помощью насоса через трубопровод 7. Отделение шламовых конгломератов от жидкости производится с помощью блока промывки 13. Таким образом, за счет интенсивного перемешивания объема загрузки и протекающих химических реакций обеспечивается высокая эффективность удаления пленок и окислов с поверхности частиц шлама.

Рабочая камера выполнена с наклоном дна, что обеспечивает перемещение массы загрузки после обработки к склизу блока промывки с установленной заслонкой 10. В конструкции блока предусмотрен фильтр 12, расположенный под определенным углом. Через фильтр проходит только жидкость, она удаляется через трубопровод 15. Частицы шлама скатываются к заслонке 14 блока промывки для сбора и прохождения дальнейшей операции сушки. Для обеспечения мобильности установки вся конструкция находится в корпусе, имеющем колеса для транспортирования.

Рассмотренная технологическая схема очистки шлама может быть реализована устройством, внешний вид которого представлен в приложении В.

#### 4.1.2. Сушка шлама, очищенного от технологической жидкости

Следующей технологической операцией по переработке шлама является сушка. Анализ способов ее реализации показал наличие значительных недостатков, препятствующих их применению в разрабатываемой технологии [1–4]. Так, использование сушильных шкафов и камерных печей исключает возможность реализации мобильной конструкции и значительно усложняет автоматизацию процесса. Сушка в инертной атмосфере требует герметизации элементов оборудования, что в нашем случае достаточно трудно реализовать, а также подразумевает дополнительные затраты на приобретение газа.

Перечисленные недостатки могут быть устранены использованием ленточного конвейера с нагревательными элементами. Конвейер должен обеспечивать распределение шлама по ширине ленты для обеспечения равномерной сушки и снижения ее продолжительности, а также перемещать полученный объем к месту сбора для реализации следующей технологической операции. Нагревательные элементы должны быть достаточно энергоэффективными, а их воздействие на шламовый конгломерат должно исключать перегрев, что может привести к ухудшению свойств ферромагнитных частиц и исключить возможность их дальнейшего использования. Схема предлагаемого устройства представлена на рисунке 4.2.

Шлам засыпается через бункер-приемник 1 на ленту конвейера 8. При включении электродвигателя 6 шлам проходит через распределитель 2, распределяясь по всей ширине ленты толщиной в два-три слоя. Устройство 3 должно быть снабжено нагревательными элементами, термопарами для контроля температуры в рабочей зоне. После термической обработки частицы шлама сбрасываются в тару для сбора. Для отделения частиц от конвейерной ленты предусмотрена щетка 9, расположенная в нижней части конвейера. Все элементы располагаются в корпусе 5, установленном на колесах для обеспечения мобильности устройства.

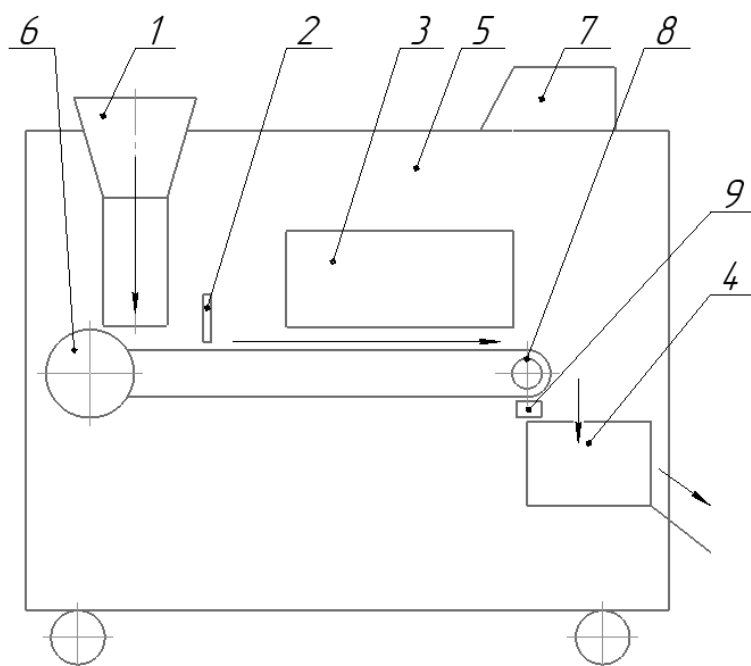


Рисунок 4.2. Технологическая схема сушки шламовых отходов:

1 – бункер-приемник; 2 – распределитель потока; 3 – устройство нагрева и контроля температуры; 4 – тара; 5 – корпус; 6 – электродвигатель; 7 – пульт управления; 8 – конвейер; 9 – щетка

Управление устройством осуществляется с помощью пульта управления 7. Торцевые стенки рабочей камеры содержат вентиляционные отверстия отвода водяного пара, образующегося при просушке шлама. Конвейерная лента должна иметь форму, препятствующую просыпанию частиц шлама, а также быть термостойкой.

Рассмотренная технологическая схема может быть реализована устройством, внешний вид которого показан в приложении Г.

#### **4.2. Технологический комплекс разделения шламовых отходов на компоненты с применением устройств с вращающимся электромагнитным полем**

Последующие этапы переработки – разделение шламовых конгломератов и измельчение ферромагнитных агрегатов до требуемого гранулометрического размера – можно реализовать различными способами. В работах [28; 31; 49–53] для измельчения конгломератов шлама использована магнитовибрационная бильная мельница. Операция проводится в магнитовибрирующем слое, создаваемом электромагнитами. Далее производят выделение из конгломератов немагнитной фрак-

ции с помощью установки, включающей в себя постоянный и переменный электромагниты с разомкнутыми магнитопроводами, силовые линии которых взаимно перпендикулярны. Создаваемый за счет формы сердечника пермеаметра по всей длине магнитопровода градиент индукции магнитного поля позволяет создать устойчивый магнитовибрирующий слой в любой точке межполюсной зоны. Рассмотренный способ не лишен недостатков, среди которых: наличие шума при работе бильной мельницы, высокая энергоемкость процесса, необходимость сепарирования частиц шлама для реализации обработки по определенным режимам.

Способ [3] подразумевает использование шаровой мельницы атриторного типа. При этом используют размольные тела размером от 5 до 15 мм, а соотношение массы загрузки материала к размольным телам выбирают в диапазоне 1:10–1:30. Процесс измельчения производят в течение 1–4 ч с продувкой камеры атритора инертным газом в течение 5–10 мин. После завершения процесса измельчения полученный порошок охлаждают до температуры окружающей среды и осуществляют разгрузку полученного продукта путем отсева его от размольных тел на сите с соответствующим размером ячейки. Полученный порошок сепарируют на фракции. Рассмотренный способ является весьма трудоемким и энергозатратным.

Наиболее эффективным техническим и технологическим решением вопроса разделения конгломератов шламовых отходов на ферромагнитную и неферромагнитную компоненты и измельчение ферромагнитных частиц шлама, как показали проведенные исследования, является применение устройств с вращающимся электромагнитным полем, позволяющих путем бесконтактного взаимодействия конгломератов и ферромагнитных агрегатов с металлическими элементами осуществить эти процессы. На рисунке 4.3 показана конструкция устройств с вращающимся электромагнитным полем.

Рабочая камера 1 выполнена из листового материала. В верхней ее части имеется переход с окружности на квадрат, выполняющий роль загрузочной воронки. Нижняя часть выполнена конической для уменьшения диаметра и возможности присоединения шибера-заслонки.

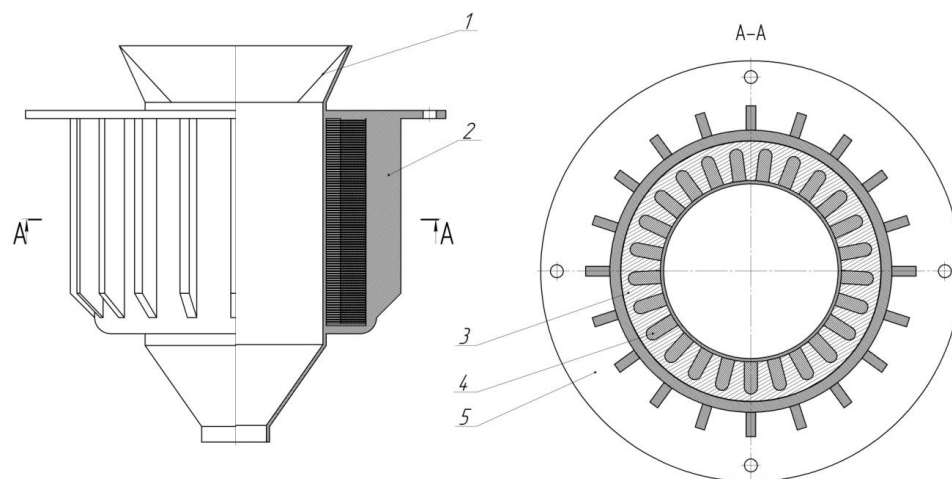


Рисунок 4.3. Конструкция устройства с вращающимся электромагнитным полем:  
 1 – рабочая камера; 2 – корпус статора; 3 – сердечник статора; 4 – обмотка статора; 5 – фланец

В верхней цилиндрической части камеры приварен фланец 5, который имеет отверстия для крепления к элементам установки. Корпус статора 2 приваривается к фланцу. Во внутренней его части расположен сердечник статора 3 – набор пластин с пазами. В пазах располагаются обмотки 4. Для охлаждения конструкции корпус имеет ребра.

Применение устройств с вращающимся электромагнитным полем позволяет эффективно реализовать в комплексе этапы переработки шламовых отходов, предусматривающие их разрушение, разделение на ферромагнитные и неферромагнитные компоненты, а также измельчение выделившихся ферромагнитных частиц до требуемых гранулометрических размеров на одном технологическом оборудовании. Основным преимуществом такого подхода является отсутствие промежуточных операций загрузки-выгрузки шлама, что снижает стоимость его переработки. Этого можно достичь с помощью технологического оборудования, схема которого представлена на рисунке 4.4. Основным элементом данного оборудования являются установленные в нем устройства с вращающимся электромагнитным полем.

Шламовые конгломераты помещают через бункер-приемник 1 в рабочую камеру 3 устройства с вращающимся электромагнитным полем 2, обеспечивающего под воздействием магнитного поля вращение всей массы загрузки.

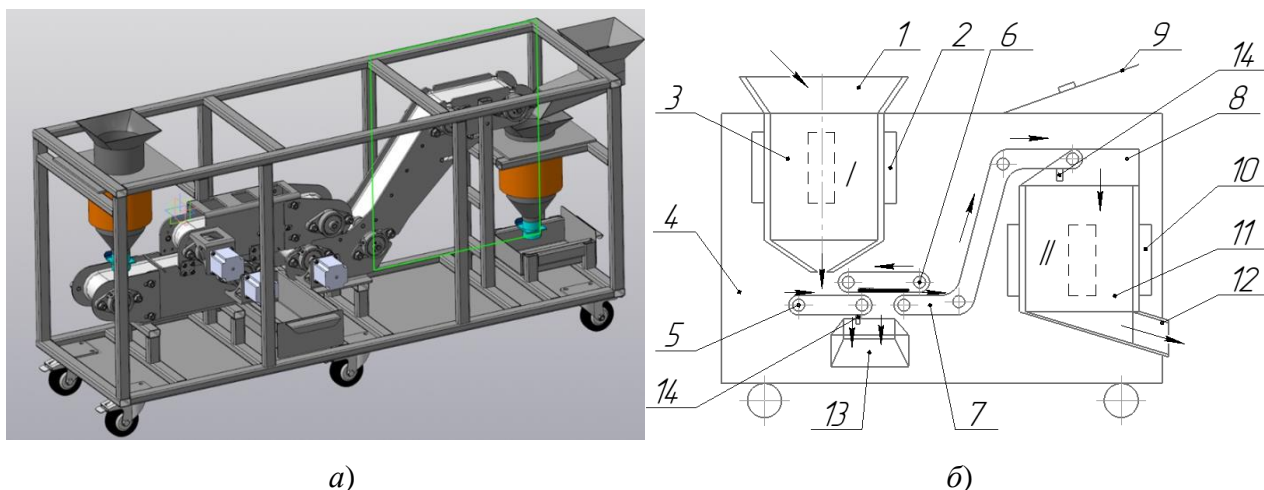


Рисунок 4.4. Комплекс переработки шламовых отходов:

*а* – общий вид комплекса; *б* – технологическая схема комплекса:

*1* – бункер-приемник; *2, 10* – статор устройства, обеспечивающего вращающееся электромагнитное поле; *3, 11* – рабочая камера; *4* – корпус; *5, 7* – транспортеры ленточные; *6* – транспортер ленточный с электромагнитом; *8* – ограждающее устройство; *9* – люк; *12, 13* – склиз; *14* – щетка

В зависимости от параметров шлама его объем может подаваться в камеру при активном действии магнитного поля или при его отсутствии. В первом случае ферромагнитные агрегаты будут удерживаться полем, а неферромагнитные частицы после разрушения конгломератов будут выходить из камеры. Во втором случае необходимо предусмотреть в нижней части камеры специальную задвижку (шибер), которой будет удерживаться подлежащий переработке шлам. После активации вращающегося магнитного поля через установленный промежуток времени обработки задвижка освобождает свободный выход неферромагнитных частиц из камеры при удерживаемых магнитным полем ферромагнитных агрегатов.

Немагнитные частицы после выхода из камеры *3* попадают через конвейер *5* на склиз *13*, ведущий в тару с отходами. Характер работы конвейера – периодический, т. е. движение происходит после накопления массы отходов. После разрушения ферромагнитные агрегаты также попадают на конвейер *5*, ввиду прекращения наведения в камере *3* электромагнитного поля. В связи с тем, что конвейер *5* предназначен для транспортирования различных по назначению составляющих шлама, для его разделения предусмотрены щетки *14*.

Далее объем шлама проходит дополнительную сепарацию. Под действием электромагнита конвейера 6 ферромагнитные агрегаты перемещаются на конвейер 7 и далее проходят измельчение либо собираются в специальную тару. Остальной объем шлама осыпается в склиз 13, по которому попадает в тару для отходов.

