

Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»  
(НИТУ «МИСИС»)

На правах рукописи

ЧЫЛБАК-ООЛ ЕВГЕНИЙ ДЖАМИЛЬЕВИЧ

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ФИЛЬТРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ  
КОНЦЕНТРАТОВ ОБРАТНОЙ КАТИОННОЙ ФЛОТАЦИИ

2.8.9 Обогащение полезных ископаемых

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук,  
Конюхов Юрий Владимирович

Москва – 2026

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
Глава 1. Литературный обзор .....	10
1.1. Роль процесса фильтрования в технологической схеме обогащения железных руд.	10
1.2. Теоретические основы процесса фильтрования дисперсных систем.....	15
1.3. Промышленное оборудование для обезвоживания железорудных концентратов ....	22
1.4. Методы интенсификации процесса фильтрования .....	28
1.5. Влияние реагентных режимов на физико-химические свойства поверхности железорудных концентратов .....	31
1.6 Анализ научного пробела и обоснование направления исследований .....	35
Выводы к главе 1 .....	36
Глава 2. Объекты, методы и методики исследований .....	37
2.1 Объекты исследования.....	37
2.2 Характеристика реагентов для интенсификации процесса фильтрования .....	37
2.3 Характеристика реагентов для регенерации фильтрующих элементов.....	39
2.4 Методы и оборудование для исследования физико-химических свойств.....	39
2.5 Методы и оборудование для исследования процессов обезвоживания.....	44
Глава 3. Установление закономерностей между химическим составом поверхности магнетитового концентрата и детектируемыми физико-химическими свойствами .....	50
3.1. Введение и обоснование выбора комплекса физико-химических методов.....	50
3.2 Характеристика исходного магнетита.....	50
3.3 Влияние флотационных реагентов и полимерных добавок на химический состав поверхности.....	56
3.4 Влияние флотационных агентов и полимерных добавок на физические свойства поверхности.....	59
Выводы к главе 3 .....	63
Глава 4. Исследование фильтрационных свойств магнетитового концентрата при различных реагентных обработках.....	65
4.1 Исследование влияния флотационных реагентов на производительность и влажность получаемого осадка .....	65

4.2 Исследование влияния реагентов на агрегацию, сопротивления осадка и влажность получаемого осадка .....	69
Выводы к главе 4 .....	74
Глава 5. Промышленные испытания по интенсификации процесса фильтрования .....	75
5.1 Условия проведения промышленных испытаний .....	75
5.2 Результаты промышленных испытаний по интенсификации процесса фильтрования .....	77
Выводы к главе 5 .....	83
Глава 6. Разработка и обоснование способа регенерации керамических фильтрующих элементов.....	84
6.1 Анализ причин снижения фильтрующей способности керамических элементов .....	84
6.2 Обоснование выбора реагентов для глубокой кислотной регенерации.....	87
6.3 Лабораторные испытания по регенерации фильтрующих элементов.....	88
6.4 Результаты промышленных испытаний по регенерации керамических фильтрующих элементов.....	90
Выводы к главе 6 .....	92
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	94
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	95
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	96
ПРИЛОЖЕНИЕ А – АКТ ИСПЫТАНИЙ .....	112
ПРИЛОЖЕНИЕ Б – СВИДЕТЕЛЬСТВО О РЕГИСТРАЦИИ ПАТЕНТА.....	113

## ВВЕДЕНИЕ

### Актуальность работы

В настоящее время в мире остро стоит проблема глобального потепления, которое, главным образом, связывают с выбросами углекислого газа. В 2021 году была принята мировая стратегия снижения выбросов CO<sub>2</sub> на 80 % к 2050 году. Согласно Распоряжению Правительства РФ от 29.10.2021 N 3052-р “Об утверждении стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года” в Российской Федерации была принята стратегия, которая подразумевает в базовом сценарии снижение выбросов парниковых газов к 2050 году на 36 % (от уровня 1990 года), до 2 млрд т эквивалента CO<sub>2</sub>.

Порядка трети всех выбросов CO<sub>2</sub> в РФ приходится на металлургические предприятия. При этом, доля выбросов сектора черной металлургии составляет не менее 60 %. Под влиянием общественности и в рамках новых законодательных требований металлургические заводы и комбинаты принимают меры по сокращению выбросов CO<sub>2</sub>. К таким мерам можно отнести: переход от агломератов к использованию окатышей, повышение энергоэффективности процессов за счет снижения содержания минералов породы в металлургическом сырье, увеличение использования доли водорода в газовой фазе в доменных и шахтных печах за счет использования природного газа и т.д. Все вышперечисленное привело к повышению требований заказчиков к качеству железорудных концентратов, и, соответственно, к необходимости разработки новых или модернизации имеющихся технологических схем обогащения.

Одним из эффективных способов повышения качества железорудных концентратов является их дообогащение обратной катионной флотацией для более полного удаления из концентратов силикатов и кварца. Это достигается за счет более полного раскрытия минералов путем доизмельчения до класса -40 мкм и применения специальных реагентов и флотационных режимов для эффективного разделения минералов пустой породы и оксидов железа за счет различий в гидрофобности поверхности. За разработку технологии обратной катионной флотации, внедренной на предприятии «Михайловский ГОК имени А. В. Варичева» компании «Металлоинвест», Премии Правительства РФ удостоен коллектив российских исследователей, в состав которого вошла профессор кафедры обогащения и переработки полезных ископаемых и техногенного сырья НИТУ МИСИС, доктор технических наук Елена Леонидовна Чантурия (Распоряжение Правительства РФ от 24.11.2025 № 3411-р).

Однако, повышение интенсивности доизмельчения железорудных концентратов перед дообогащением закономерно приводит к повышению содержания частиц

ультратонких классов крупности (менее 10 мкм, а в ряде случаев – менее 5 мкм) в готовом продукте. Такие тонкие фракции характеризуются высокой удельной поверхностью, сильными межчастичным взаимодействием и склонностью к образованию стабильных водных суспензий, что существенно ухудшает фильтрационные характеристики пульпы: возрастает удельное сопротивление осадка, остаточная влажность продукта и способность к механическому засорению фильтровальной перегородки. В соответствии с вышеизложенным проблема повышения эффективности фильтрования высококачественных магнетитовых концентратов является весьма актуальной.

Традиционными подходами к решению этой проблемы являются реагентный и технологический. Однако применение технологического подхода имеет существенные ограничения. В частности, увеличение производительности за счет изменения режимов работы фильтровального оборудования неизбежно сопряжено с ростом влажности осадка. Поскольку влажность железорудных концентратов жестко регламентирована технологическими условиями, это вынуждает эксплуатировать оборудование с заниженной производительностью фильтровального участка. Кроме того, установка дополнительных аппаратов часто затруднена вследствие высокой плотности компоновки оборудования, заложенной на стадии проектирования обогатительных фабрик. Поэтому более предпочтительным является реагентный подход, базирующийся на использовании флокулянтов и поверхностно-активных веществ, интенсифицирующих процесс фильтрования и обеспечивающих минимальную остаточную влажность. Наличие остаточных флотационных реагентов в жидкой фазе пульпы концентрата и их возможная адсорбция на поверхности частиц магнетита обуславливают необходимость изучения механизмов взаимодействия полиэлектролитов, вводимых для интенсификации процесса фильтрования, как с минеральной поверхностью, так и с компонентами флотационной среды для определения оптимальных режимов дозирования.

**Идея работы** заключается в использовании специальных реагентов для кондиционирования пульпы магнетитового концентрата перед фильтрованием для снижения влажности осадка, а также химической регенерации для восстановления водопроницаемости керамических фильтрующих элементов.

**Целью работы** являлось повышение эффективности процесса фильтрования магнетитового концентрата обратной катионной флотации на керамических дисковых вакуум-фильтрах за счет теоретического и экспериментального обоснования реагентных режимов кондиционирования пульпы и разработки способа глубокой регенерации фильтрующих элементов.

Для достижения поставленной цели в работе решались **следующие задачи**:

- установить закономерности влияния реагентов обратной катионной флотации: гидролизованного щелочью кукурузного крахмала (декстрина) и 3-(изодецилокси)пропиламина (амин) на физико-химические свойства поверхности частиц магнетита и их связь с фильтрационными характеристиками концентрата;
- обосновать выбор и определить оптимальные дозировки полиэлектролитов для интенсификации процесса фильтрования, обеспечивающие нейтрализацию негативного влияния флотационных реагентов;
- провести промышленные испытания для подтверждения эффективности полимерной добавки на действующем предприятии и оценить ее влияние на производительность керамических вакуум-фильтров и влажность получаемого концентрата;
- выявить химический и минеральный состав отложений в порах керамических фильтрующих элементов, приводящих к снижению их водопроницаемости в условиях замкнутого водооборота с целью выбора реагентов для глубокой регенерации керамических фильтрующих элементов;
- провести промышленные испытания разработанного способа глубокой химической регенерации керамических фильтрующих элементов, обеспечивающий восстановление их фильтрационной способности до уровня новых изделий.