Операция измельчения ферромагнитных агрегатов шлама осуществляется в камере 11, в которой с помощью устройства 10 наведено переменное вращающееся магнитное поле. Объем обработки попадает в камеру через конвейер 7 либо через люк 9. Для предотвращения просыпания объема шлама предусмотрено ограждающее устройство 8. Для очистки конвейера в его конструкцию введены щетки 14. Измельчение частиц шлама происходит за счет их взаимного соударения при вращении в магнитном поле. После обработки происходит отключение поля и объем загрузки, проходя через камеру, попадает на склиз 12 и далее в тару.

Характеристики переменного магнитного поля, режимы обработки и скорость вращения конвейера задаются программно с помощью пульта управления.

Рассмотренная схема предусматривает непрерывный процесс разделения и измельчения шламовых агрегатов. При этом должна быть выполнена синхронизация выполнения отдельных операций: разделение – транспортирование – измельчение. При необходимости сохраняется возможность выполнения только отдельных операций.

Рассмотренная технологическая схема может быть реализована устройством, внешний вид которого показан в приложении Д.

### **4.3. Организация переработки шламовых отходов**

Переработка шламовых отходов может быть организована или на базе совокупности передвижных устройств (рисунок 4.5), или на базе стационарных участков, включающих технические средства, обеспечивающие реализацию всех этапов переработки шламовых отходов металлопроизводства (рисунок 4.6).



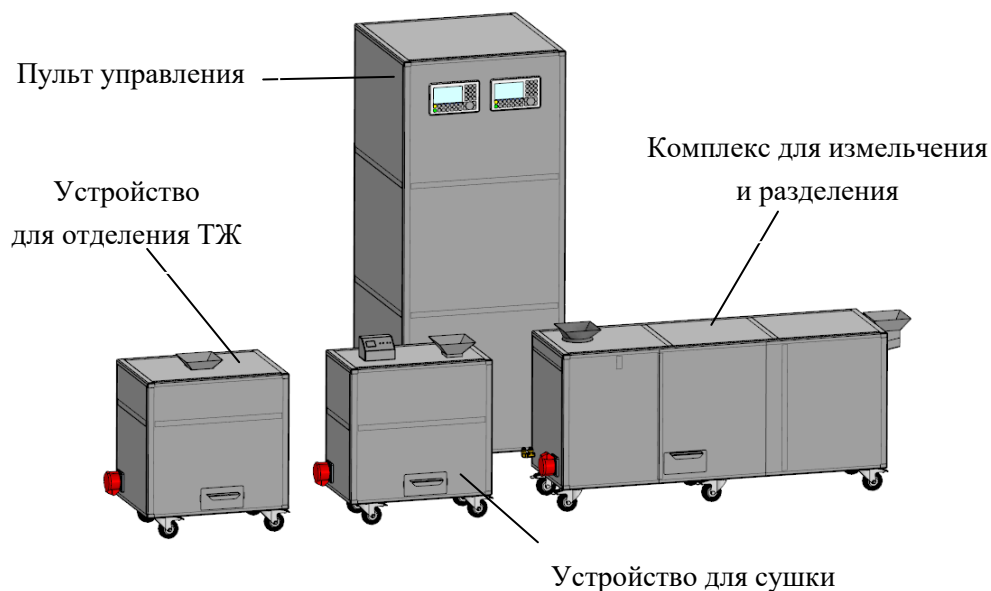


Рисунок 4.5. Общий вид передвижного комплекса для переработки шлама

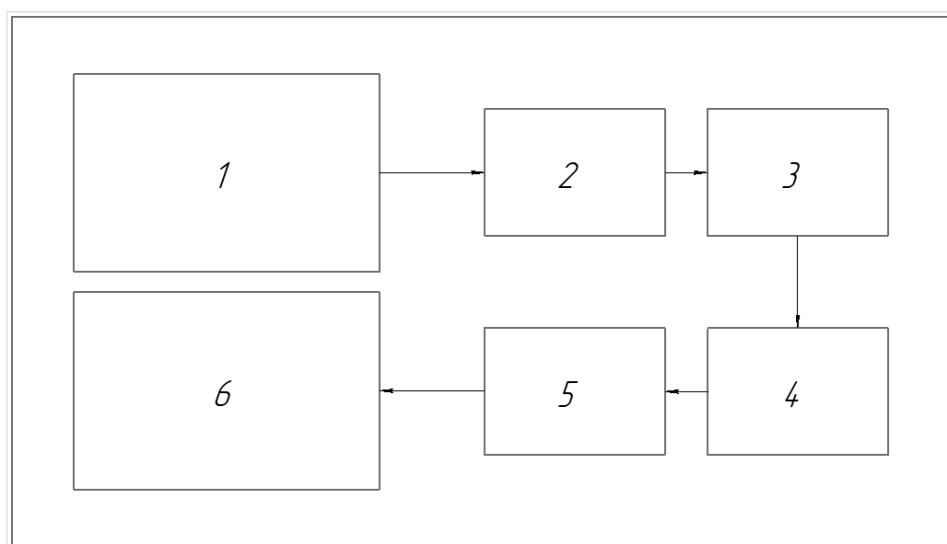


Рисунок 4.6. Участок переработки шламовых отходов:

1 – зона хранения входного сырья; 2 – зона мойки; 3 – зона сушки; 4 – зона очистки (разделения);  
5 – зона измельчения; 6 – зона контроля и хранения переработанного сырья

Исходное сырье – шлам механообрабатывающего производства, который поступает в зону хранения 1, где удаляются элементы относительно большого размера и производится подготовка для дальнейшей переработки. В зоне 2 производится промывка шлама с целью очистки его от ТЖ, масла, пыли и других загрязнений. Далее сырье попадает в зону 3, где осуществляется его сушка и вы-

держка в течение требуемого времени. Полученный шлам очищается от немагнитных примесей в зоне 4 с помощью электромагнитных камер.

Ферромагнитные частицы различного размера попадают в зону 5 для дальнейшего измельчения до требуемой фракции. На этапах разделения и измельчения сырья вводятся входной и выходной контроль. В зоне 6 осуществляется хранение переработанного сырья и упаковка с целью передачи потребителям для дальнейшего использования.

#### **Выводы по главе 4**

1. С целью реализации основных этапов переработки шламовых отходов предложены конструкторско-технологические решения устройств:

- для очистки шлама от ГЖ;
- сушки;
- разделения и измельчения.

2. Предложена конструкция технологического комплекса, позволяющая автоматизировать протекание процесса переработки, позволяющая увеличить производительность до 0,8–0,9 кг/мин при индукции магнитного поля 8,5 мТл и частоте 60 Гц. Данный комплекс также автономен и мобилен, что является значительным преимуществом в сравнении с другими решениями.

## Глава 5. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРАКТИЧЕСКОМУ ПРИМЕНЕНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 5.1. Технологические рекомендации по реализации процесса переработки шламовых отходов в устройствах с вращающимся электромагнитным полем

Результаты приведенных в работе теоретических и экспериментальных исследований позволяют сформулировать ряд основных технологических рекомендаций и условий, обеспечивающих эффективную реализацию процесса переработки шламовых отходов металлопроизводства в устройствах с вращающимся электромагнитным полем:

1. Шламовая среда, поступающая на переработку в устройства с вращающимся электромагнитным полем, должна быть тщательно очищена от технологической жидкости и масел, используемых на шлифовальных операциях, и просушена.

2. После очистки и сушки при соблюдении технологий, рекомендованных в главе 4, и выполнении этих этапов переработки гранулометрический размер конгломератов шлама не должен превышать 200 мкм. Наличие комков выше указанного размера не допускается. В этой связи при отладке оборудования для очистки и сушки необходимо проводить гранулометрический анализ получаемой среды.

3. Кроме гранулометрического анализа необходимо иметь информацию о физико-механических характеристиках ферромагнитного материала, входящего в состав конгломератов, подлежащего переработке шлама и влияющего на величину индукции магнитного вращающегося поля.

4. Величина индукции вращающегося электромагнитного поля, обеспечиваемого устройством, должна превышать 1,5–2 раза пороговое значение индукции, гарантирующей эффект разрушения и измельчения конгломератов шлама, определяемой по формулам:

– для реализации процесса разделения конгломератов на ферромагнитную и неферромагнитную компоненты:

$$B_{vp} = 1,42 \cdot \sqrt{\mu_0 \mu (\rho_{\text{ч}} N D_{\text{ч}} E_{\text{адг.ч}})^{0,5}}, \text{ [Тл];} \quad (5.1)$$

– для реализации процесса измельчения ферромагнитных частиц:

$$B_{vu} = \sqrt{\frac{2,08\sigma_6\mu_0\mu D_{к.ч.}}{Z_u} \cdot \left[\frac{\rho_k}{2E} \cdot (Z_u^3 - 1)\right]^{0,5}}, \text{ [Тл]}. \quad (5.2)$$

5. Угловая частота вращения магнитовибрирующего слоя, формируемого устройством с вращающимся электромагнитным полем, согласно проведенным исследованиям, рекомендуется на уровне 50–60 Гц.

6. Максимальная степень загрузки рабочего объема (зоны) устройства с вращающимся электромагнитным полем перерабатываемой средой не должна быть выше 35–40 %.

7. Размеры рабочей зоны устройства с вращающимся электромагнитным полем с целью рационализации габаритных размеров индуктора не должны превышать в диаметре 100 мм и по высоте 150 мм, что обеспечит в среднем максимальную массу однократной загрузки перерабатываемой среды на уровне 3–4 кг.

8. Для оценки продолжительность переработки шламовых отходов рекомендованы следующие зависимости:

$$T_p = \frac{QZ_p}{600P_p\omega q}, \text{ [ч]}; \quad (5.3)$$

$$T_{и} = \frac{QZ_{и}}{600P_{и}\omega q}, \text{ [ч]}, \quad (5.4)$$

где  $Q$  – масса перерабатываемого шлама, [кг];  $q$  – масса одноразовой загрузки шлама в устройство с вращающимся электромагнитным полем, [кг].

9. Производительность переработки определяется по формуле  $\Pi = \frac{Q}{T}$ , [кг/ч].

## **5.2. Выбор технических характеристик устройств с вращающимся электромагнитным полем**

Основным узлом устройства, предлагаемого для разрушения и измельчения шламовых отходов, как показано на рисунке 5.1, является индуктор  $I$ , обеспечивающий формирование вращающегося электромагнитного поля.

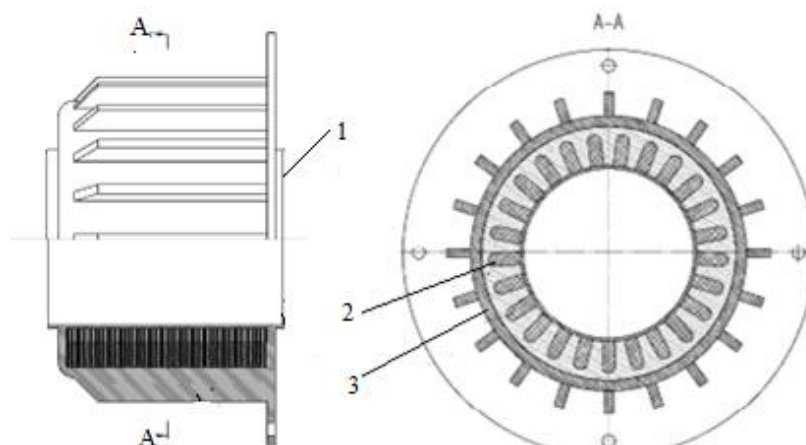


Рисунок 5.1. Общий вид устройства, реализующего вращающееся электромагнитное поле

Индуктор устанавливается в металлический корпус 3, который ограждается рубашкой и служит емкостью для охлаждающей жидкости, а также одновременно выполняет функцию экрана, предохраняющего обслуживающий персонал от воздействия электромагнитного поля. Изнутри индуктор ограничен полым цилиндром 2, изготавливаемым из немагнитного материала и определяющим размеры рабочей зоны устройства.

В соответствии с рекомендациями [57; 75] для изготовления устройств с вращающимся электромагнитным полем предлагается применять цилиндрические индукторы наружного, явнополюсного исполнения, в которых электромагнитная система представляет собой круговую многофазную систему обмоток, расположенных в пазах магнитопровода, и обеспечивает однородность магнитного поля в сечении, нормальном к оси индуктора. Для определения основных параметров индуктора (без полного расчета индуктора), таких как ток  $I$ , индуктивное сопротивление обмотки  $x$  и число витков на фазу  $n$ , предложены следующие расчетные зависимости:

$$\begin{aligned}
 I &= k \frac{f}{U} \cdot \frac{D_p^2 l_p}{p m^2} B_v \frac{\Sigma \lambda}{q f W^2}; \\
 x &= \frac{1}{k} \cdot \frac{U^2}{f} \cdot \frac{p m^2}{D_p^2 l_p} \cdot \frac{1}{B_v^2} \cdot \frac{q f W^2}{\Sigma \lambda}; \\
 n &= \frac{8,88 \cdot 10^9}{k} \cdot \frac{U}{f} \cdot \frac{p m}{D_p l_p} \cdot \frac{1}{B_v} \cdot \frac{q f W}{\Sigma \lambda},
 \end{aligned}
 \tag{5.5}$$

где  $U$  – фазное напряжение индуктора;  $f$  – частота питающего тока сети;  $l_p$  – расчетная длина рабочей зоны индуктора;  $\sum \lambda$  – суммарная проводимость потоков рассеяния с главного потока, проходящего через расточку индуктора;  $F$  – магнитодвижущая сила, приходящаяся на полюс,  $F = 4 \cdot 10^9 D_p \frac{B_v}{p}$ ;  $m$  – число фаз;  $f_w$  – обмоточный коэффициент;  $p$  – число пар полюсов;  $k = 2,22^2 \cdot 4^3 \pi \cdot 10^{-5} \approx 10^{-2}$ ;  $D_p$  – диаметр расточки индуктора.