### **Научная новизна результатов исследования**

1. Определены количественные закономерности снижения производительности керамических вакуум-фильтров при фильтровании магнетитового концентрата в зависимости от вида реагентов и изменения в широком диапазоне их расхода в предшествующей обратной катионной флотации: от нуля до 1200 г/т гидролизованного щелочью кукурузного крахмала (декстрина) и от нуля до 180 г/т 3-изодецилоксипропиламина (амин);
2. Установлено, что определяющим фактором снижения скорости фильтрования пульпы является увеличение электрокинетического отталкивания ультратонких частиц, обусловленное адсорбцией гидролизованного щелочью кукурузного крахмала (декстрина), что препятствует их агрегации и в 1,8-2,8 раза сильнее снижает производительность по сравнению с действием 3-изодецилоксипропиламина (амин).;
3. Показан эффект нейтрализации отрицательного влияния реагентов обратной катионной флотации магнетита при введении полимерного коагулянта с катионным зарядом на основе полидиаллилдиметиламмония хлорида (реагент К). Регулирование расхода реагента позволяет изменять электрокинетический потенциал частиц магнетита в

интервале -8,5...-15,6 мВ, что способствует агрегированию ультратонких частиц и снижению остаточной влажности на 0,6% без снижения производительности фильтрования.

### **Практическая значимость работы**

1. Экспериментально подтверждена возможность интенсификации процесса фильтрования посредством применения полимерных катионных коагулянтов для снижения остаточной влажности магнетитового концентрата обратной катионной флотации и анионных флокулянтов для повышения производительности фильтровального оборудования;

2. Показано, что при расходе высокомолекулярного полиэлектролита со средним анионным зарядом на основе акриламида и акрилата натрия 5 г/т (Реагент А) обеспечивается снижение удельного сопротивления осадка на 36 %, а применение полимерного коагулянта с высокой флокулирующей способностью имеющий катионный характер с высокой плотностью заряда на основе полидиаллилдиметиламмония хлорида с расходом 20 г/т (Реагент К) обеспечивает снижение влажности получаемого осадка на 0,6 %;

3. Установлено, что распределение катионного полиэлектролита на поверхности частиц за счет электростатического притяжения способствует формированию модифицирующего слоя без значительного увеличения объема осадка, что критически важно для обеспечения высоких показателей работы фильтровального оборудования;

4. Промышленными испытаниями на участке фильтрования ФОК АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева» подтверждена эффективность применения катионного полимерного коагулянта с высокой флокулирующей способностью с высокой плотностью заряда на основе полидиаллилдиметиламмония хлорида (Реагент К): производительность керамических дисковых вакуум-фильтров КДФ-90 увеличилась на 5-10% (в отдельных случаях до 33%) за счет стабилизации влажности получаемого осадка не более 10,2%, что отвечает требованиям производства окатышей;

5. Установлено, что добавление хелатирующего агента (ОЭДФ-кислоты) к щавелевой кислоте, широко используемой для регенерации керамических фильтрующих элементов, позволяет восстановить их водопроницаемость до 99,6% от уровня новых изделий. Зарегистрирован патент RU 2830008C1 от 11.11.2024.

### **Методы исследований**

В диссертационной работе использован комплекс современных физико-химических и технологических методов исследования вещественного состава, поверхностных свойств и фильтрационных характеристик железорудных концентратов. Гранулометрический

состав определялся методом лазерной дифракции на анализаторе Fritsch Analysette 22 и ситовым анализом в соответствии с ГОСТ 27562-87. Удельная площадь поверхности измерялась на приборе ПСХ-12М методом газопроницаемости Козени-Кармана. Электрокинетический потенциал (дзета-потенциал) изучался методом электрофоретического рассеяния света на приборе Malvern Zetasizer Nano ZS. Смачиваемость поверхности твердой фазы оценивалась методом лежащей капли на оптическом тензиометре Kruss Easy Drop. Морфология и элементный состав поверхности исследовались методами растровой электронной микроскопии (SEM Tescan Vega 3) и ИК-спектроскопии (Фурье-спектрометр Vertex 70 v). Лабораторные испытания фильтруемости проводились на установках с воронкой Бюхнера и лабораторном стенде «Бакор-тест», моделирующем работу керамических дисковых фильтров. Промышленные испытания осуществлялись на участке фильтрования АО «Михайловский ГОК» на фильтрах КДФ-90. Достоверность результатов подтверждается воспроизводимостью опытов, использованием аттестованных методик (ГОСТ 12764-73 и др.) и обработкой данных методами математической статистики

**Достоверность полученных результатов** диссертационной работы подтверждается использованием современного сертифицированного научно-исследовательского оборудования с применением специализированного программного обеспечения и аттестованных методик исследований согласно межгосударственным стандартам, сопоставлением значительного количества теоретических и экспериментальных данных между собой, а также с опубликованными результатами других авторов в научных журналах.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Установлено негативное влияние реагентов обратной катионной флотации магнетита на производительность керамических вакуум-фильтров в зависимости от типа и их расхода;
2. Фильтруемость магнетитовых концентратов, полученных методом обратной катионной флотации, зависит в большей степени от агрегативной устойчивости пульпы, характеризуемой значением электрокинетического потенциала, чем от смачиваемости поверхности частиц;
3. Интенсификация процесса фильтрования магнетитовых концентратов обратной катионной флотации на керамических вакуум-фильтрах достигается применением катионного полиэлектролита для снижения остаточной влажности магнетитовых концентратов и анионного для повышения производительности фильтровального оборудования;

4. Применение полимерного коагулянта с высокой флокулирующей способностью имеющий катионный характер с высокой плотностью заряда на основе полидиаллилдиметиламмония хлорида (Реагент К) позволяет повысить производительность керамических вакуум-фильтров с обеспечением остаточной влажности не более 10,2%;

5. Механизм глубокой регенерации керамических фильтрующих элементов, заключающийся в переводе соединений, которые не растворимы при классической регенерации (таких как оксиды и гидроксиды железа, а также сульфаты щелочноземельных металлов), в водорастворимые комплексы.

**Публикации.** По теме диссертации, опубликовано 6 работ, из которых 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК, и входящих в базы РИНЦ и Scopus, 2 тезиса докладов в сборниках материалов конференций, 1 патент.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на международных научных конференциях: «Московский Международный Конгресс Обогащителей 2025 (11-14 марта, г. Москва), «Плаксинские чтения» 2025 (29 сентября-4 октября, г. Екатеринбург), «Неделя горняка – 2026» (03-07 февраля, г. Москва).

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, 6 глав, общих выводов, списка цитируемой литературы из 196 наименований и 2 приложений. Работа изложена на 113 страницах машинописного текста и содержит 33 рисунка, 14 таблиц.

**Личный вклад автора.** На всех этапах выполнения диссертационной работы автор принимал непосредственное участие в постановке задач исследований, в планировании и методическом обеспечении экспериментов, в проведении большинства экспериментальных измерений и теоретических расчетов, в анализе полученных результатов и формулировании выводов.

## Глава 1. Литературный обзор

### 1.1. Роль процесса фильтрования в технологической схеме обогащения железных руд

Исходные железные руды преимущественно на основе магнетита обогащают по многостадийным схемам с применением методов магнитной сепарации и флотации [3–5]. Железорудные концентраты являются материалами для изготовления агломератов и окатышей [6; 7], которые применяются в металлургии для производства чугуна и в процессах производства железа прямым восстановлением в шахтных печах [8; 9]. Продуктом восстановления в шахтных печах является горячебрикетированное железо (ГБЖ) [10; 11]. Железорудные концентраты находят применение в электросталеплавильном производстве, порошковой металлургии, бурении скважин и т.д. [12], но основная доля идет на производства чугуна и ГБЖ.

Производство окатышей – процесс многостадийный, и его эффективность во многом определяется качеством исходного концентрата. Основой для производства служат железорудные концентраты с высоким содержанием железа, которые смешиваются со связующими добавками и флюсоупрочняющими компонентами. Современные производства используют два типа окомкователей: – барабанные и тарельчатые. Барабанные окомкователи имеют высокую производительность, но требуют дополнительной классификации продукта, тогда как тарельчатые имеют лучший контроль размера окатышей, хотя и уступают в объеме выпуска [13–15]. Термическая обработка – сушка, нагрев, обжиг, охлаждение – формирует прочностные характеристики окатышей, поэтому критически важно соблюдение температурных режимов и равномерность прогрева материала [16–18].

Одним из факторов, влияющих на качество окатышей, является выбор связующих веществ. Органические связующие вещества обеспечивают хорошую окомковываемость и низкую зольность, но разлагаются при температурах выше 400 °С. Неорганические термоустойчивы, но могут увеличивать содержание примесей. Гибридные композиции, сочетающие оба типа связующих, позволяют найти баланс, а композиционные материалы с наночастицами демонстрируют прирост прочности окатышей на 15–20 % [19–22].

Качество окатышей регламентируется стандартами, такими как ГОСТ и ISO, которые устанавливают требования к прочности, восстановимости, химическому составу и абразивной стойкости. Соблюдение этих стандартов гарантирует пригодность продукции для металлургических процессов и минимизирует технологические риски [23–28]. При этом практика показывает, что одна из ключевых проблем производства – неравномерность

размера гранул, вызванная колебаниями влажности поступающего на окомкование концентрата, нестабильностью вращения окомкователей и износом оборудования [29; 30].

Качество железорудных концентратов характеризуются, главным образом, химическим и гранулометрическим составом, а также количеством остаточной влажности [31; 32]. Основными параметрами, определяющим стоимость железорудных концентратов российского производства, являются  $Fe_{\text{общ}}$  и содержание  $SiO_2$ . Также очень важным параметром для металлургов является количество серы и фосфора. Кроме обозначенных выше элементов, в концентратах часто присутствуют  $CaO$ ,  $MgO$ ,  $MnO$ ,  $Al_2O_3$ ,  $K_2O$ ,  $TiO_2$ ,  $V_2O_5$ ,  $CuO$ ,  $NiO$ . От качества концентратов напрямую зависит энергоэффективность металлургического производства и, соответственно, количество выделяемых парниковых газов [33; 34].

В зависимости от доступности ресурсов и имеющихся технических возможностей по агломерации, окомкованию, обжигу и т.д., металлургические предприятия используют концентраты разного качества по содержанию  $Fe_{\text{общ}}$ . Данное значение для разных производителей значительно варьируется: АО «Уральская сталь» – 55-57%, АО «Челябинский металлургический комбинат» 62-63%, «ОЭМК им. А.А. Угарова» 62-63%, АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева» от 64 до 70,5%, АО «Северсталь» 62-68%, АО «НЛМК» – от 51%, группа компаний «Евраз» 51-62%. За базу при расчете стоимости железорудного концентрата принимают концентрат с содержанием железа 62%. За индекс принимается CFR (China import Iron Ore Fines 62%) [35].

Магнитная сепарация относится к одному из энергоэффективных методов обогащения. В большом количестве работ публикуются результаты по достижению  $Fe_{\text{общ}}$  в концентратах 62-68% за счет применения нескольких последовательных стадий магнитной сепарации [36–38]. Дальнейшее повышение качества на большинстве месторождений возможно только за счет флотации, что актуально для концентратов для производства DRI-окатышей, где требуемое содержание  $Fe_{\text{общ}}$  в концентрате должно быть более 70% и суммарное содержание других оксидов, включая  $SiO_2$ , не должно превышать 3% [39]. С целью выполнения требований по качеству концентратов для производства DRI окатышей, ГОКи вынуждены вводить дополнительные стадии обогащения на основе метода обратной флотации, когда  $SiO_2$  выводится в пенный продукт, а ценный компонент остается в камерном продукте. [40; 41].

Наряду с химическим составом, критически важным показателем качества железорудных концентратов является гранулометрический состав. Оптимальным классом для обогащения считается -70+40 мкм [42]. Однако в технологических схемах, предусматривающих стадию обратной катионной флотации для доочистки от кварца,

требуется более тонкое измельчение продукта до класса  $-40+20$  мкм. Это необходимо для обеспечения полного раскрытия минеральных сростков и повышения селективности разделения [43]. Для этого вводится дополнительная стадия классификации по классу «45 мкм». «Надрешетный» продукт грохочения направляется на доизмельчение в вертикальные спиральные мельницы, а «подрешетный» продукт в виде пульпы поступает уже на флотационное обогащение [44]. Следует отметить, что такое доизмельчение хоть и улучшает показатели флотации, оно закономерно приводит к росту содержания ультратонких классов ( $<10$  мкм), что, как будет рассмотрено далее, существенно осложняет последующие процессы фильтрования.

Существующие методы обезвоживания железорудных концентратов, такие как сгущение и фильтрование, играют ключевую роль в обогатительных процессах. Как правило используются последовательно (Рисунок 1), обеспечивая снижение содержания влаги до требуемых значений для дальнейшей переработки, транспортировки и хранения [45–47]. Выбор методов и используемого оборудования зависит от требуемой конечной влажности, характеристик исходного продукта, экономической эффективности, а также от последующего использования концентрата, например, для производства окатышей [48; 49]. Каждый из этих методов имеет свои принципы действия, эффективность и оптимальные области применения.

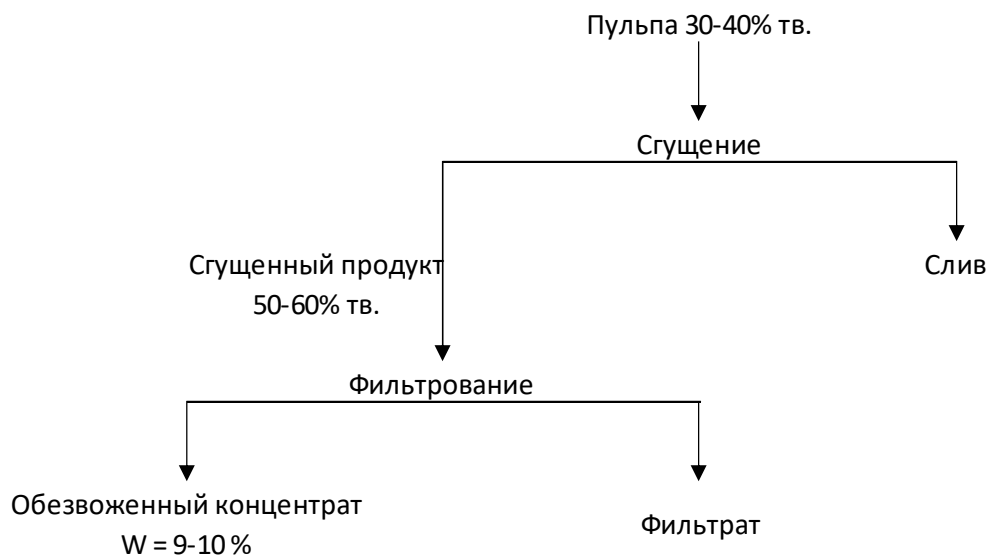


Рисунок 1 – Схема обезвоживания магнетитового концентрата

Сгущение является начальным этапом обезвоживания, основной целью которого является увеличение концентрации твердой фазы в пульпе за счет осаждения частиц под действием силы тяжести [46; 47]. Сгущение позволяет снизить содержание воды в пульпе до 35-50% [50]. Оно эффективно для отделения значительного количества воды и часто используется для возврата очищенной воды в технологический цикл. Этот процесс

предшествует более интенсивным методам обезвоживания, таким как фильтрование или центрифугирование, как самостоятельный процесс используется в основном для полусухого складирования хвостов обогащения. Для повышения эффективности осаждения часто применяют флокулянты [50–52].

Следующей стадией обезвоживания является фильтрование, т.к. термическая сушка экономически нецелесообразна при объемах влаги получаемого при обогатительных процессах и сгущении [45; 46; 48; 53]. Фильтрование основано на пропускании пульпы через пористую среду (фильтровальную ткань или керамический элемент), которая задерживает твердые частицы [53; 54]. Движущей силой может быть вакуум [55–58] или избыточное давление [55; 59; 60]. Фильтрование позволяет достичь остаточной влажности железорудного концентрата  $9,50 \pm 0,50$  %, что является оптимальным для последующей агломерации [45]. Эффективность фильтрования зависит от множества факторов, включая плотность исходной пульпы, давление фильтрации [48] и использование флокулянтов или фильтрующих добавок [61; 62]. Данная операция широко применяется в промышленности для обезвоживания железорудных концентратов [45; 48; 49; 53; 57; 58], а также других минеральных продуктов [50; 51; 63]. Вакуумная фильтрация хорошо зарекомендовала себя при обезвоживании тонкодисперсных фракций железной руды [57; 58]. В частности, большинство крупных горно-обогатительных комбинатов переходят на технологию фильтрования с применением керамических вакуум-фильтров для повышения энергоэффективности участков фильтрования [64].

Сравнение методов обезвоживания позволяет заключить, что сгущение и фильтрование не являются взаимозаменяемыми, а выполняют разные функции в технологической цепочке. Сгущение эффективно как предварительная стадия для повышения концентрации твердого до 40–55% и возврата воды в цикл, но оно не способно обеспечить финишную влажность, необходимую для окомкования. Поэтому фильтрование остается единственным методом для получения концентрата с заданной влажностью.

В настоящее время вектор развития фильтровальной техники, включая вакуумные и пресс-фильтры для обезвоживания железорудных концентратов, ориентирован на рост эффективности, энергосбережение и преодоление задач, связанных со сложными свойствами фильтруемых материалов [45; 65–67]. Усовершенствование фильтровального оборудования приобретает особую значимость на фоне растущего спроса на сырье и ужесточения требований к минимизации воздействия производства на окружающую среду [45]. Современное оборудование проектируется с расчетом на работу с высокотоннажными производствами мелкодисперсных концентратов, которые обладают низкой фильтруемостью.

Одним из ключевых направлений модернизации является интеграция SCADA-систем, оснащённых датчиками давления, влажности и расхода, а также внедрение систем предиктивного обслуживания. Эти решения обеспечивают мониторинг показателей оборудования в реальном времени и оптимизацию его работы, позволяя прогнозировать потенциальные сбои и поддерживать стабильность процессов. Разрабатываются усовершенствованные системы управления, включая адаптивные алгоритмы автоматического регулирования, направленные на оптимизацию обезвоживания концентрата, что сказывается на производительности, влажности и себестоимости конечного продукта [67].

Вопрос энергоэффективности остается важным двигателем инноваций в данной области. Снижение потребления энергии достигается за счет внедрения высокоэффективных вакуумных насосов и электродвигателей с регулируемой скоростью вращения, что способствует сокращению углеродного следа и уменьшению операционных затрат [65].