При выборе размеров рабочей зоны устройства следует учитывать два важных обстоятельства. Во-первых, они влияют на габаритные размеры индуктора и, как следствие, на габаритные размеры и энергоёмкость устройства в целом; во-вторых, от них зависит объем загрузки перерабатываемой среды и, как следствие, производительность процесса. Рекомендуемое соотношение длины к диаметру рабочей зоны составляет не более 1,5, которое позволяет применить индукторы с практической точки зрения более технологичные в изготовлении и при этом обеспечить, как показали проведённые исследования, хорошую производительность переработки шлама и наиболее предпочтительный интервал индукции магнитного поля, достаточный для переработки шламовых отходов в пределах от 0,01 до 0,02 Тл.

Опыт эксплуатации опытно-экспериментальной установки, а также результаты исследований, приведённые в работе [57], показали, что для обеспечения работоспособности устройства в течение большого промежутка времени рабочая зона устройства должна быть оснащена цилиндрической сменной втулкой, изготовленной из нержавеющей стали марки X18H10T или другого немагнитного материала, например титана.

Для поддержания устройства с вращающимся электромагнитным полем в работоспособном состоянии оно должно быть оснащено системой непрерывно циркулирующего охлаждения индуктора с применением сухого трансформаторного масла или других жидкостей. Конструктивное исполнение устройства может предусматривать как вертикальное, так и горизонтальное расположение рабочей зоны, должно обеспечивать свободный проход объекта переработки через неё, проводить переработку шламовых отходов как циклически, так и непрерывно.

### **5.3. Техничко-экономическая оценка эффективности применения предложенного комплекса для переработки шламовых отходов**

Результаты выполненных исследований указывают на возможность переработки шламовых отходов с помощью комплекса, разработанного на основе устройств с вращающимся электромагнитным полем, Эффективность его применения обосновывается в первую очередь мобильностью, высокой степенью автоматизации и производительности. Как отмечалось ранее, возможно его использование как в автономном, так и в стационарном исполнении. Эксплуатация комплекса не требует высокой квалификации обслуживающего персонала, его обслуживание и ремонт не представляют трудностей.

Как было показано в главе 1, последние разработки технических средств для реализации технологических операций переработки шламовых отходов, связанных с разделением шламов на составляющие его компоненты и измельчением, предусматривают выполнение их на отдельных устройствах. Вначале проводят измельчение шламов в бильных мельницах с наложением на них постоянного и переменного магнитных полей, а разделение измельченного шлама проводят на магнитовибрирующих сепараторах [49; 50]. Предложенный комплекс позволяет выполнить эти операции переработки шламовых отходов на базе одного устройства (рисунок Д.4). В таблице 5.1 приведены технические характеристики устройств, предложенных для разделения шламов на составляющие его компоненты и измельчения ферромагнитных частиц.

Как видно из таблицы 5.1, разработанный комплекс обладает рядом преимуществ по сравнению с комплексом, состоящим из бильной мельницы и магнитовибрирующего сепаратора, а именно: более низкой стоимостью и экологичными параметрами энергопотребления, массогабаритными параметрами, а также тем, что для обслуживания требуется персонал с невысокой квалификацией.

Технические характеристики устройств, предложенных для разделения шламов на составляющие его компоненты и измельчения ферромагнитных частиц

Параметр	Бильная мельница	Магнито-вибрационный сепаратор	Комплекс на основе устройств с ВЭМП
Функциональное назначение	Измельчение	Разделение шламов на составляющие его компоненты	Разделения шламов на составляющие его компоненты; измельчение
Габаритные размеры (В×Ш×Д), мм	900×400×400	700×400×1200	635×430×1490
Квалификация обслуживающего персонала	Высокая	Высокая	Средняя
Расход охлаждающей жидкости, л/ч	12	10	10
Габаритные размеры помольной камеры (диаметр × длина), мм	100×150	–	100×150
Габаритные размеры помольного устройства (с учетом магнитов и охлаждающей камеры), мм	300×300×500	–	250×250×400
Количество помольных камер	1	–	2(1)
Ориентировочная стоимость устройства, тыс. руб.	450	250	350
Потребляемая мощность, кВт	2	2,5	2
Масса загрузки шлама (одноразовая), кг	5	4	3,5
Принцип работы	Периодический	Непрерывный	Непрерывный
Частота вращения, Гц	Бил-100	Магнитного барабана-2	ЭМП-60
Производительность, кг/мин	0,25	0,4	0,85

Для оценки эффективности разработанного комплекса рассчитаем затраты на переработку 100 кг шлама со среднестатистическим размером конгломератов 40 мкм, конечным продуктом ферромагнитных частиц размером 10 мкм. Результаты расчетов представлены в таблице 5.2.



Технико-экономическая оценка эффективности применяемых устройств

Показатель эффективности	Расчет показателя эффективности	Тип применяемого устройства для переработки	
		Бильная мельница и МВС	Комплекс с ВЭМП
Продолжительность переработки, ч	$t$	8,7	2
Расход электроэнергии, кВт·ч	$M_3 = Nt$ , где $N$ – общая мощность, потребная для переработки шлама	23,75	3,83
Стоимость электроэнергии, руб.	$C_3 = M_3k$ , где $k = 4,81$ руб. – стоимость 1 кВт·ч	234 000	34 500
Зарплата обслуживающего персонала, руб.	$Z_p = Pk_1t$ , где $P$ – заработная плата за один час работы; $k_1$ – коэффициент, характеризующий квалификацию обслуживающего персонала	3 900	575
Производительность переработки, кг/ч	$\Pi = V/t$ , где $V$ – объем переработанного шлама, 100 кг	11,7	50
Ежемесячные амортизационные затраты, руб.	$M_a = P_c I/n$ , где $P_c$ – первоначальная стоимость оборудования; $n$ – срок службы устройства, мес.	11 598	5 833
Расходы на ремонт, руб.	$I_p = P_c (K_{кр} + K_{тр})$ где $P_c$ – стоимость устройства, руб.; $K_{кр}$ – коэффициент, учитывающий стоимость капитального ремонта от цены устройства, 8,9 %; $K_{тр}$ – коэффициент, учитывающий стоимость текущего ремонта от стоимости устройства, 2 %	76 300	38 150

Как видно из таблицы 5.2, затраты на электроэнергию разработанным комплексом для переработки 100 кг шламовых отходов составляют порядка 34,5 тыс. руб., что в 6,78 раза меньше по сравнению с переработкой в бильной мельнице и магнетовибрационном сепараторе. Стоимость оплаты труда обслуживающего персонала значительно ниже, при этом производительность переработки выше в 4,27 раза. Низкие амортизационные отчисления и затраты на ремонт для разработанного устройства объясняются более низкой его первоначальной стоимостью. Кроме того, стоит отметить значительное преимущество – обеспечение одинаковых гранулометрических характеристик получаемых частиц. При этом нет необходимости в дополнительных затратах на сепарирование компонентов конгломератов. С помощью бильной мельницы достичь такого качества проблематично и, соответственно, присутствует необходимость сепарирования измельченного порошка.

Результаты технико-экономического анализа позволяют сделать следующие выводы:

1. Разработанный комплекс позволяет осуществлять переработку шламовых отходов, включая операции разрушения конгломератов и последующего измельчения их ферромагнитных частиц, с соблюдением экологических норм воздействия на обслуживающий персонал и окружающую среду.

2. Комплекс позволяет снизить затраты на переработку шламовых отходов в четыре раза и повысить производительность процесс переработки в 4,2 раза.

3. Качество конечного продукта переработки – ферромагнитных частиц, получаемых с помощью разработанного комплекса – характеризуется постоянными гранулометрическими параметрами и в отличие от бильных мельниц не требует последующей сепарации.

Результаты диссертационного исследования рассмотрены, одобрены и приняты для конструкторско-технологической проработки и изготовления опытно-промышленного образца передвижного комплекса переработки шламовых отходов шлифовального производства на ОАО «Технология» в г. Азов.

#### 5.4. Основные направления использования сырья переработки шламовых отходов и перспективы дальнейшего развития результатов исследования

Как было сказано ранее, сырье, полученное из шлифовального шлама, может быть использовано повторно. В таблице 5.3 представлены основные направления и целевое назначение продуктов вторичной переработки.

Таблица 5.3

Основные направления и целевое назначение продуктов вторичной переработки

Область применения	Целевое назначение	Источник
Порошковая металлургия	Получение постоянных магнитов; изготовление сепараторов подшипников, антифрикционных втулок	[8; 13; 14; 40; 45; 54; 81; 91]
Литейное производство	Получение огнеупорного облицовочного материала, одноразовых форм для литья по выплавляемым моделям	[37; 40]
Инструментальное производство	Изготовление сварочных электродов, проволоки для плазменной наплавки, шлифовальных кругов	[55; 69; 87; 90; 92]
Строительные материалы	Изготовление асфальтобетонных смесей, силикатных строительных материалов	[64; 99]

#### Перспективы дальнейшего развития результатов исследования:

1. Проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по отработке конструкций технологического оборудования, реализующего ВЭМП для переработки шламовых отходов на технологичность.

2. Углубление теоретических основ процессов разрушения и измельчения в условиях ВЭМП.

3. Исследование возможности применения ВЭМП для нанесения на поверхности деталей машин твердосмазочных антифрикционных покрытий

4. Применение ВЭМП для получения вторичного сырья для изготовления изделий приборостроения и микроэлектроники.

## **Выводы по главе 5**

1. Разработаны технологические рекомендации по реализации процесса переработки шламовых отходов в устройствах с вращающимся электромагнитным полем.
2. Разработаны рекомендации по обоснованию конструктивных и технических характеристик комплекса для разрушения и измельчения шламовых отходов на основе устройств с ВЭМП.
3. Проведена технико-экономическая оценка эффективности применяемых устройств, которая показала, что по сравнению с переработкой на базе устройств, состоящих из бильной мельницы и магнитовибрационного сепаратора, разработанный комплекс позволяет повысить технико-экономическую эффективность переработки шламовых в четыре раза.
4. Определены основные направления использования сырья переработки шламовых отходов в области порошковой металлургии, литейного и инструментального производства.
5. Определены перспективы дальнейшего применения результатов диссертационного исследования.

## **Заключение**

Предложен способ разрушения и измельчения шламовых отходов шлифовального производства, основанный на использовании вращающегося электромагнитного поля. Способ отличается от существующих методов высокой производительностью и технико-экономической эффективностью, позволяет производить разрушение, разделение и измельчение конгломератов шлама за счёт их взаимного ударно-импульсного соударения. В результате проведенного комплекса исследований, сочетающего аналитические и экспериментальные методы, созданы физико-технические основы переработки шламов с применением электромагнитного поля, разработаны технические средства и технологии по реализации основных этапов переработки шламовых отходов шлифовального производства, обеспечивающие получение вторичного сырья для дальнейшего использования, например при изготовлении изделий порошковой металлургии, в литейном и инструментальном производстве.

Заключение детализируется общими выводами, вытекающими из материалов диссертации.

## **Общие выводы**

1. Разработана аналитическая модель, раскрывающая кинетические закономерности магнитовибрирования шламовых частиц во вращающемся электромагнитном поле в зависимости от индукции и частоты магнитного поля, продолжительности его воздействия, степени загрузки рабочей зоны устройства, магнитных свойств среды и позволяющая оценить их энергетическое состояние.

2. Предложены расчетные зависимости, позволяющие определить величину пороговых значений индукции магнитного поля, при которых обеспечивается технологический эффект разрушения конгломератов и измельчения ферромагнитных частиц в условиях вращающегося электромагнитного поля, а также оценить продолжительность выполнения этих процессов.

Предложенные зависимости являются основой для проектирования технологических операций по переработке шламовых отходов и обоснования исходных характеристик устройств, разрабатываемых для их реализации.

3. Установлено, что для реализации процессов разделения конгломератов шлама на ферромагнитную и неферромагнитную компоненты, индукция вращающегося электромагнитного поля должна быть выше 2,5 мТл, а для реализации процесса измельчения ферромагнитных (стальных) частиц требуется высокоградиентное поле с индукцией не менее 5,5 мТл.

4. Доказано, что наибольшая энергетическая активность частиц шламовых отходов и, как следствие, производительность процессов разрушения и измельчения конгломератов достигаются при частотах магнитного поля в пределах 50–60 Гц и нагрузке среды не более чем на 35–40 % от объёма рабочей зоны устройства.

5. Разработанные экспериментальные методики и устройства обеспечивают с достаточной для практики точностью проведение оценки и контроля энергетического состояния магнитовибрирующего слоя и гранулометрических характеристик ферромагнитных частиц, получаемых в процессе переработки шламовых отходов в устройствах с вращающимся электромагнитным полем.

6. Разработанный комплекс для переработки шламовых отходов успешно решает задачу совмещения процессов разрушения, разделения и измельчения конгломератов без их последующей дополнительной сепарации и по сравнению с переработкой шламов в бильной мельнице и магнитовибрационном сепараторе позволяет повысить технико-экономическую эффективность переработки шламовых отходов в четыре раза.

7. Полученные результаты проведённых исследований по переработке шламовых отходов шлифовального производства с применением устройств с вращающимся электромагнитным полем способствуют решению важных народнохозяйственных задач, таких как ресурсосбережение сырья и импортозамещение технологий и средств по их переработке.