Несмотря на существующий технический прогресс, процесс фильтрации суспензий железорудных концентратов сталкивается с рядом ограничений, способных негативно влиять на производительность и экономику этого процесса. Одной из ключевых проблем является образование плотных, малопроницаемых осадков из тонких частиц, что приводит к резкому снижению скорости фильтрации, а также сопровождается высокой остаточной влажностью осадка. Удержание влаги обусловлено капиллярными эффектами в мелкодисперсной структуре концентратов. Высокое содержание влаги в готовой продукции влечет за собой дополнительные затраты на сушку и может негативно сказываться на качестве конечного продукта [45]. Также следует отметить, что абразивное воздействие приводит к быстрому износу фильтрующих перегородок, включая ткани и керамические мембраны. Это закономерно увеличивает эксплуатационные расходы и требует частого технического обслуживания фильтровального оборудования [68].

Существенной проблемой является нестабильность характеристик суспензии. Колебания минералогического и ионного состава, гранулометрического состава, уровня pH могут значительно дестабилизировать процесс фильтрации. Такие изменения влияют на реологические свойства пульпы, что, в свою очередь, напрямую сказывается на эффективности обезвоживания [69; 70].

Анализ требований к качеству товарных концентратов показывает, что ключевыми нормируемыми показателями являются содержание общего железа и оксида кремния, однако такой параметр как влажность, также играет существенную роль. Наблюдается устойчивый тренд на смещение спроса в сторону окатышей для процессов прямого

восстановления железа, что требует повышения содержания ценного компонента в концентрате выше 70 %. Достижение таких показателей на большинстве предприятий невозможно без глубокого обогащения, включающего доизмельчение и флотацию. Несмотря на активную интеграцию цифровых систем и работу над снижением энергопотребления, основные ограничения процесса фильтрования связаны не столько с конструкцией фильтровального оборудования, сколько со свойствами поступающего материала. Образование плотных, малопроницаемых осадков из тонких частиц приводит к высокой остаточной влажности и падению производительности, что сложно компенсировать исключительно оптимизацией конструкции оборудования. Ситуацию усугубляет износ фильтровальных перегородок и нестабильность состава суспензии, что указывает на необходимость комплексного подхода, включающего кондиционирования пульпы перед процессом фильтрования.

## 1.2. Теоретические основы процесса фильтрования дисперсных систем

Классическая теория фильтрования дисперсных систем базируется на фундаментальных принципах гидродинамики пористых сред и массопереноса, которые основывается на закономерностях и уравнениях, выявленных такими учеными как Анри Филибер Гаспар Дарси, Йозеф Александр Козени и Филипп Сидни Карман. Эти подходы используются для описания движения жидкостей через пористые среды и формирования слоя осадка [71–75].

Закон Дарси является основой классической теории фильтрования, который описывает линейную зависимость между расходом жидкости через пористую среду и градиентом гидравлического напора. В котором описывается, что скорость потока ( $v$ ) прямо пропорциональна перепаду давления ( $\Delta P$ ) и обратно пропорциональна вязкости жидкости ( $\mu$ ) и длине пути фильтрования ( $L$ ), а также зависит от проницаемости среды ( $K$ ). Математически это выражается как следующее уравнение[75]:

$$v = - \frac{K \cdot \Delta P}{\mu \cdot L} \quad (1)$$

Уравнение Козени-Кармана дополняет закон Дарси, предоставляя способ расчета проницаемости пористой среды на основе ее физических характеристик, таких как пористость ( $\varepsilon$ ), удельная поверхность частиц ( $S_0$ ) [71]. Оно устанавливает связь между перепадом давления и расходом суспензии, вязкостью, свойствами осадка и фильтрующей перегородки. Уравнение имеет вид:

$$K = \frac{\varepsilon^3}{k_0(1 - \varepsilon)^2 S_0^2} \quad (2)$$

где  $k_0$  – константа Козени.

Объединяя закон Дарси и уравнение Козени-Кармана, можно вывести основное уравнение фильтрования, которое позволяет прогнозировать скорость фильтрации и рост осадка [71; 73]. Данное уравнение фильтрования описывает динамику образования осадка на фильтрующей перегородке. Для случая постоянного перепада давления на фильтрующей перегородке, изменение объема фильтрата ( $V$ ) со временем ( $t$ ) описывается следующим образом [73; 76]:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{A \cdot \Delta P}{\mu \cdot (R_{ф.п.} + R_{ос.})} \quad (3)$$

где  $A$  – площадь фильтрации,  $\text{м}^2$ ;

$\Delta P$  – перепад давления, Па;

$\mu$  – динамическая вязкость фильтрата, Па·с;

$R_{ф.п.}$  – сопротивление фильтрующей перегородки,  $\text{м}^{-1}$ ;

$R_{ос.}$  – сопротивление слоя осадка,  $\text{м}^{-1}$ .

Сопротивление фильтрующей перегородки  $R_{ф.п.}$  обычно считается постоянным. Сопротивление осадка  $R_{ос.}$  увеличивается по мере накопления твердой фазы и может быть выражено как [76]:

$$R_{ос.} = \alpha \frac{m}{A} \quad (4)$$

где  $\alpha$  – удельное сопротивление осадка,  $\text{м}/\text{кг}$ ;

$m$  – масса сухого осадка на фильтре, кг.

Для несжимаемых осадков удельное сопротивление является постоянной, но для сжимаемых осадков оно зависит от перепада давления [76].

При постоянном давлении фильтрования, основное уравнение может быть проинтегрировано для получения зависимости объема фильтрата от времени. В идеальном случае несжимаемого осадка это часто приводит к линейной зависимости  $t/V$  от  $V$ . Однако, на практике многие суспензии образуют сжимаемые осадки, удельное сопротивление которых изменяется под действием давления [76–78].

Несмотря на широкое применение классической теории, она не всегда адекватно описывает сложные явления, такие как фильтрование сжимаемых осадков, влияние агрегации частиц или реологические эффекты [71; 77; 79]. В частности, традиционные методы часто недооценивают сложность реального явления фильтрации, а такие параметры, как удельное сопротивление осадка, не всегда точно характеризуют фильтруемость.

Понимание природы связи воды с твердой фазой критически важно для выбора методов интенсификации, поскольку различные формы влаги требуют принципиально разных энергетических затрат для их удаления. В научной литературе влагу в осадках принято классифицировать по формам связи с частицами: физико-механическую, физико-химическую и химическую [80–82].

Свободная влага заполняет все пространство между частицами и свободно перемещается под действием гравитационных сил.

Капиллярная влага в основном удаляется в процессе фильтрования при наличии движущей силы. Она удерживается в межчастичных пространствах и порах осадка за счет сил поверхностного натяжения на границе раздела фаз жидкость–газ. Согласно модели капиллярных сил, капиллярное давление ( $P_k$ ), удерживающее жидкость, описывается частным случаем уравнения Лапласа-Юнга для цилиндрического капилляра [83; 84]:

$$P_k = \frac{2\sigma \cdot \cos\theta}{r} \quad (5)$$

где  $\sigma$  – поверхностное натяжение жидкости, Н/м;

$\theta$  – краевой угол смачивания, °

$r$  – эффективный радиус поры, м.

По данной зависимости выходит, что для ультратонких пор, радиусом менее <1 мкм, капиллярное давление может достигать значений  $10^5$ – $10^6$  Па, что сопоставимо с перепадом давления развиваемое при работе вакуум-фильтров.

Особое значение для магнетитовых концентратов имеет шероховатость поверхности частиц, формирующаяся в результате измельчения. Анализ исследований показывает, что развитая микрорельефная структура поверхности усиливает капиллярные силы: при удалении влаги мениски «застревают» в неровностях, что требует дополнительного перепада давления для их отрыва [85].

Дополнительно, исследования на хвостах медных руд подтверждают, что именно степень удаления капиллярной влаги определяет конечную влажность продукта при вакуумном фильтровании [86]. Для удаления капиллярной влаги из микропор часто требуются комбинированные механические воздействия, такие как прессование или

вибрационное уплотнение, позволяющие преодолеть капиллярные силы за счет переупаковки структуры осадка [87].

Адсорбционная влага удерживается непосредственно на поверхности твердых частиц силами межмолекулярного взаимодействия (ван-дер-ваальсовыми силами, водородными связями) и образует один или несколько слоев жидкости на поверхности частиц. Толщина и прочность этого слоя зависят от гидрофильности поверхности минерала и наличия специфических активных центров [88].

Современные методы исследования, позволяют отличать состояния воды в пористых средах и показывают, что значительная часть влаги в тонкодисперсных шламах находится именно в адсорбированном состоянии, трудноудаляемом механическим путем [82; 89]. Молекулярно-динамическое моделирование демонстрирует, что вода на поверхности оксидов железа и силикатов образует упорядоченные структуры с энергией связи 20–50 кДж/моль, что превышает энергию теплового движения молекул при комнатной температуре [90; 91].

Для удаления адсорбционной влаги движущей силы перепада давления при вакууме недостаточно, так как требуется преодоление потенциального барьера адсорбции. При обзоре литературы было выявлено, что модификация поверхности частиц (например, гидрофобизация) может снижать энергию адгезии воды, однако в случае железорудных концентратов чрезмерная гидрофобность ухудшает смачиваемость и может приводить к нестабильности осадка при последующем окомковании. Силы адгезии частиц к поверхности фильтровальной перегородки также сильно зависят от наличия адсорбированной влаги, что влияет на эффективность разгрузки фильтра [92; 93].

Химически связанная влага входит в кристаллическую решетку минералов в виде кристаллогидратов или гидроксильных групп и не удаляется при температурах сушки до 105–110°C, применяемых в стандартных методах определения влаги [82; 94]. Для магнетитовых концентратов доля такой влаги невелика, однако наличие глинистых примесей или продуктов окисления (гидратированные оксиды железа) может увеличивать ее содержание. Удаление этой формы влаги требует термического разложения (дегидратации) при высоких температурах, что экономически нецелесообразно на стадии обогащения и относится к металлургическому переделу. Тем не менее, при переработке сложных руд, например, красных шламов, полное удаление влаги может включать комбинацию механического обезвоживания и последующей термической обработки [95].

Важно отметить, что в реальных условиях фильтрования железорудных концентратов эти механизмы действуют не изолированно, а в комбинации. На начальных стадиях фильтрования преобладает удаление гравитационной и части капиллярной влаги

из макропор. По мере уменьшения толщины слоя жидкости и радиуса менисков возрастает роль адсорбционных сил на поверхности ультратонких частиц. Исследования показывают, что распределение пор по размерам в осадке фильтрования сильно влияет на количество удерживаемой капиллярной влаги: увеличение содержания мелких частиц приводит к росту доли микропор, что, в свою очередь, увеличивает удерживаемую влагу [96].

Для дообогащенных магнетитовых концентратов с высоким содержанием ультратонких классов основную проблему представляет именно капиллярная влага в микропорах и адсорбционная влага на развитой поверхности частиц. Классические методы вакуумной фильтрации эффективны преимущественно против гравитационной и части капиллярной влаги, тогда как для снижения содержания адсорбционной влаги необходимо воздействие на поверхностные свойства частиц такие как смачиваемость и электрокинетический потенциал.

Таким образом, анализ механизмов удержания влаги показывает, что оптимизация процесса обезвоживания магнетитовых концентратов требует комплексного подхода, учитывающего как гидродинамические параметры фильтрации, так и физико-химические характеристики поверхности твердой фазы. Управление смачиваемостью и электростатическими взаимодействиями через подбор реагентов представляет собой перспективное направление интенсификации, позволяющее воздействовать на удержание влаги без капитальной реконструкции технологического оборудования.

Проницаемость фильтрационного осадка железорудного концентрата представляет собой определяющий параметр, влияющий на эффективность процесса фильтрования и как следствие на производительность фильтрационного оборудования и конечную влажность. Проницаемость находится в прямой зависимости от гранулометрического состава и морфологических характеристик частиц железных руд и сопутствующей пустой породы [97; 98]. В условиях современной практики обогащения, характеризующейся вовлечением в переработку тонковкрапленных и многокомпонентных руд, детальный анализ влияния указанных факторов приобретает особую актуальность для оптимизации технологических схем и снижения эксплуатационных затрат [99; 100]. Так, уменьшение среднего размера частиц негативно влияет на водопроницаемость осадка фильтрования, что обуславливается формированием более развитой системы микропор, увеличивающих удельное сопротивление потоку фильтрата. Согласно уравнению Козени-Кармана, удельная производительность процесса фильтрации обратно пропорциональна квадрату удельной поверхности твердой фазы. Учитывая, что для дискретных частиц удельная поверхность обратно пропорциональна их среднему диаметру, проницаемость осадка возрастает пропорционально квадрату размера частиц, вследствие чего даже незначительное

укрупнение частиц концентрата может существенно интенсифицировать процесс обезвоживания. [101].

Монодисперсные фракции железорудного концентрата, как правило, формируют осадки с более высокой пористостью и проницаемостью по сравнению с полидисперсными продуктами при сопоставимом среднем размере частиц [97; 102]. В реальных технологических потоках обогащения, характеризующихся наличием широкого спектра классов крупности (от грубых зёрен до коллоидных шламов), мелкодисперсная фракция (<10 мкм) выполняет роль заполнителя межзернового пространства. Это приводит к уменьшению среднего диаметра пор, росту капиллярных сил удержания влаги и, как следствие, к снижению проницаемости и увеличению влажности конечного продукта [96; 98]. Экспериментальные исследования фильтрации железорудных пульп подтверждают, что повышение содержания тонких классов (<5 мкм), представленных как первичными шламами, так и образующимися при переизмельчении, коррелирует с ростом объёма микропор и существенным ухудшением фильтруемости концентрата [96; 103].

Форма частиц железосодержащих минералов и пустой породы представляет собой второй по значимости фактор, определяющий фильтрационные характеристики концентрата [97; 98; 104–108]. Морфология частиц влияет на характер их взаимной ориентации и плотность упаковки в осадке.

Частицы магнетита, обладающие изометричной или близкой к сферической форме, при прочих равных условиях формируют осадки с более высокой проницаемостью благодаря меньшей удельной поверхности и менее упорядоченной упаковке [105; 109; 110]. Напротив, частицы гематита, кварца или пустой породы, имеющие пластинчатую, чешуйчатую или вытянутую форму, способствуют образованию сложной, высокоизвилистой поровой структуры. Такая архитектура осадка характеризуется наличием многочисленных сужений и тупиковых пор, что существенно снижает эффективную проницаемость и затрудняет удаление влаги [98; 99; 108; 111]. Для несферических частиц пустой породы (слюды, хлориты, тонкочешуйчатый кварц) существенное значение имеет аспектное отношение: частицы с высокой степенью вытянутости формируют осадки с низкой проницаемостью из-за повышенной извилистости путей фильтрации [104; 105]. Шероховатость поверхности частиц, характерная для продуктов абразивного измельчения, усиливает гидравлическое сопротивление за счёт роста сил трения жидкости о твёрдую поверхность и может способствовать образованию менее плотных, но более влагоёмких структур осадка [106; 107; 112]. Экспериментальные данные подтверждают, что увеличение шероховатости поверхности частиц концентрата,

даже при неизменном гранулометрическом составе, способствует повышению сжимаемости осадка и ухудшению его обезвоживания [113].

Комплексное воздействие рассматриваемых факторов на проницаемость фильтрационного осадка концентрата реализуется через следующие механизмы:

1. Размер и форма зёрен магнетита и сростков определяют структуру их взаимного расположения в осадке. Более плотная упаковка, характерная для полидисперсных концентратов с высоким содержанием шламов и частиц неправильной формы, приводит к снижению общей пористости и уменьшению сечения поровых каналов, что негативно сказывается на проницаемости [97; 98; 102].

2. Наличие пластинчатых или вытянутых частиц пустой породы увеличивает извилистость путей фильтрации за счет образования слоистой структуры осадка, что приводит к росту гидравлических потерь и снижению проницаемости осадка, особенно в направлении, перпендикулярном плоскости фильтрации [108; 111].

3. Материалы, содержащие значительное количество тонкодисперсных и неферрических частиц, как правило, обладают повышенной сжимаемостью. Под действием перепада давления на фильтрующей перегородке происходит переупаковка структуры осадка, сопровождающаяся уменьшением объёма пор и дальнейшим снижением проницаемости. Данный эффект особенно выражен для концентратов с высоким содержанием глинистых минералов [76; 98].

4. В пульпах железорудного концентрата возможно формирование флокул или агрегатов частиц под действием электрокинетических и магнитных сил или реагентов-флокулянтов. Образование таких структур изменяет эффективный размер частиц и характер порового пространства, что может как улучшать, так и ухудшать фильтруемость в зависимости от прочности и проницаемости самих агрегатов [74; 114].

5. Проницаемость осадка концентрата также зависит от удельной поверхности твёрдой фазы, нелинейно масштабируясь с данным параметром. Коэффициент проницаемости обратно пропорционален квадрату удельной поверхности, что подчёркивает критическую важность контроля степени измельчения и дешламации в процессе обогащения руд [74; 101].

Таким образом, гранулометрический состав и форма частиц представляют собой параметры, комплексно определяющие проницаемость фильтрационного осадка железорудного концентрата. Узкое распределение частиц по размерам, преобладание изометричных зёрен магнетита и минимизация содержания тонкодисперсной шламовой фракции, как правило, способствуют формированию осадков с повышенной

проницаемостью, что обеспечивает высокую производительность оборудования обезвоживания и низкую влажность получаемого осадка. Напротив, широкий гранулометрический диапазон, наличие частиц пустой породы пластинчатой или вытянутой формы, а также высокое содержание коллоидных фракций приводят к снижению проницаемости вследствие более плотной упаковки, увеличения извилистости порового пространства и повышенной сжимаемости осадка.

### **1.3. Промышленное оборудование для обезвоживания железорудных концентратов**

В современной практике переработки железных руд наиболее широкое применение нашли методы фильтрования, которые можно классифицировать по принципу создания перепада давления на фильтровальной перегородке: вакуум-фильтрование и фильтрование под давлением (фильтр-прессы) [64]. Сравнительный анализ эффективности различных типов фильтровального оборудования является фундаментальной задачей при проектировании и модернизации обогатительных фабрик. Эффективность оценивается по комплексу показателей: влажность конечного продукта, удельная производительность, удельный расход энергии, чистота фильтрата (потери твердого) и эксплуатационная надежность [115].