## Список литературы

1. Haspel D. W. Pelletizing waste materials [British Steel Corp]. Pat. England № 2042376, Class. V22G 9/00, (2001).
2. Pickin I.A. Production of spongy iron [British Steel Corp]. Pat. England №1557563, Class. C22B 1/14, (1976).
3. Procédé de récupération et composants des bouers d'opérations de rectification et dispositif de mis et oeuvre (Centro Ricerche Fiat SpA), Application 2419318 France V08V 11/00, (2000).
4. Research of the possibility of using an electrical discharge machining metal powder in selective laser melting [Electronic resource] / A.A. Golubeva [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 177. 27–29 October 2016, Tomsk, Russian Federation. URL: <http://iopscience.iop.org/1757-899X/177/1/012119>
5. Vernigorov Y.M., Egorov I.N., Egorova S.I. Disperse ferromagnet in the magnetovibrating layer // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2005. Vol. 290–291. Pp. 1177–1180.
6. Vernigorov Y.M., Egorov I.N., Egorova S.I. The application of a magnetovibrating layer to the milling of ferromagnetic materials // Euro PM2005 Powder Metallurgy Congress and Exhibition: Proceedings. Vol. 1. 2–5 October, Prague, Czech Republic, 2005. Pp. 451–455.
7. Vernigorov Y.M., Leletko K.K., Frolova N.N. Simulation of destruction of ferromagnetic materials particles in magneto-vibrational layer // World Science Proceedings of articles the international scientific conference. 2017. Pp. 59–70.
8. Андреев С.Е., Перов В.А., Зверевич В.В. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1980. 415 с.
9. Андрианов Е.И. Методы определения структурно-механических характеристик порошкообразных материалов. М.: Химия, 1982. 256 с.
10. Апполонский С.М., Леонтьев В.В. Электротехника и электроника. Трехфазные электрические цепи. СПб.: СЗТУ, 2002. 59 с.

11. Бабичев А.П., Вернигоров Ю.М., Фролова Н.Н. Режимы работы устройства тонкого помола порошка  $\text{SmCo 5}$  // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2012. № 6 (296). С. 64–70.
12. Багаев В.Н., Тетюхин В.В. Взаимодействие реальных диполей и структурообразование в дисперсных системах // Инженерно-физический журнал. 1985. Т.48, № 3. С. 507–508.
13. Багайсков Ю.С., Шумячер В.М. Повышение эксплуатационных показателей изделий из абразивных композиционных материалов: монография. Волгоград: ВолгГАСУ, 2005. 200 с.
14. Баглюк Г.А., Позняк Л.А., Дацкевич О.В. Получение и свойства порошковой стали из безабразивных шламовых отходов подшипникового производства // Вестник машиностроения. 1993. № 10. С. 15–17.
15. Барон Ю.М. Технология абразивной обработки в магнитном поле. Ленинград: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1975. 128 с.
16. Безъязычный В.Ф. Основы технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 2013. 568 с.
17. Бибик Е.Е. Реология дисперсных систем. Л.: Энергия, 1981. 172 с.
18. Биткина Н.С., Вернигоров Ю.М., Лемешко Г.Ф. Формирование магнитной структуры порошковых изделий в сильно неоднородном электромагнитном поле // Технология получения и свойства порошковых и композиционных материалов. Пенза, 1987. С. 40–42.
19. Боголюбов Н.Н., Митропольский Ю.А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. М.: Наука. 1974. 503 с.
20. Болдырев А.И. Новые методы комбинированной обработки // Механики XXI века. 2012. № 11. С. 135–141.
21. Болога М.К., Марта И.Ф. Магнитоожигение во вращающемся магнитном поле // Магнитная гидродинамика. 1988. № 3. С. 103–108.
22. Болога М.К., Заморев В.М., Сюткин С.В. Некоторые динамические аспекты магнитоожигенных слоев // Электронная обработка материалов. 1986. № 1. С. 59–63.



23. Брандт З. Статические методы анализа наблюдений / пер. с англ. Г.А. Погребинского; под ред. В.Ф. Писаренко. М.: Мир, 1975. 312 с.

24. Бувевич Ю.А., Сюткин С.В., Тетюхин В.В. К теории развитого магнитоожигенного слоя // Магнитная гидродинамика. 1984. № 4. С. 3–11.

25. Буланов В.Я., Кватер А.М., Долгаль Т.В. Диагностика металлических порошков. М.: Наука, 1983. 280 с.

26. Бутенко В.И. Локальная отделочно-упрочняющая обработка поверхностей деталей машин. Таганрог: ТРТУ, 2006. 126 с.

27. Вернигоров Ю.М. Магнитовибрационная технология производства порошковых магнитов: дис. ... д-ра техн. наук. Ростов-на-Дону, 1995. 369 с.

28. Вернигоров Ю.М., Лебедев В.А., Ширин А.А. Принципиальная технологическая схема переработки шламовых отходов шлифовального производства // Перспективные направления развития отделочно-упрочняющей обработки и виброволновых технологий: сб. трудов научного семинара, посвященного памяти заслуженного деятеля науки и техники РФ, доктора технических наук, почётного профессора ДГТУ А.П. Бабичева. Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2020. С. 370–374.

29. Вернигоров Ю.М., Лебедев В.А., Ширин А.А. Предпосылки применения вращающегося электромагнитного поля для разделения шламовых отходов шлифовального производства // Фундаментальные основы физики, химии и динамики наукоёмких технологических систем формообразования и сборки изделий: сб. трудов научного симпозиума технологов-машиностроителей. Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2019. С. 418–420.

30. Вернигоров Ю.М., Фролова Н.Н. Разрушение частиц ферромагнитного материала в магнитовибрирующем слое с высокой порозностью // Вестник ДГТУ. 2011. Т. 11, № 7 (58). С. 1127–1131.

31. Вернигоров Ю.М., Фролова Н.Н., Плотников Д.М. Практическое применение отходов шлифовального производства // Современные тенденции развития науки и технологий. 2017. № 3–4. С. 17–22.

32. Вернигоров Ю.М., Ширин А.А., Демин Г.В. Энергетические условия, обеспечивающие формирование и устойчивый режим магнитовибрирующего слоя

во вращающемся электромагнитном поле // *Фундаментальные основы физики, химии и механики наукоёмких технологических систем формообразования и сборки изделий*: сб. тр. науч. симпозиума технологов-машиностроителей. Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2020. С. 338–342.

33. Вершинин Н.П. Установки активации процессов. Использование в промышленности и сельском хозяйстве. Сальск: Международная Академия авторов открытий и изобретений, 2004. 313 с.

34. Винтер Ж. Магнитный резонанс в металлах / пер. с англ. А.П. Степанова; под ред. Г.В. Сквозького. М.: Мир, 1976. 288 с.

35. Влияние методов обработки на физико-механические и технологические свойства порошка из стружки стали ШХ15 / В.Г. Кислов [и др.] // *Порошковая металлургия*. 1987. № 8. С. 9–12.

36. Воскресенский А.П. Некоторые вопросы проектирования индукционных вращателей // Сб. «Труды Всесоюзного научно-исследовательского института электромеханики». ВНИИЭМ. Т. 36. М., 1971. С. 96–110.

37. Выделение немагнитной фракции из шламовых отходов металлопроизводства в электромагнитном поле / Ю.М. Вернигоров [и др.] // *Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации)*: мат-лы IX Всерос. науч.-техн. конф. с международным участием (Иркутск, 24-26 апреля 2019 г.) / под ред. С.А. Зайдеса. Иркутск: Изд-во ИРННТУ, 2019. С. 50–56.

38. Гаркунов Д.Н., Сураинов Г.И., Коптяева Г.Б. О природе повышения износостойкости деталей и инструмента магнитной обработкой // *Трение и износ*. 1982. № 2. С. 496–498.

39. Генкин В.А., Гурленя В.Н., Дмитриевич А.А. Исследование спеченного фрикционного материала на основе порошка подшипниковой стали // *Порошковая металлургия*. 1982. № 6. С. 58–61.

40. Гнеденко Б.В. Курс теории вероятностей. М.: Наука, 1988. 448 с.

41. Горелик С.С., Расторгуев Л.Н., Скаков Ю.А. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. М.: Металлургия, 1970.

42. Григорьев С.Н., Смоленцев Е.В., Волосова М.А. Технология обработки концентрированными потоками энергии. Старый Оскол: ТНТ, 2009. 280 с.
43. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия / Пер. с англ. В.Э. Наумова, А.А. Спектора; под ред. Р.В. Гольдштейна. М.: Мир, 1989. 509 с.
44. Динамика высокоскоростного удара и сопутствующие физические явления / Н.Н. Белов [и др.]. Нортхэмптон: STT, 2005. 354 с.
45. Егорова С.И. Измельчение магнитных материалов в магнитовибрирующем // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2009. № 4. С. 5–10.
46. Егорова С.И. Магнитовибрационное ожигание. Ростов-на-Дону: Изд. центр ДГТУ, 2009. 162 с.
47. Егорова С.И., Егоров И.Н. Способ измельчения порошков магнитных материалов // Технология металлов. 2008. № 12. С. 33–37.
48. Зозуля В.Д. Применение шлифовальных металлоабразивных отходов в порошковой металлургии // Порошковая металлургия. 1988. № 3. С. 92–95.
49. Иванов В.В., Бабичев А.П. Вибрационные механохимические покрытия. Саарбрюкен, Германия: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 119 с.
50. Изготовление шлифовальных кругов повышенной твердости и прочности путем использования шлифовальных материалов различных зернистостей / Ю.Ф. Юликова [и др.] // Абразивы: Экспресс информация. М., 1981. Вып. 1. С. 6–12.
51. Ильин Н.И., Коротков Г.А., Шмиголь В.Г. Обезжиривание металлической стружки. М.: Черметинформация, 1980. С. 18–19.
52. Инженерные методы исследования ударных процессов. Г.С. Батуев, Ю.В. Голубков, А.К. Ефремов, А.А. Федосов. 2-е изд., перераб. М.: Машиностроение, 1977. 240 с.
53. Исследование критического коэффициента заполнения аппарата с вихревым слоем ферромагнитными частицами / В.В. Кафаров [и др.] // Химическое и нефтяное машиностроение. 1973. № 11. С. 74–81.

54. Исследование параметров магнитного поля в рабочей камере индуктора / Н.В. Лимаренко [и др.] // Вестник Донского государственного технического университета. 2016. Т. 16, № 1(84). С. 136–142.

55. Исследование шламов в абразивном производстве с целью их дальнейшей утилизации / О.В Карпова [и др.] // Материаловедение, технология и экология в третьем тысячелетии: II Всерос. конфер. молодых ученых (3–6 ноября 2003, Томск). Томск: ТНЦ СО РАН, 2003. С. 39–41.

56. Кадырметов А.М. Управление технологическим обеспечением процессов плазменного нанесения покрытий в режиме модуляции электрических параметров: монография. Воронеж: ИПЦ Научная книга, 2013. 260 с.

57. Кармазин В.В. Зависимость эффективности процесса сухой центробежной магнитной сепарации от частоты магнитного поля // Электрические и магнитные методы сепарации. М.: Наука, 1965. С. 68–76.

58. Каяк Г.Л., Фоменко В.С., Чернышев В.Г. Регенерация отходов быстрорежущих сталей // Комплексное освоение техногенных месторождений: тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. Челябинск, 1990. С. 23–25.

59. Кипарисов С.С., Падалко О.В. Оборудование предприятий порошковой металлургии. М.: Металлургия, 1988. 447 с.

60. Кипарисов С.С., Падалко О.В. Проблемы получения порошков и изделий из них с использованием в качестве сырья стружковых отходов // Порошковая металлургия. 1979. № 9. С. 56–65.

61. Кипарисов С.С., Падалко О.В., Саруханов Р.Г. Оценка загрязненности и отчистки от СОЖ стружки быстрорежущей стали по переработке ее в порошок // Порошковая металлургия. 1984. № 6. С. 14–17.

62. Киричек А.В., Соловьев Д.Л. Технология упрочнения волнами деформации // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2012. № 2-2(292). С. 13–17.

63. Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Лазуткин А.Г. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием: монография. М.: Машиностроение, 2004. 287 с.

64. Кислов В.Г., Зухер М.С., Степнов С.А. Применение в отрасли конструкционных и антифрикционных материалов, изготовленных методами порошковой металлургии // Тракторы и сельхозмашины. 1982. № 4. С. 29–30.

65. Классификация порошковых материалов режиме электродинамического ожигения / Ю.М. Вернигоров [и др.] // Фундаментальные основы физики, химии и динамики наукоёмких технологических систем формообразования и сборки изделий: сб. трудов научного симпозиума технологов-машиностроителей. Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2019. С. 231–234.

66. Коновалов Е.Г., Шулев Г.С. Чистовая обработка деталей в магнитном поле ферромагнитными порошками. Минск: Наука и техника, 1967. 125 с.

67. Кочубей А.А., Лебедев В.А. Кинетическое состояние ферромагнитных инденторов в магнитоожигенном вращающемся слое // Аграрный потенциал в системе продовольственного обеспечения: теория и практика: сб. тр. всероссийской. науч.-практ. конф. (Ульяновск, 21–22 июня 2016 г.): в 2 ч. Ульяновск: Ульяновский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина, 2016. Ч. 2. С. 83–89.

68. Кочубей А.А., Лебедев В.А. Применение вращающегося электромагнитного поля в технологических целях // Интегрированные и виброволновые технологии в машиностроении, металлообработке и др. отраслях: сб. ст. Междунар. науч. симпозиум технологов-машиностроителей (30 сентября – 03 октября, п. Дивноморское). Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2015. С. 210–217.

69. Лебедев В.А. Технологическое обеспечение качества поверхности при вибрационной ударно-импульсной обработке: дис. ... канд. техн. наук. Тула, 1984. 185 с.

70. Лебедев В.А., Ширин А.А. Моделирование процесса переработки шламовых отходов бесконтактным способом // Современные тенденции развития инструментальных систем и металлообрабатывающих комплексов: сб. тр. науч.-практ. конф., посвященной памяти заслуженного деятеля науки и техники РФ, д.т.н., профессора Рыжкина А.А. Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2022.

71. Лебедев В.А., Вернигоров Ю.М., Кочубей А.А. Сущность и закономерности динамики процесса обработки ферромагнитными гранулированными среда-

ми во вращающемся электромагнитном поле // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. 2016. № 1(52). С. 84–91.

72. Лебедев В.А., Кочубей А.А. Отделочно-упрочняющая обработка деталей свободнодвижущимися инденторами в условиях вращающегося электромагнитного поля // Аспекты развития науки, образования и модернизации промышленности: материалы XIII региональной научно-практической конференции учреждений высшего и среднего профессионального образования (Таганрог, 21 мая 2015 г.). Таганрог: Донской государственный технический университет, 2015. С. 245–247.

73. Лебедев В.А., Ширин А.А., Коваль Н.С. Энергетические аспекты измельчения ферромагнитных частиц шлифовального шлама во вращающемся электромагнитном поле // Транспортное машиностроение. 2022. № 1-2(1-2). С. 29–39.

74. Либенсон Г.А. Основы порошковой металлургии. М.: Металлургия, 1987. 208 с.

75. Логвиненко Д.Д., Щеляков О.П. Интенсификация технологических процессов в аппаратах с вихревым слоем. Киев: Техника, 1976. 143 с.

76. Макаров Ю.И. Аппараты для смешения сыпучих материалов. М.: Машиностроение, 1973. 216 с.

77. Марта И.Ф. Магнитооживление во вращающемся магнитном поле // Магнитная гидродинамика. 1987. № 4. С. 83–90.

78. Мяздриков О.А. Электродинамическое псевдооживление. Межвуз. Сб. научн. трудов ЛТИ им. Ленсовета. 1976. № 1. С. 3–13.

79. Негреев В.М., Гостева Н.С. Установка для обработки металлической стружки. Би, 1976, № 40.

80. О движение частиц в магнитооживленном слое / М.К. Болога [и др.] // Материалы XI Рижского совещ. по МГД. Ч. 111. Магн. жидк. Саласпилс. 1984. С. 139–142.

81. О движении частиц при магнитооживлении в переменном поле / Ю.А. Бувеч [и др.] // Магнитная гидродинамика. 1985. № 3. С. 3–12.

82. Области применения аппаратов с вихревым слоем, создаваемым электромагнитным полем / В.А. Кафаев [и др.] // Химическое и нефтяное машиностроение. 1974. № 11. С. 718–721.

83. Орлова Т.Н., Орлов И.Ю., Пушкарская О.Ю. Исследование и разработка технологии переработки (применения) шламов подшипниковых заводов для использования в производстве абразивного инструмента // Абразивный инструмент и металлообработка: сб. науч. тр. Челябинск: ОАО УНИИАШ, 2004.

84. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара. Л.: Политехника, 1990. 272 с.

85. Пановский В., Филипс М. Классическая электродинамика. М.: Наука, 1978. 432 с.

86. Повстяной А.Ю., Рудь В.Д. Использование отходов промышленного производства для изготовления материалов конструкционного назначения // Устойчивое развитие. 2014. № 19. С. 159–164.

87. Поливанов К.М., Левитан С.А. Об одной задаче расчета вращающегося электромагнитного поля // Электротехника. 1969. № 12. С. 24–26.

88. Продолжительность нанесения вибрационного механохимического твердосмазочного покрытия MoS<sub>2</sub> / В.В. Иванов [и др.] // ПОЛИКОМТРИБ-2015: тезисы докладов международной научно-технической конференции. Гомель: Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси, 2015. С. 165.

89. Проходцев М.М. Технология получения металлического порошка из отходов подшипникового производства и свойства порошковых компактных материалов // Труды ВНИИПП. 1982. № 1 (111). С. 92–99.

90. Раковский В.С., Соколинский В.В., Смирнова И.Н. Изготовление металлокерамических изделий из отходов шарикоподшипниковой стали // Литейное производство. 1951. № 3. С. 25–27.

91. Роман О.В., Беляев В.И., Куцер М.Л. Применение стального порошка для изготовления деталей машин и матриц методом порошковой металлургии. Минск, 1963. 59 с.

92. Свиридов М.М., Таров В.П., Шубин И.Н. Текучесть сыпучего материала // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 1999. Т. 5, № 4. С. 55.

93. Синолицын Э.К., Рубанов В.В., Сиденков В.А. Энергетическая оценка влияния аморфизации дискретных жидких частиц на адгезионную прочность газотермических покрытий // Математическое моделирование и алгоритмы для имитации физических процессов: мат. Междунар. науч.-техн. конф. (11–14 сентября 2006 г., Таганрог). Т. 1. С.87–90.

94. Смоленцев В.П. Справочник технолога-машиностроителя: [в 2 т.]. М., 2000. Т. 1–2.

95. Смоленцев В.П. Технология импульсно-вибрационной очистки прецизионных литых деталей / В.П. Смоленцев, С.В. Сафонов, А.Ю. Рязанцев, В.И. Котуков [и др.] // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии имени П. А. Соловьева. 2014. № 1. С. 40–44.

96. Смоленцев Е.В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки. М.: Машиностроение, 2005. 511 с.

97. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки // Г.Л. Амитан [и др.]; под общ. ред. В.А. Волосатова. Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1988. 719 с.

98. Степаненко А.В., Ложечников Е.Б., Ложечников Е.В. Получение стального порошка из шламов подшипникового производства // Порошковая металлургия. 1984. № 11. С. 97–101.

99. Судина С.В., Шуменко В.Н., Шуменко В.В. Применение очищенного опилочного шлама для получения спеченных изделий // Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы, сварка: сб. докл. 8-го Междунар. симпозиума. Ч. 1. Минск, 2013. С. 356–359.

100. Таков Г., Македонски Б., Барон Ю. Струйная гидрообразивная обработка, управляемая магнитным полем // Металлообработка. 2008. № 6 (48). С. 25–28.



101. Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Друппов В.В. Формирование параметров качества поверхности при центробежно-ротационной обработке в среде абразива // Упрочняющие технологии и покрытия. 2007. № 10. С. 19–24.

102. Теория вероятности в решении технологических задач (на примере вибрационной обработки в гранулированных средах) / А.П. Бабичев [и др.]. Ростов-на-Дону: Изд. центр ДГТУ, 2013. 126 с.

103. Технологические возможности обработки деталей в устройствах с вращающимся электромагнитным полем и перспективы их применения / В.А. Лебедев [и др.] // Научно-технические технологии в машиностроении. 2020. № 10 (112). С. 22–28.

104. Технология применения неметаллической фракции шлифовального шлама / Ю.М. Вернигоров [и др.] // Перспективные направления развития отделочно-упрочняющей обработки и виброволновых технологий: сборник трудов научного семинара, посвященного памяти заслуженного деятеля науки и техники РФ, доктора технических наук, почетного профессора ДГТУ А.П. Бабичева. Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2020. С. 82–88.

105. Тиханцов А.М. Новое эффективное оборудование для транспортировки и переработки стружки // Проблемы и мероприятия по механизации сбора, транспортирования и переработки металлической стружки и отходов прессового производства. Волгоград, 1980. С. 31.

106. Ходаков Г.С. Физика измельчения. М.: Издательство литературы по строительству, 1985. 307 с.

107. Цаиткер К.Л., Логвиненко Д.Д. Герметичный аппарат для проведения процессов в псевдооживленном слое // Химическое и нефтяное машиностроение. 1971. № 4.

108. Членов В.А., Михайлов Н.В. Виброкипящий слой. М.: Наука, 1972. 146 с.

109. Ширин А.А., Демин Г.В. Применение устройств с вращающимся электромагнитным полем в технологии переработки шламовых отходов металлопроизводства // Перспективные направления развития финишных и виброволновых технологий: сб. тр. научн. семинара технологов-машиностроителей. Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2021. С. 400–406.

110. Шоркин В.А., Фроленкова Л.Ю., Азаров А.С. Учет влияния тройного взаимодействия частиц среды на поверхностные и адгезионные свойства твердых тел // *Металловедение*. 2011. № 2. С. 2–7.

111. Шумячер В.М., Крюков С.А. Стабилизация и регуляция структур структурно-механических характеристик абразивных инструментов. Волгоград: ВолгГАСУ, 2013. 179 с.

112. Экспериментальная проверка модели измельчения ферромагнитных порошков в винтовом барабане / Ю.М. Вернигоров [и др.] // *Перспективные направления развития финишных и виброволновых технологий: сб. трудов научного семинара технологов-машиностроителей*. Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2021. С. 113–116.

113. Энергетические аспекты отделочно-упрочняющей обработки деталей в условиях вращающегося электромагнитного поля / В.А. Лебедев [и др.] // *Наукоемкие технологии в машиностроении*. 2016. № 6(60). С. 35–42.

114. Янке Д., Эдме Ф., Леш Ф. Специальные функции (формулы, графики, таблицы). М.: Наука, 1968. 344 с.

Справка в диссертационный совет по защите докторских и кандидатских диссертаций о внедрении результатов диссертационного исследования



Российская Федерация  
ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ  
РЕМОНТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЦЕНТР  
"ТЕХНОЛОГИЯ"  
(ООО РТЦ «Технология»)  
346780 Ростовская область г. Азов, пер. Маяковского 77 «В»  
тел/факс (863-42)5-86-56;5-86-46 E-mail: rtc-azov@yandex.ru

В диссертационный  
совет по защите докторских  
и кандидатских диссертаций

**СПРАВКА**

о внедрении результатов диссертационного исследования ШИРИНА  
АНДРЕЯ АЛЕКСАНДРОВИЧА на тему «Совершенствование технологии  
переработки шламовых отходов путем применения вращающегося  
электромагнитного поля»

ООО РТЦ «Технология» подтверждает, что научные исследования и конструкторские разработки аспиранта ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» Ширина Андрея Александровича по совершенствованию технологии переработки шламовых отходов металлопроизводства путем применения вращающегося электромагнитного поля были рассмотрены, одобрены и приняты для конструкторско-технологической проработки и изготовления опытно промышленного образца передвижного комплекса переработки шламовых отходов шлифовального производства, разработанного Шириным А.А. в рамках диссертационного исследования.

Директор



А.В. Русанов

Расчет амплитуды скорости, амплитуды ускорения и градиента индукции, необходимой для разрушения конгломератов и измельчения ферромагнитных частиц