Вакуум-фильтры относятся к аппаратам непрерывного действия, где движущей силой процесса является разность давлений между атмосферным давлением над фильтрующей поверхностью и разрежением под ней. В зависимости от типа фильтровальной перегородки данный класс оборудования подразделяется на тканевые и керамические [57; 64].

Тканевые дисковые вакуум-фильтры (Рисунок 2) являются традиционным решением для обезвоживания железорудных концентратов. Принцип их действия основан на прохождении пульпы через пористую фильтровальную ткань, на поверхности которой формируется осадок. Однако при переработке тонкоизмельченных концентратов, характеризующихся высоким удельным сопротивлением фильтрации, эффективность тканевых фильтров снижается [116]. Основными недостатками данного оборудования являются высокая остаточная влажность осадка за счет относительно не глубокого вакуума и склонность фильтровальной ткани к быстрому засорению тонкими классами, что приводит к снижению производительности [68; 117; 118].

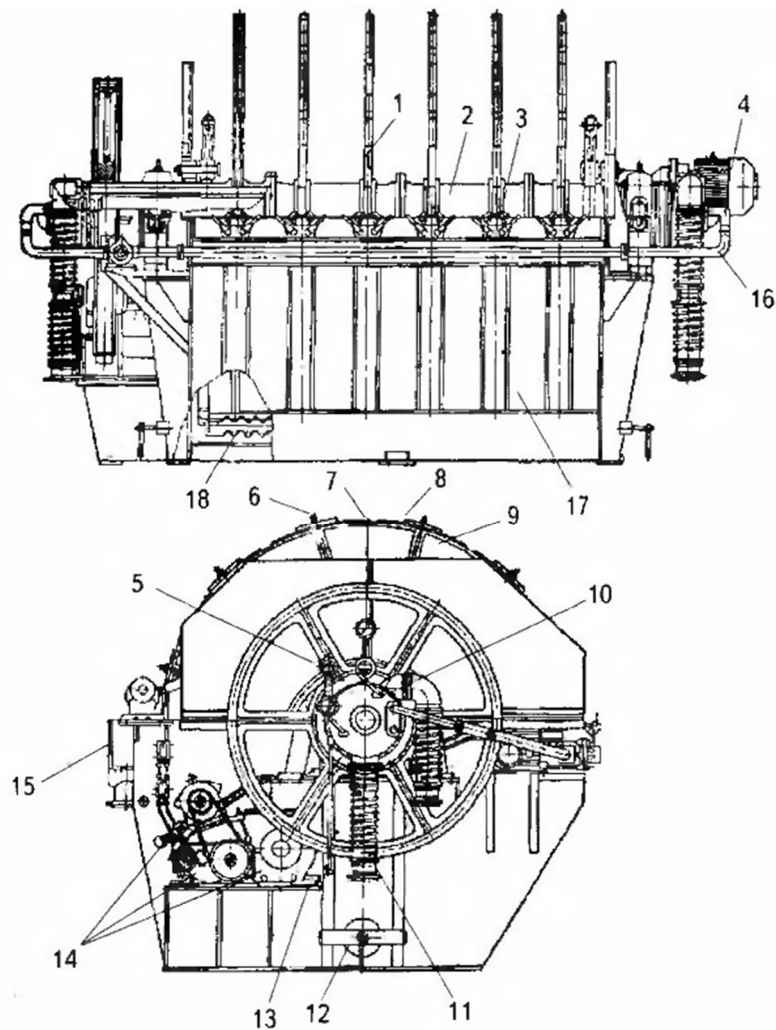


Рисунок 2 – Схема дискового вакуум-фильтра:

1 – диск; 2 – ячейковый вал; 3 – нож (скребок); 4 – электродвигатель привода мешалки; 5 – вакуумметр; 6 – шпилька; 7 – сектор; 8 – накладка; 9 – тканевый чехол; 10 – распределительная головка; 11 – гибкий шланг для подсоединения к вакуум-приводу; 12 – дренажный люк; 13 – тяга для удержания головки от проворачивания; 14 – привод ячейкового вала с дисками; 15 – желоб для сбора перелива; 16 – трубопровод сжатого воздуха; 17 – ванна; 18 – мешалка [118]

Тканевые дисковые вакуум-фильтры долгое время оставались стандартом для обезвоживания магнетитовых концентратов [119]. Их высокая популярность обусловлена непрерывностью процесса, большой удельной поверхностью фильтрования (до 100–150 м<sup>2</sup> на один агрегат) и относительной простотой обслуживания [120]. Для магнетитовых концентратов, обладающих хорошей водоотдачей благодаря крупности частиц и отсутствию глинистых примесей, тканевые вакуум-фильтры обеспечивают влажность осадка в диапазоне 9–11% [121]. Удельная производительность может достигать 0,8–1,2 т/м<sup>2</sup>·ч [120]. Однако при переработке гематитовых или лимонитовых руд, которые имеют более тонкую структуру и более высокую гидрофильность поверхности частиц, эффективность тканевых фильтров снижается [117]. Влажность может возрастать до 12–

14%, что негативно сказывается на металлургических показателях. Кроме того, тканевые фильтры склонны к «проскоку» тонких классов частиц через поры ткани, особенно в начале цикла формирования осадка, что приводит к загрязнению оборотной воды и потерям железа [122].

Керамические вакуум-фильтры (Рисунок 3) представляют собой более современную технологию, в которой в качестве фильтровальной перегородки используются пористые керамические пластины. Принцип действия основан на капиллярных силах: поры керамического материала имеют такой размер, что пропускают жидкость, но задерживают воздух до момента высыхания поверхности фильтра. Это позволяет поддерживать стабильный вакуум в течение всего цикла фильтрации [58; 123]. Преимуществами данного типа аппаратов являются энергоэффективность (менее мощные вакуум-насосы, отсутствие необходимости в компрессорах для отдувки) и большая долговечность фильтрующих элементов по сравнению с фильтровальными тканями [121; 124; 125].

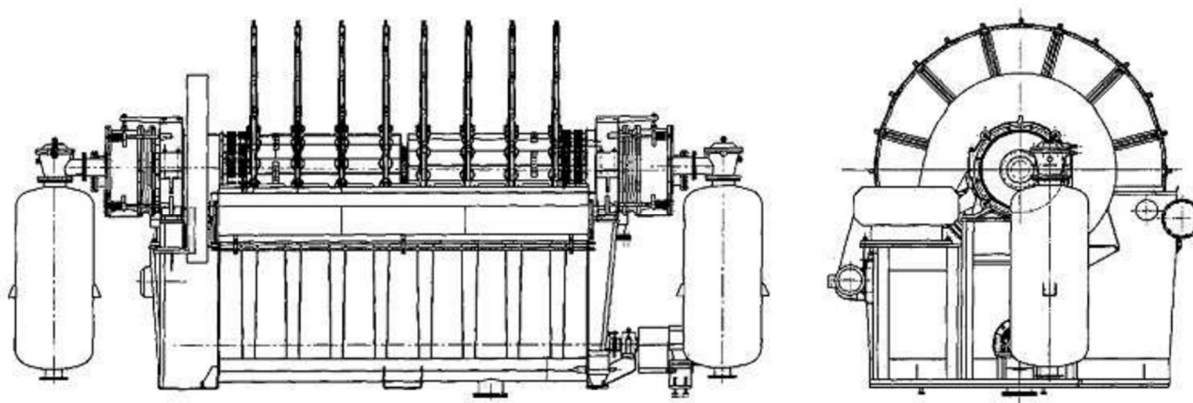


Рисунок 3 – Общий вид керамического дискового вакуум-фильтра КДФ-75 [125]

Керамические вакуум-фильтры демонстрируют высокие показатели эффективности фильтрования, особенно для тонкодисперсных продуктов: использование капиллярного принципа позволяет поддерживать максимальный перепад давления на фильтрующей перегородке при его работе. В результате влажность осадка на керамических дисковых вакуум-фильтрах для магнетитовых концентратов обычно составляет 6-10 %, что на 2–4 % ниже показателей тканевых аналогов [123]. Для гематитовых концентратов разница может быть еще более существенной [126]. Снижение влажности на 1% для крупного комбината означает экономию миллионов рублей ежегодно на транспортных расходах и сушке [127]. Удельная производительность керамических фильтров сопоставима с тканевыми-вакуум фильтрами [128].

Важным аспектом эффективности керамических фильтров является энергопотребление. Поскольку керамическая перегородка не пропускает воздух, нагрузка

на вакуум-насосы значительно ниже, что снижает удельный расход электроэнергии на тонну продукта на 30–50% по сравнению с тканевыми фильтрами [115; 127]. Кроме того, фильтрат на керамических фильтрах отличается высокой чистотой, так как размер пор керамики меньше размера большинства частиц концентрата [123]. Это упрощает схему водооборота и снижает нагрузку на сгустители оборотной воды [117].

Фильтр-прессы относятся к аппаратам периодического действия, где фильтрация осуществляется под избыточным давлением, создаваемым насосами подачи пульпы и/или мембранным механизмом. Высокий перепад давления (до 15 бар и выше) позволяет эффективно обезвоживать труднофильтруемые шламы и концентраты с высоким содержанием тонких классов. Конструктивно фильтр-прессы классифицируются на камерные, мембранные и камерно-мембранные [59; 66].