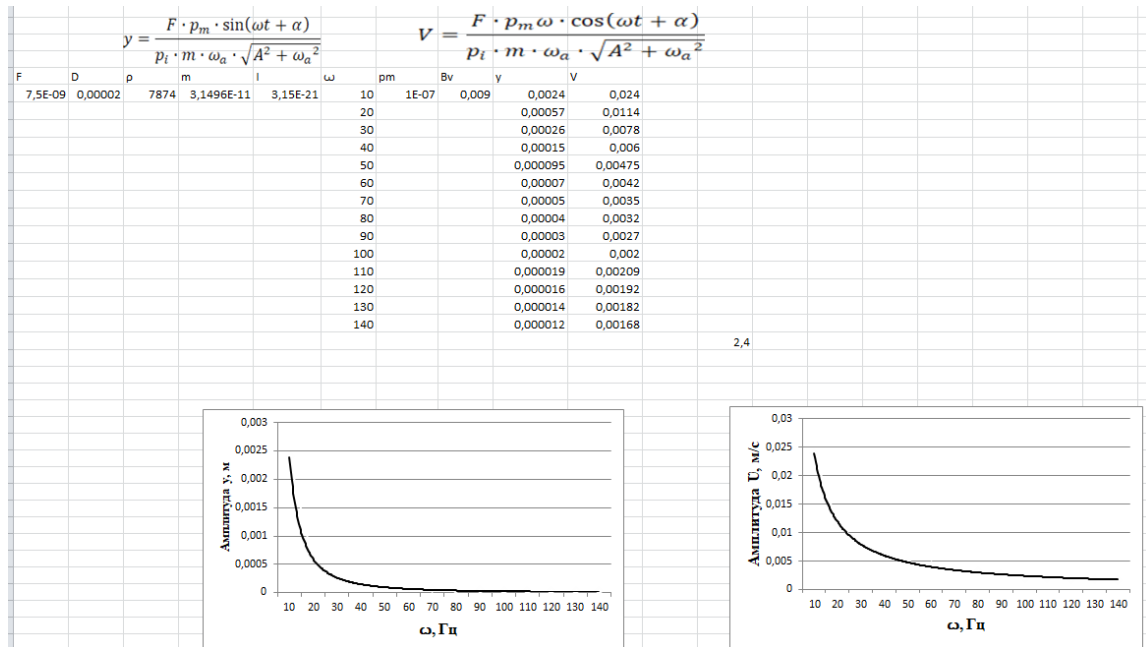


Рисунок Б.1. Расчет амплитуды перемещения и амплитуды скорости

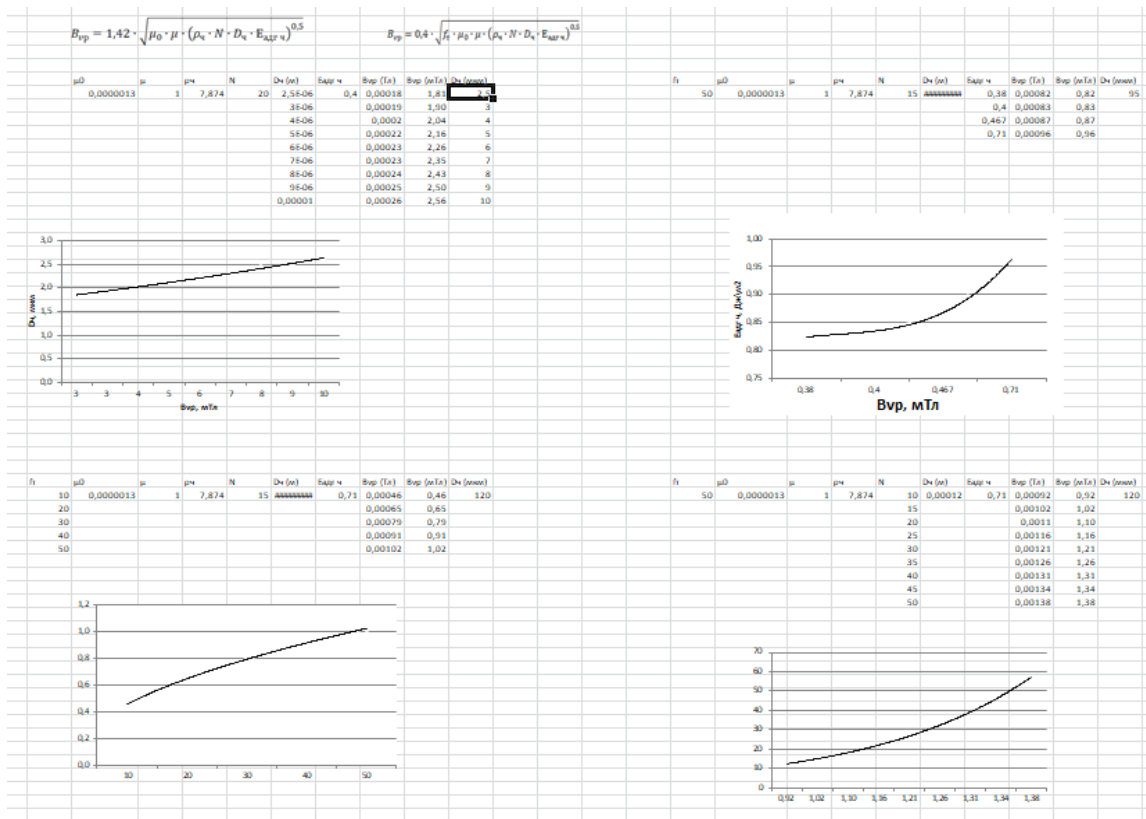


Рисунок Б.2. Расчет индукции ВЭМП при разрушении

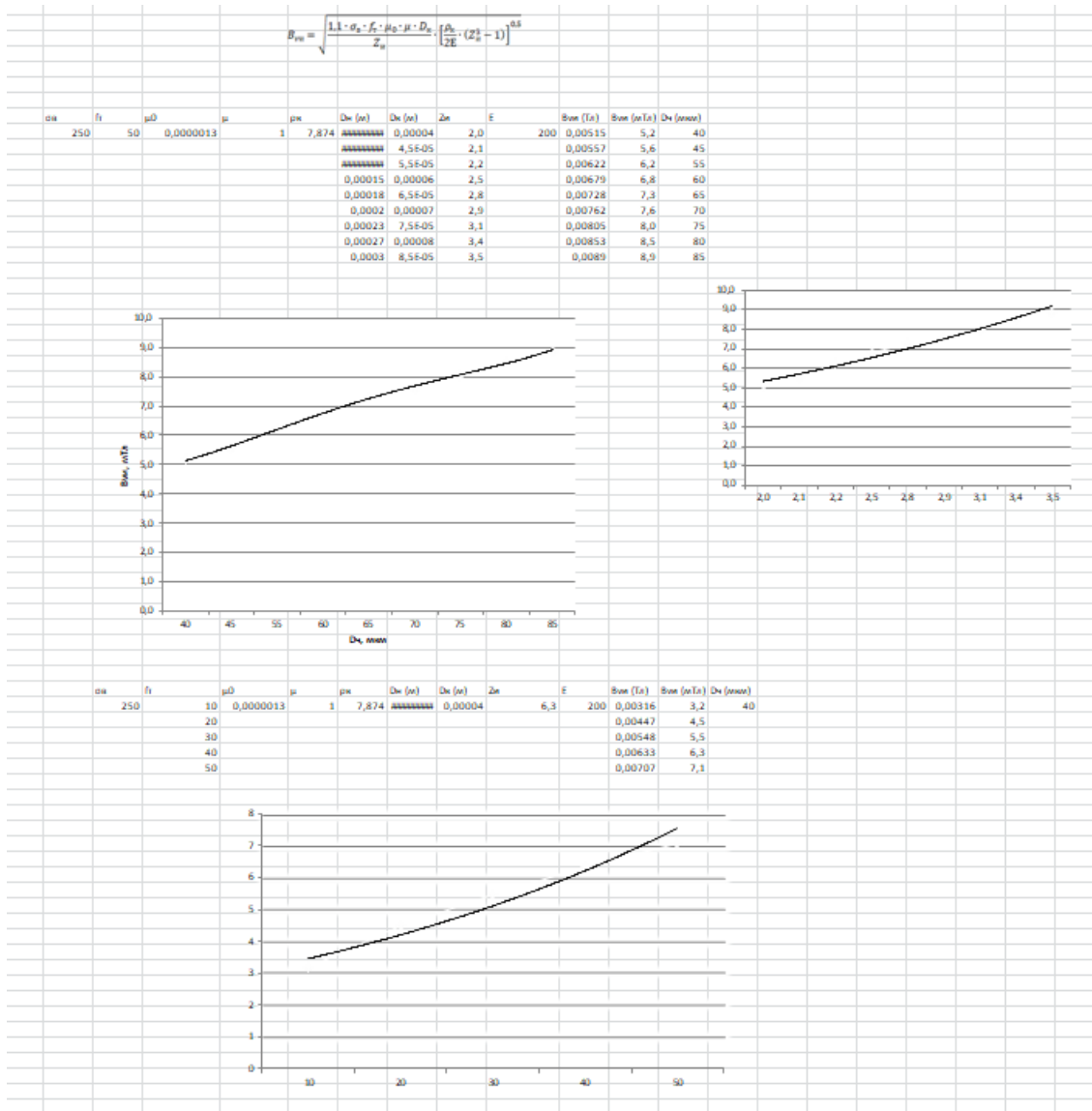


Рисунок Б.3. Расчет индукции ВЭМП при измельчении

Устройство для очистки шламовых отходов от технологической жидкости

Для очистки шламовых отходов от технической жидкости используется устройство, общий вид которого представлен на рисунке В.1.

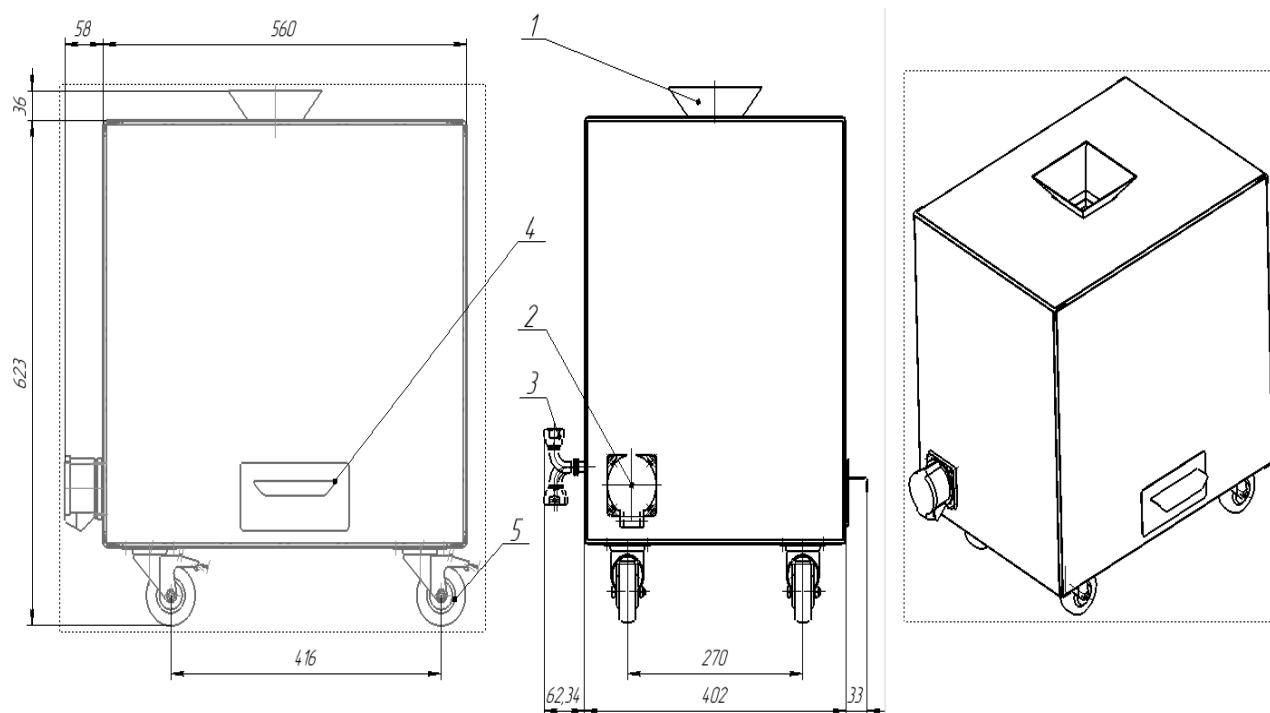


Рисунок В.1. Общий вид устройства для отделения ТЖ:

1 – бункер-приемник; 2 – разъем; 3 – патрубок; 4 – ящик; 5 – колесо

Конструктивно устройство представляет собой сварной каркас из трубы, обшитый листовым материалом. Для возможности перемещения устройства предусмотрены колеса 5. Для отвода жидкости и загрязнений из рабочей камеры, а также подачи щелочного раствора предусмотрены трубопроводы, патрубки 3 которых вынесены наружу для удобства обслуживания. Питание устройств, установленных внутри корпуса, производится напряжением 380 В, подводимым к разъему 2. Загрузка шлама осуществляется через бункер-приемник, представляющий собой жесткую сварную конструкцию.

Компоновка элементов, расположенных внутри устройства, и их основные размеры представлены на рисунке В.2.

Рабочая камера 5 является сварной и изготовлена из алюминия. Она жестко закрепляется резьбовыми соединениями на сварном каркасе, изготовленном из трубы. Внутри камеры расположены четыре нагревательных элемента 4. С помощью кронштейнов 3 и 12 производится крепление магнитопроводов пермеаметра 11 и электромагнита 2. Для подачи щелочного раствора и отвода загрязнений в виде ТЖ и масла предусмотрены трубопроводы 6 и 9.

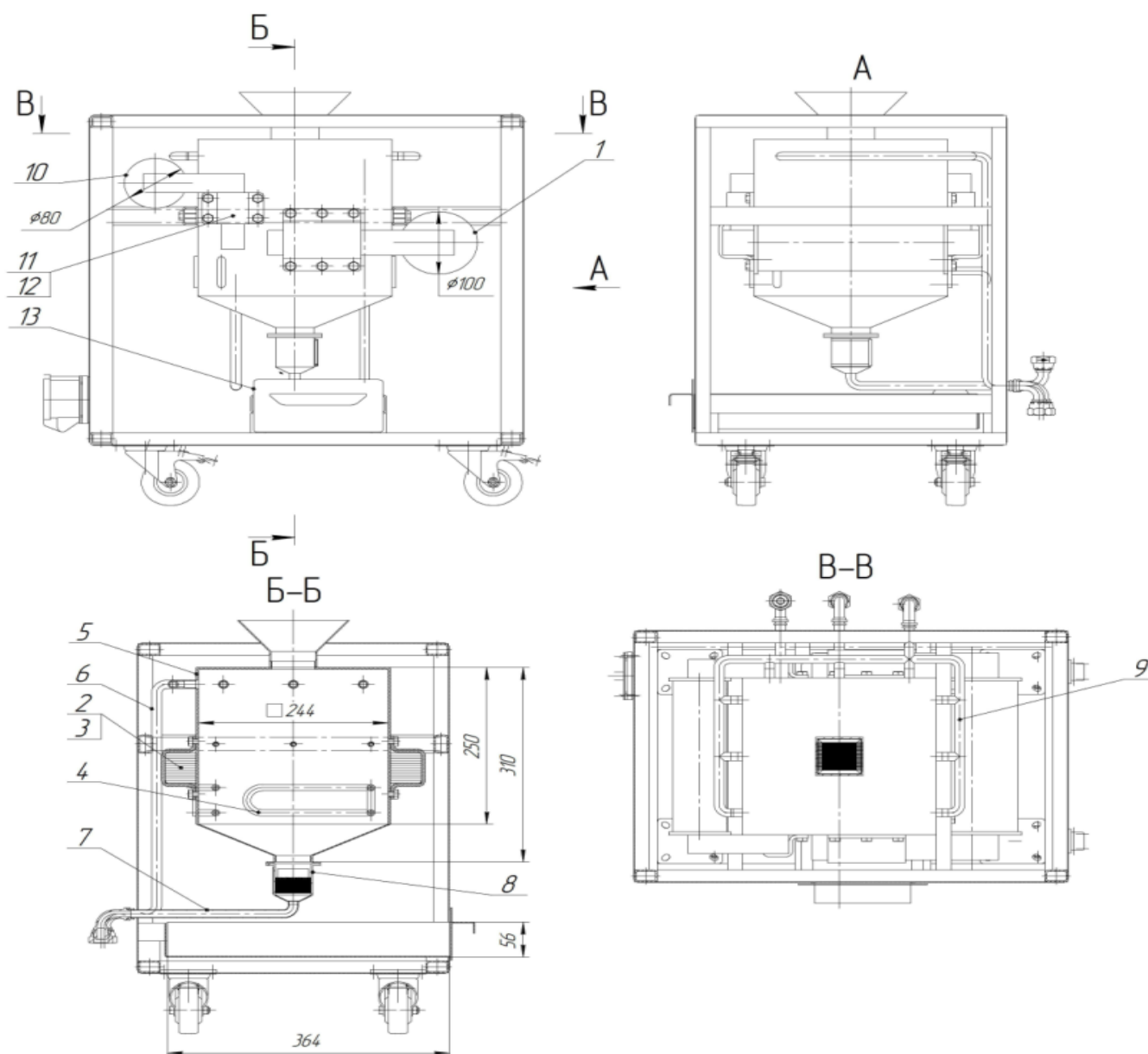


Рисунок В.2. Конструкция устройства для отделения ТЖ:

- 1 – катушка электромагнита; 2 – магнитопровод электромагнита; 3, 12 – кронштейн;  
 4 – нагревательный элемент; 5 – рабочая камера; 6, 7, 9 – трубопровод;  
 8 – блок промывки; 10 – катушка пермеаметра;  
 11 – магнитопровод пермеаметра; 13 – тара

Трубопровод 9 подсоединен к патрубкам, расположенным с трех сторон камеры. В нижней части камеры расположен фланец для крепления блока промывки 8. Его конструкция представлена на рисунке В.3.