Камерные фильтр-прессы состоят из набора плит, образующих фильтровальные камеры (Рисунок 4). Заполнение камер происходит шламовым насосом подачи пульпы. Осушение осадка осуществляется преимущественно за счет давления заполнения внутреннего объема фильтруемым материалом и воздушной продувки. Данный тип оборудования обеспечивает высокую степень разделения твердой и жидкой фаз, однако влажность осадка может оставаться выше по сравнению с мембранными модификациями из-за отсутствия механического отжима. [129]

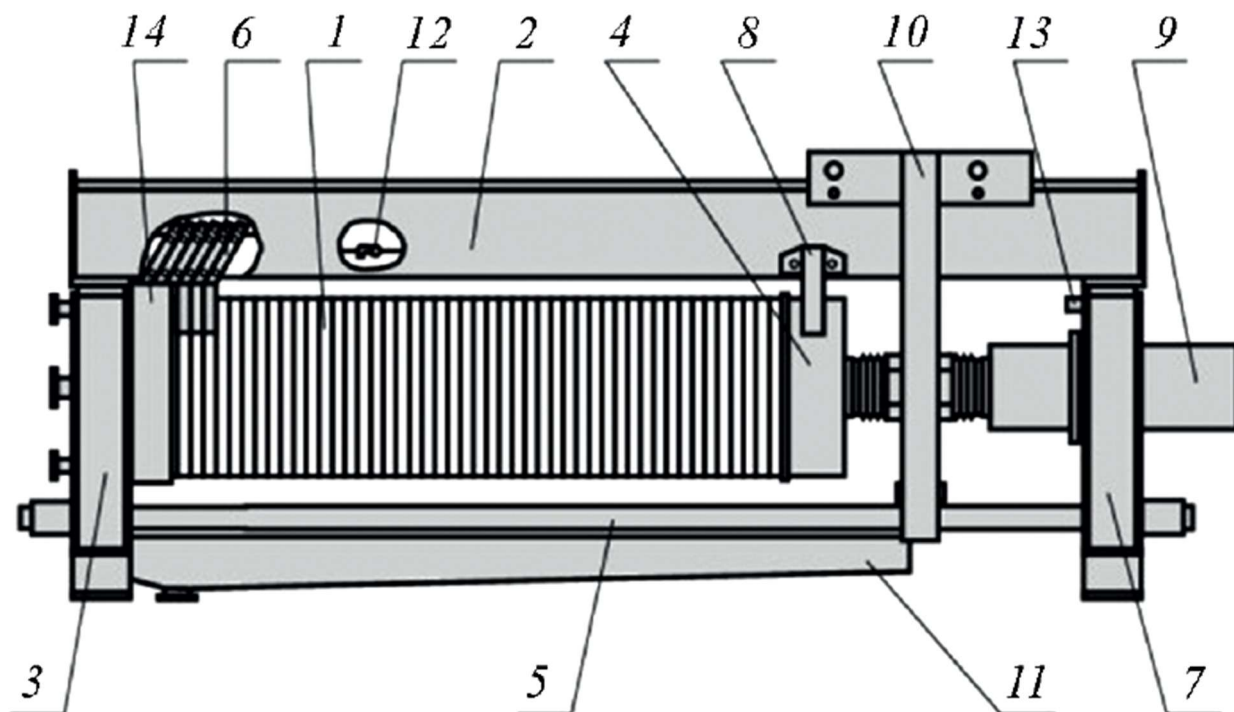


Рисунок 4 – Общий вид фильтр-пресса:

1 – плита фильтровальная; 2 – балка верхняя; 3- плита упорная; 4 – плита нажимная; 5 – стяжка нижняя; 6 – подвеска; 7 – стойка; 8 – кронштейн; 9 – механизм зажима; 10 – мойка; 11 – поддон; 12 – механизм перемещения; 13 – световой занавес; 14 – защитные шторы [129]

Отличием мембранных фильтр-прессов является то, что они оснащены эластичными мембранами, встроенными в фильтровальные плиты. После заполнения камер пульпой и первичной фильтрации подается жидкость или сжатый воздух под мембрану, что приводит к ее расширению и механическому отжиму осадка. Это позволяет значительно снизить влажность осадка. Для железорудных концентратов использование мембранного отжима в сочетании с продувкой осадка сжатым воздухом позволяет достигать влажности осадка в диапазоне 6–8%, что ниже чем при фильтровании на вакуум-фильтрах, особенно для тонких классов [66].

Камерно-мембранные фильтр-прессовы сочетают в себе конструктивные элементы обоих типов плит, которые установлены поочередно, что удешевляет его стоимость, а также упрощает его техническое обслуживание и соответственно себестоимость получаемого концентрата [59].

Анализ эксплуатационных характеристик показывает, что выбор типа фильтровального оборудования для железорудных концентратов зависит от гранулометрического состава материала и требований к конечной влажности. Вакуум-фильтры (особенно керамические) предпочтительны для непрерывных процессов с большими объемами пульпы средней фильтруемости. Фильтр-прессовы (особенно мембранные) находят применение там, где требуется минимизация влажности осадка для последующей транспортировки или переработки, несмотря на периодичность процесса и более высокие капитальные затраты. В современной литературе отмечается тенденция к замене устаревших тканевых вакуум-фильтров на керамические фильтры для повышения эффективности обезвоживания тонкоизмельченных железных руд [64].

Засорение фильтровальных перегородок, будь то ткань или пористая керамика, представляет собой одну из наиболее критических проблем, определяющих эксплуатационную эффективность и производительность аппаратов обезвоживания [124; 130]. Данное явление носит комплексный характер и приводит к снижению скорости фильтрации, повышению гидравлического сопротивления и, как следствие, к существенному падению производительности [116]. Последствия засорения выходят за рамки технологических показателей: они включают снижение качества очищенной жидкости, рост энергозатрат на поддержание перепада давления и увеличение частоты замены фильтроткани или регенерации фильтрующих элементов [131; 132].

Анализ литературы позволяет выделить несколько механизмов засорения, однако степень их изученности для различных типов фильтров неодинакова. Наиболее исследованным является механический механизм, при котором мелкие частицы проникают в поры фильтрующего материала, забивая их изнутри и уменьшая эффективный диаметр

каналов, что прямо увеличивает гидравлическое сопротивление. Вместе с тем, влияние химического осаждения веществ (карбонатов, сульфатов, оксидов) на поверхности и в порах фильтра изучено преимущественно для систем водоочистки, тогда как для железорудных пульп с высоким содержанием ионов жесткости данный аспект остается недостаточно освещенным [116; 133].

Отдельного внимания заслуживает проблема биологического засорения. Микроорганизмы способны колонизировать поверхность фильтрующего материала, образуя биопленки, которые не только физически блокируют поры, но и создают дополнительное сопротивление потоку [134; 135]. Однако в доступных источниках практически отсутствуют данные о влиянии биообрастания именно на керамические фильтры в условиях оборотного водоснабжения обогатительных фабрик, где химический состав воды может ингибировать или стимулировать рост микрофлоры.

Критическим аспектом, требующим дальнейшего изучения, является взаимосвязь между механическими повреждениями перегородки и ускоренным засорением смежных элементов. Отрыв или разрушение фильтровальной перегородки может привести к проникновению загрязняющих веществ в систему, что ускоряет деградацию оборудования [136]. Тем не менее, количественные критерии предельного состояния керамических пластин, при которых регенерация становится неэффективной, в литературе не систематизированы.[137]. Одним из индикаторов засорения служит рост перепада давления на фильтре, который требует увеличения энергозатрат для поддержания желаемой скорости потока [132].

Изучение проблем эксплуатации выявляет, что засорение перегородок носит комплексный характер, включая механические, химические и биологические факторы, что приводит к росту гидравлического сопротивления. Критической проблемой остается отсутствие систематизированных количественных критериев предельного состояния керамических пластин, при которых регенерация становится неэффективной. Кроме того, в отрасли не проработаны методики прогнозирования момента необходимости регенерации на основе динамики перепада давления, что затрудняет планирование обслуживания оборудования.

#### 1.4. Методы интенсификации процесса фильтрации

Интенсификация процесса фильтрации железорудных концентратов является ключевой задачей для повышения эффективности работы ГОКов, снижения затрат и минимизации воздействия на окружающую среду. Этот процесс может быть интенсифицирован с помощью различных подходов, которые классифицируются как механические, физические и химические методы. Основная цель интенсификации – увеличение производительности фильтровального оборудования и снижение влажности получаемого осадка.

Физико-механические методы интенсификации направлены на изменение условий процесса или структуры твердой фазы без существенного изменения химического состава пульпы. Одним из таких подходов является повышение перепада давления, что достигается использованием более глубокого вакуума (переход от тканевых к керамическим вакуум-фильтрам), напорного фильтрации (переход к технологии пресс-фильтрации) или комбинированных методов (использование гипербар-фильтров) [138; 139]. Наряду с повышением перепада давления, повышение содержания твердого в поступающей на фильтрацию пульпе позволяет повысить производительность оборудования [140]. Но данные методы имеют ограничения, связанные с остаточной влажностью, при увеличении производительности (толщины получаемого осадка) неминуемо возрастает его остаточная влажность. При фильтрации железорудных концентратов влажность осадка строго регламентирована в узких диапазонах, что обуславливается последующим окомкованием или складированием.