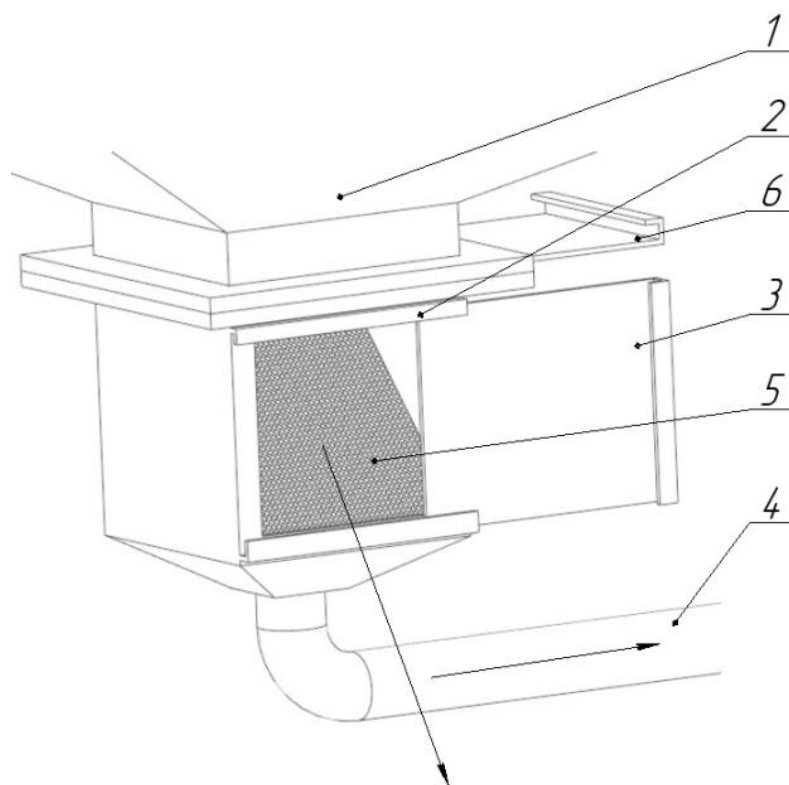


Рисунок В.3. Конструкция блока промывки:

1 – рабочая камера; 2 – направляющие; 3, 6 – шиберная заслонка; 4 – трубопровод; 5 – фильтр

Блок промывки представляет собой сварную конструкцию коробчатого типа. Для эффективного удаления жидкости нижняя его часть выполнена пирамидообразной формы, в центре которой вварен штуцер. К нему подсоединяется трубопровод 4. Во фланцевом соединении и направляющих 2 установлены шиберные заслонки 3 и 6. Во внутренней части бока расположен фильтр 5.



Устройство для сушки шламовых отходов

Для сушки шламовых отходов используется устройство, общий вид которого представлен на рисунке Г.1.

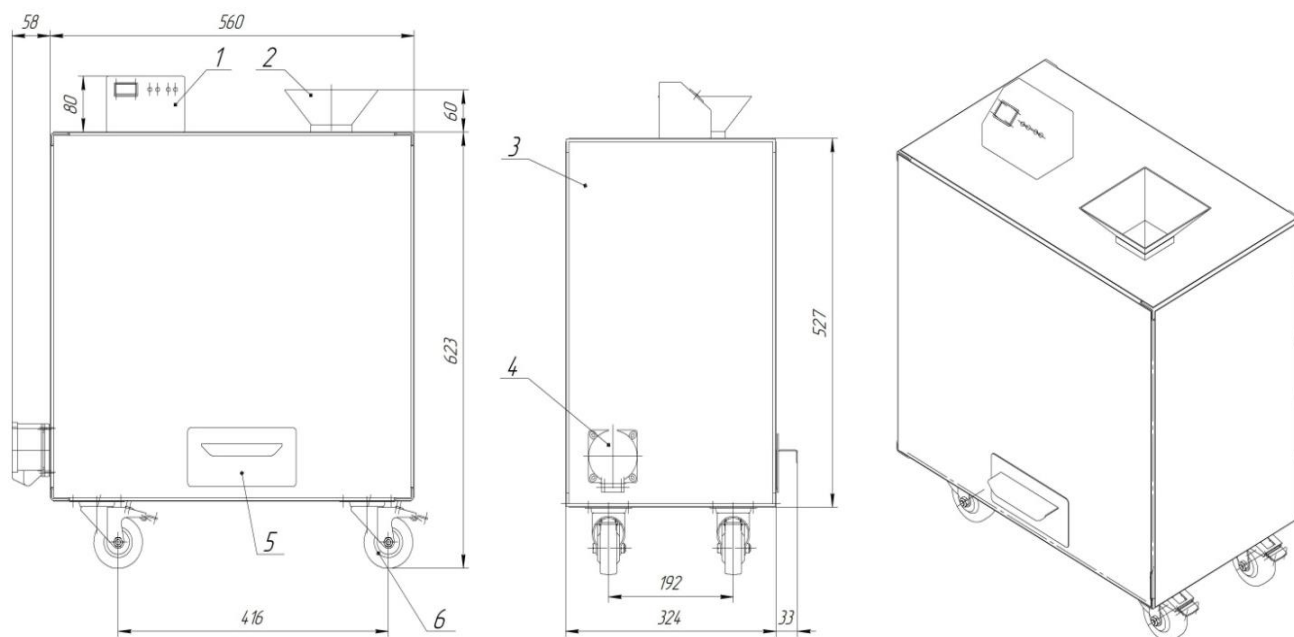


Рисунок Г.1. Общий вид сушильной установки:

1 – пульт управления; 2 – бункер-приемник; 3 – корпус; 4 – разъем; 5 – ящик; 6 – колесо

Корпус 3 сушильной установки выполнен в виде каркаса, сваренного из прямоугольной трубы и обшитого листовым материалом. Для возможности перемещения устройства предусмотрены колеса 6. Загрузка шлама производится через бункер-приемник 2. Контроль температуры и управление устройствами осуществляется с помощью пульта управления 1. Питание двигателя конвейера и ТЭН осуществляется через разъем 4, расположенный в нижней части корпуса. Просушенный шлам собирается в ящик 5.

Компоновка основных элементов сушильной установки и их размеры представлены на рисунке Г.2.

Обрабатываемый шлам через бункер-приемник подается на конвейер 2. Его лента изготовлена из термостойкого полимера и имеет отбортовку по краям для

исключения просыпания частиц шлама с конвейера. С помощью ограничителя потока 7 объем шлама равномерно распределяется по ленте толщиной в 2–3 слоя. Далее производится сушка с помощью блока 3.

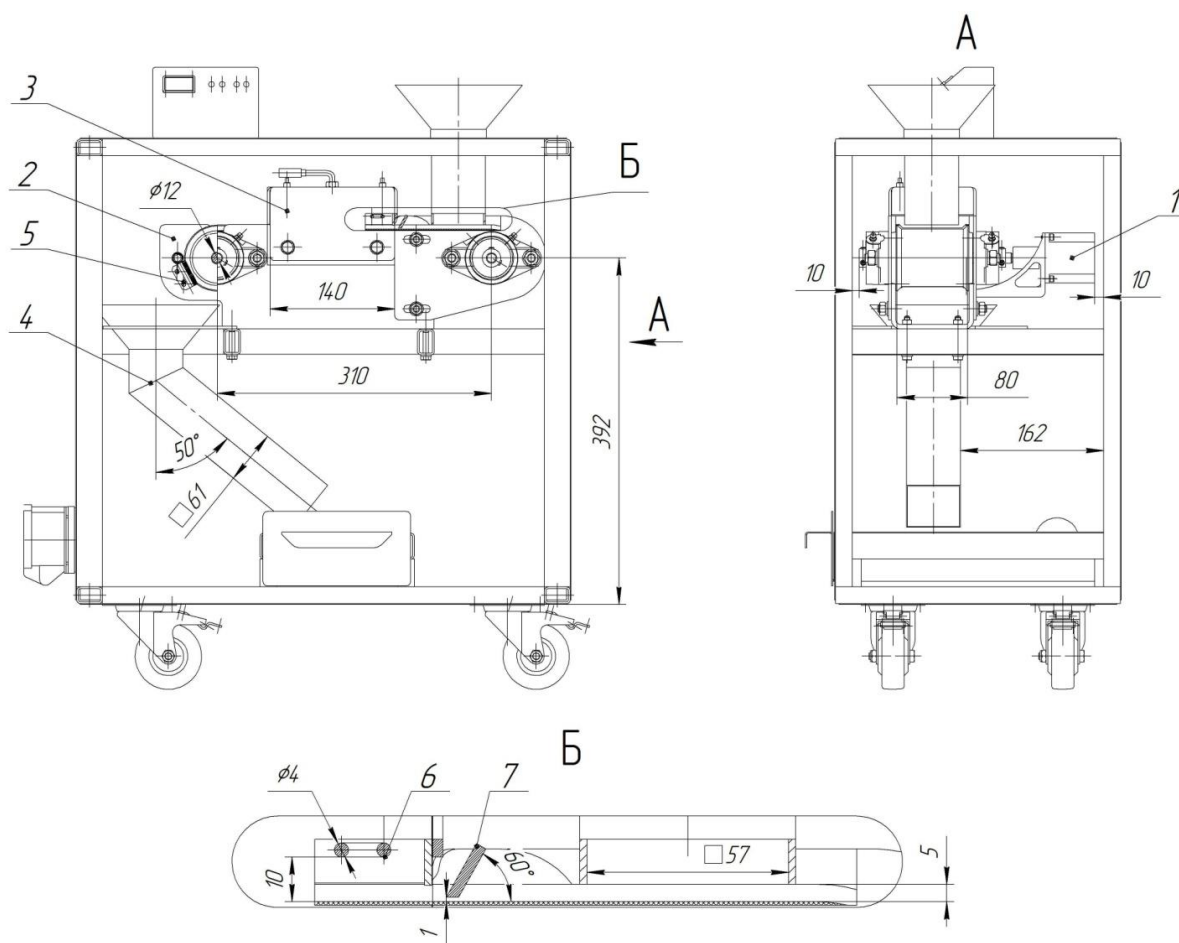


Рисунок Г.2. Конструкция сушильной установки:

1 – электродвигатель; 2 – конвейер; 3 – блок сушки; 4 – склиз; 5 – щетка;  
6 – нагревательный элемент; 7 – ограничитель потока

После сушки частицы шлама с ленты собираются с помощью щетки 5 через склиз 4 в ящик.

Блок сушки (рисунок Г.3) состоит из корпуса 2, внутренние поверхности которого покрыты теплоотражающей пленкой 2 для улучшения теплообмена со шламом.

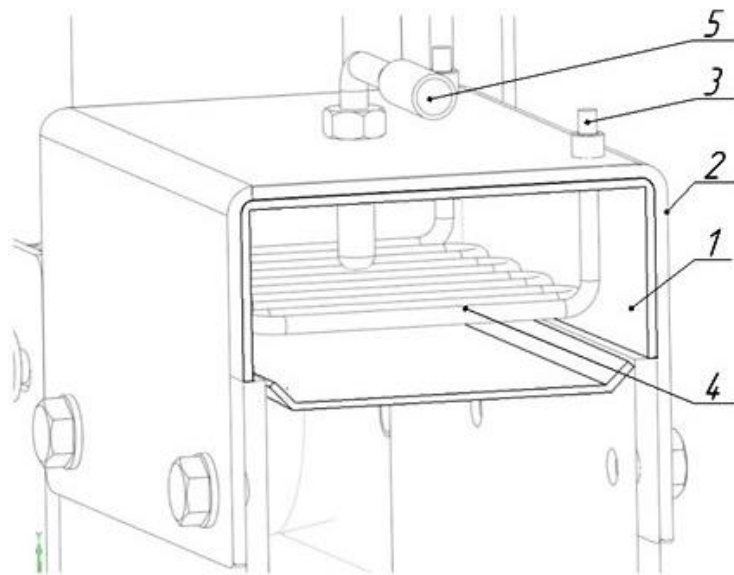


Рисунок Г.3. Конструкция блока сушки:

1 – теплоотражающая пленка; 2 – корпус;

3 – вывод; 4 – нагревательный элемент; 5 – термопара

В корпусе вварены втулки для крепления выводов 3 нагревательного элемента 4. Последний представляет собой нихромовую спираль, навитую на трубку, проходящую через всю площадь корпуса. Контроль температуры осуществляется с помощью термопары 5. Ее текущее значение отображается и регулируется на пульте управления сушильной установки. Крепление блока к конвейеру производится четырьмя болтами.

Устройство для разрушения, разделения и измельчения шламовых отходов

Рассмотренная технологическая схема устройства для разрушения, разделения и измельчения шламовых отходов может быть реализована оборудованием, внешний вид которого показан на рисунке Д.1.

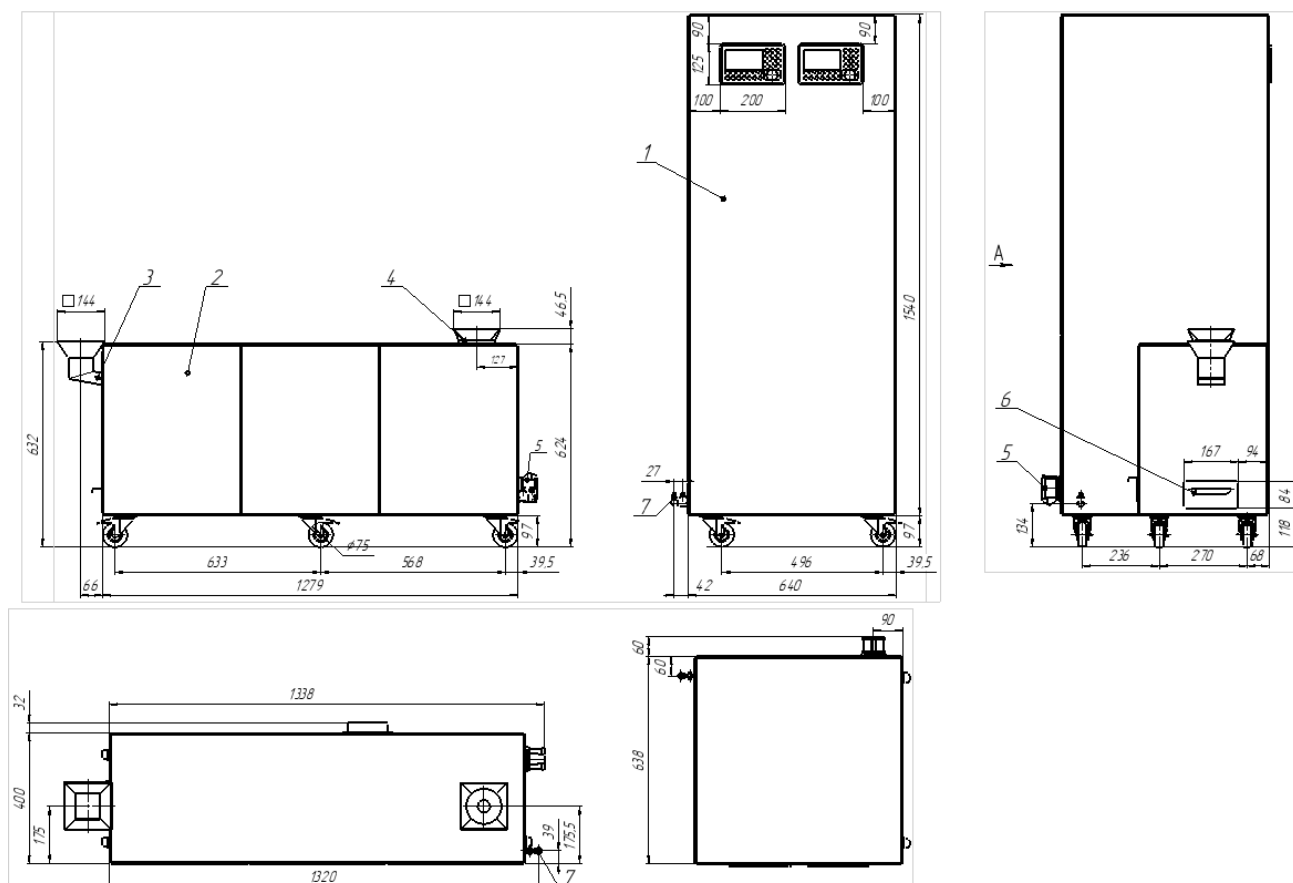


Рисунок Д.1. Основные узлы установки для разрушения, разделения и измельчения шламовых конгломератов:

1 – пульт управления; 2 – корпус; 3, 4 – бункер-приемник; 5 – разъем; 6 – ящик; 7 – штуцер

Конструктивно оборудование состоит из установки с корпусом 2 и пульта управления 1. Последний включает в себя органы управления устройствами и индикацию их состояния. В верхней части корпуса установлены бункер-приемники 3, 4 для загрузки очищенного от ТЖ и просушенного шлама соответственно. В связи с тем, что устройства с вращающимся электромагнитным полем требуют

водяного охлаждения, в нижней части пульта установлена помпа, соединенная трубопроводами с фитингами 7. Аналогичные фитинги установлены на корпусе 2. Для питания устройств используются разъемы 5. Для сбора измельченного ферромагнитного агрегата предусмотрен ящик 6.

Рассмотрим оборудование для разрушения, разделения и измельчения шлама более подробно (рисунок Д.2).

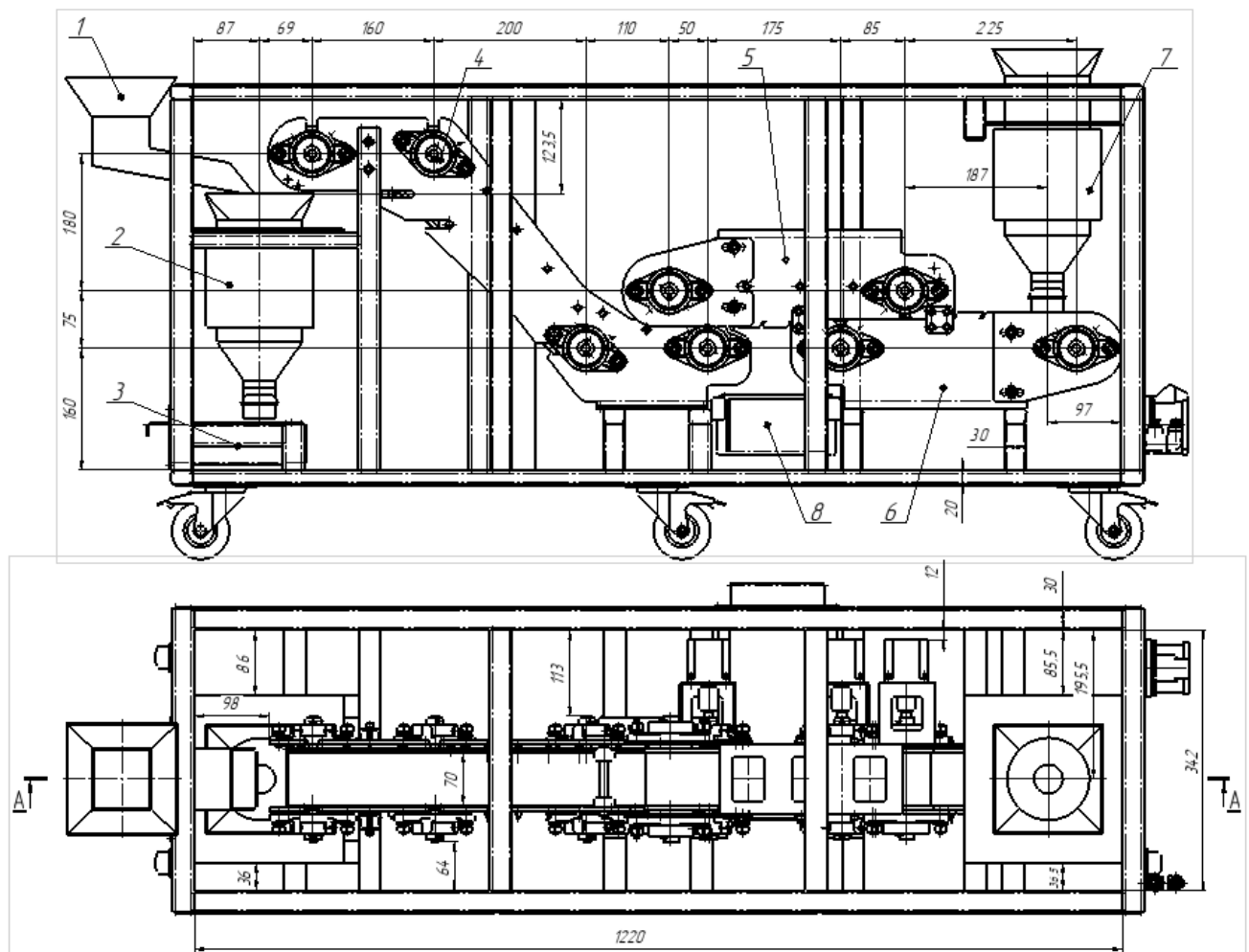


Рисунок Д.2. Конструкция установки для разрушения и измельчения шламовых конгломератов:

1 – бункер-приемник; 2, 7 – камера с электромагнитами; 3, 8 – ящик; 4, 5, 6 – конвейер

Все элементы конструкции жестко закреплены на сварном каркасе установки, изготовленном из трубы и обшитым листовым материалом. Камеры 2 и 7 закрепляются с помощью фланцев и болтов. Они изготовлены из листового материала и имеют поверхности для крепления магнитопровода с катушками.

С наружной части катушек предусмотрены радиаторы для жидкостного охлаждения. Транспортирование шлама осуществляется с помощью двух прямых 5, 6 и одного наклонного 4 конвейеров. Сбор неферромагнитных агрегатов шлама производится в ящик 8, измельченного ферромагнитного агрегата – в ящик 3. Основные размеры конвейеров приведены на рисунке Д.3.

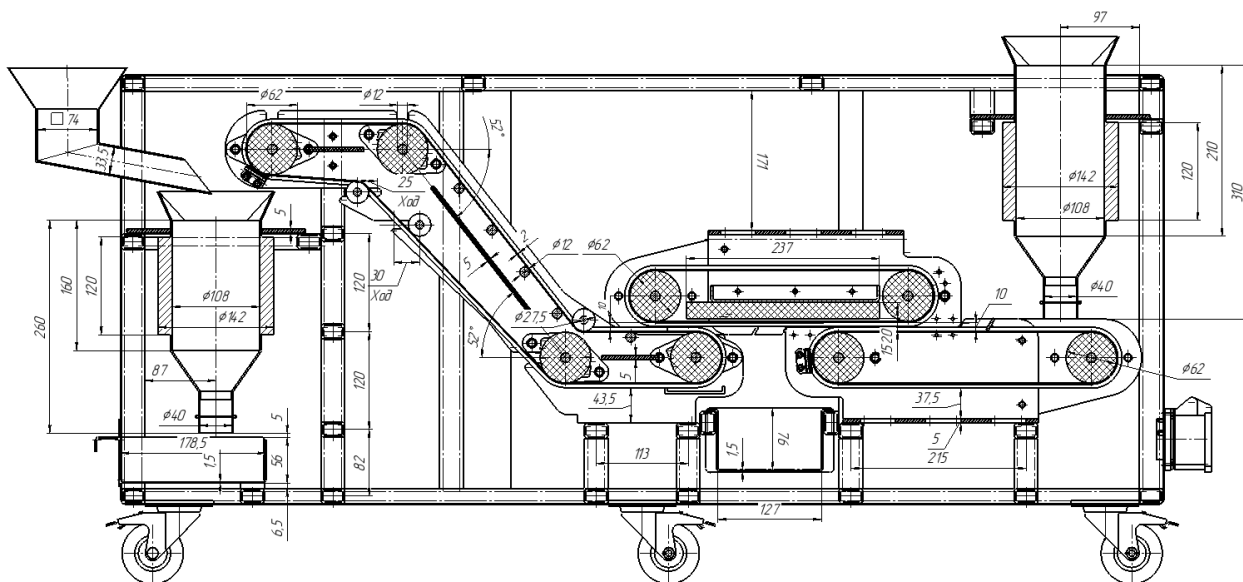


Рисунок Д.3. Конструкция установки для разрушения и измельчения шламовых конгломератов

Компоновка и основные размеры пульта управления представлены на рисунке Д.4. Пульт состоит из корпуса 2, представляющего собой сварной каркас из трубы, обшитый листовым материалом. В верхней части расположена система управления и индикации, позволяющая отслеживать состояние всех устройств и при необходимости производить корректировку. В нижней части расположена помпа 4 с двумя электродвигателями, которые подают охлаждающую жидкость камерам с электромагнитами. С целью поддержания постоянной низкой температуры жидкости предусмотрены радиаторы с вентиляторами 3. На боковые панели выведены разъем питания 6 и фитинги 5. На панели, установленной за радиаторами, предусмотрены вентиляционные отверстия в форме жалюзи.

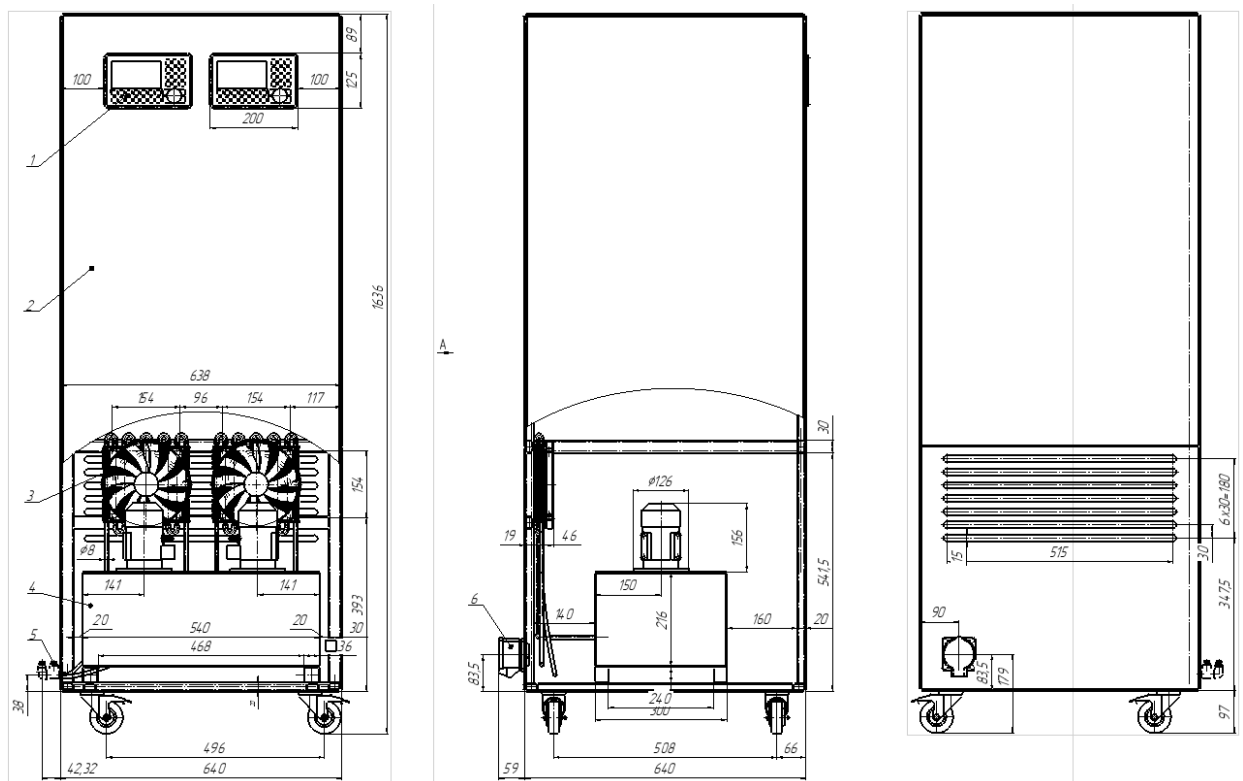


Рисунок Д.4. Конструкция пульта управления комплексом:

1 – система управления и индикации; 2 – корпус; 3 – радиатор; 4 – помпа; 5 – штуцер; 6 – разъем

Учитывая наличие свободного пространства в центральной части корпуса, в нем можно поместить устройства индикации и управления установками для мойки и сушки шлама. При необходимости его можно использовать как единый центр управления тремя установками.