Оптимизация гранулометрического состава и формы частиц также играет важную роль. Контролируемое измельчение или агломерация частиц может привести к формированию более равномерного и проницаемого фильтрационного осадка [81]. Например, при подготовке руды к флокуляции, размер частиц может влиять на эффективность процесса [141]. Исследования показывают, что мелкие частицы могут усложнять фильтрацию из-за высокой плотности упаковки и образования менее проницаемого осадка [81; 142]. Но зачастую гранулометрический состав обусловлен технологией обогащения получаемых продуктов и его изменение не целесообразно для интенсификации процесса фильтрации.

К физическим методам интенсификации можно отнести ультразвуковую обработку суспензии, который может разрушать структурные связи в агломератах частиц, тем самым улучшая их фильтруемость [143]. Ультразвук может способствовать преодолению диффузионных ограничений и ускорению потока жидкости через фильтр, что помогает предотвратить загрязнение мембраны. Недостатком данной технологии является

необходимость изменения конструкции фильтровальных аппаратов и высокое энергопотребление. [144]

Термическая предварительная обработка суспензии используется для снижения вязкости фильтрата, что приводит к увеличению скорости фильтрации, но при многотоннажном производстве железорудных концентратов такой метод также является экономически не целесообразным в связи с высоким энергоёмкостью процесса [138].

Рассмотрение вышеперечисленных способов интенсификации показывает, что они действительно способны улучшить фильтруемость за счет снижения вязкости и изменения структуры осадка. Однако на действующих фабриках часто отсутствует возможность установки дополнительного оборудования или капитальной реконструкции участков фильтрации и оборудования. Это ограничение смещает фокус исследований в сторону химических методов, которые могут быть внедрены в существующие технологические схемы с минимальными изменениями инфраструктуры.

Химические методы интенсификации фильтрации сосредоточены на изменении поверхностных свойств частиц и реологических характеристик пульпы, чтобы облегчить разделение твердой и жидкой фаз.

Регулирование pH среды является эффективным способом управления зарядом поверхности частиц и силами электростатического отталкивания между ними. Изменение pH может значительно влиять на коагуляцию и флокуляцию частиц [114; 145]. Например, в случае железных руд, pH может регулироваться для оптимизации селективной флокуляции, так изоэлектрическая точка магнетита находится в диапазоне pH 6,5-7,0 [141; 146].

Применение поверхностно-активных веществ (ПАВ) изменяет смачиваемость поверхности частиц и капиллярные силы внутри осадка. Это может способствовать более эффективному удалению воды из осадка [62; 147]. Например, некоторые виды ПАВ, содержащие карбоксильные, сульфоновые и амидные группы, могут адсорбироваться на поверхности частиц железорудного концентрата, изменяя смачиваемость поверхности и сжимая гидратные оболочки, что улучшает фильтрацию.

Флокулянты и коагулянты широко используются для улучшения обезвоживания различных суспензий, включая железорудные концентраты и шламы [148–150]. Эти вещества способствуют агрегации мелких частиц в более крупные и рыхлые флокулы, что ускоряет их осаждение и фильтрацию. Основные механизмы действия включают нейтрализацию заряда частиц и образование мостиковых связей между частиц путем адсорбции макромолекулы на нескольких частицах [149; 151].

Коагулянты это обычно неорганические соли поливалентных металлов, которые нейтрализуют поверхностный заряд частиц, снижая силы электростатического отталкивания и способствуя их агрегации [149; 152; 153]. Например, соли алюминия и железа, такие как сульфат алюминия и хлорид железа, широко используются в процессах коагуляции. В настоящее время применение нашли также полимерные коагулянты, используемые в процессах очистки сточных вод [154–156].

Флокулянты это макромолекулярные полимеры (например, полиакриламиды – ПАА, катионные, анионные или неионогенные), которые образуют мостиковые связи между коагулированными частицами, формируя крупные, прочные и быстро оседающие хлопья [149; 153]. Флокулянты, улучшая структуру осадка, снижают сопротивление фильтрации и повышают проницаемость [81]. Молекулярная масса флокулянтов, таких как полиакриламид, влияет на их эффективность: полимеры с более высокой молекулярной массой (например, 16-20 миллионов) могут улучшать флокуляцию и фильтрацию шламов [157].

Комбинированное применение коагулянтов и флокулянтов часто дает наилучшие результаты. Например, в обработке сточных вод таниновая кислота в сочетании с полиэтиленоксидом и хлоридом железа значительно увеличивала скорость вакуумной фильтрации за счет улучшения проницаемости фильтрационного осадка и снижения удельного сопротивления фильтрации [158]. Аналогично, в случае шлама, сочетание полимерного хлорида алюминия и ПАА значительно улучшило его фильтрационные свойства [154; 159].

Таким образом, литературные данные подтверждают высокий потенциал химических методов интенсификации (ПАВ, флокулянтов) для управления структурой осадка. Однако приведенные примеры преимущественно относятся к системам магнитной сепарации или обезвоживанию хвостов, где поверхность частиц не модифицирована гидрофобизирующими собирателями. Применение этих методов к концентратам обратной катионной флотации магнетита требует учета состояния поверхности твердой фазы, что рассматривается в следующем разделе.

### 1.5. Влияние реагентных режимов на физико-химические свойства поверхности железорудных концентратов

В процессе обратной катионной флотации железных руд механизмы адсорбции депрессора и собирателя, а также их влияние на поверхностные свойства частиц играют ключевую роль в селективном разделении минералов. Этот метод широко применяется для обогащения железных руд за счет удаления пустой породы, в основном кварца и силикатов, при одновременном сохранении железосодержащих минералов.

Декстрин представляет собой полисахаридный депрессор, который широко используется в обратной катионной флотации для селективного подавления железосодержащих минералов [160–162]. Декстрин адсорбируется на поверхности магнетита и других железосодержащих минералов, таких как амфиболы, преимущественно через водородные связи. Например, на поверхности гематита адсорбция полисахаридов объясняется кислотно-основным взаимодействием [160; 163]. Также декстрин может взаимодействовать с ионами Fe(III) на поверхности минералов, которые могут быть частью кристаллической решетки или адсорбированы на поверхности. Образование комплексов способствует прочной адсорбции декстрина, что усиливает гидрофильность поверхности [164]. Полисахариды обладают высоким сродством к поверхности оксидов железа эта специфическая адсорбция является ключевым фактором их депрессирующего действия. Адсорбированный декстрин физически блокирует активные центры на поверхности железосодержащих минералов, которые могли бы взаимодействовать с катионными собирателями. Это препятствует адсорбции собирателя на этих минералах, обеспечивая селективное разделение [162].

Амины, особенно додециламин и его производные, являются наиболее распространенными катионными собирателями, используемыми для флотации кварца и других силикатов в обратной флотации железных руд [165–167]. В нейтральных и слабощелочных средах (например, при pH 10,5), аминовые собиратели существуют в протонированной форме ( $R-NH_3^+$ ), что делает их катионными. Поверхность кварца при этих значениях pH обычно отрицательно заряжена из-за диссоциации силанольных групп ( $Si-OH \rightarrow SiO^- + H^+$ ). В результате происходит сильное электростатическое притяжение между протонированными аминами и отрицательно заряженной поверхностью кварца [166; 169].

Главным эффектом адсорбции аминов является придание поверхности кварца гидрофобности, что позволяет ему прикрепляться к пузырькам воздуха и флотировать. Адсорбция катионных аминов приводит к изменению дзета-потенциала кварца в более положительную сторону, что подтверждает их адсорбцию на поверхности. Например,

новый собиратель цетилтриметиламмонийхлорид (СТАС) увеличивал поверхностный потенциал кварца, что способствовало его избирательному сбору [167; 170–172].

Применение реагентов-интенсификаторов (ПАВ и флокулянтов) для обезвоживания флотационных концентратов осложняется необходимостью их конкуренции с уже адсорбированными флотореагентами за активные центры на поверхности частиц. Поверхностно-активные вещества могут существенно изменять поверхностное натяжение жидкости и, следовательно, краевой угол на поверхности частиц. Например, добавление ПАВ может влиять на образование усадочных трещин в осадках железорудного концентрата во время фильтрации, поскольку это связано с поверхностным натяжением жидкости и краевым углом смачивания частиц. Для подавления пыли на предприятиях по переработке железной руды используются растворы ПАВ для максимизации смачивающей способности тонкодисперсных частиц [173; 174]

В системах с остаточными аминами и крахмалом эффективность ПАВ определяется не только их способностью снижать поверхностное натяжение фильтрата, но и характером их взаимодействия с органическим слоем на частицах. Анионные ПАВ могут вступать в электростатическое взаимодействие с катионными группами адсорбированного амина, образуя нерастворимые комплексы, которые могут как улучшать смачиваемость за счет экранирования гидрофобных радикалов, так и ухудшать её, создавая дополнительные гидрофобные пятна. Отсутствие систематизированных данных о пороговых концентрациях перехода от многослойной адсорбции к вытеснению в таких многокомпонентных системах затрудняет прогнозирование оптимальных дозировок. [173; 175]

Анионные флокулянты (например, полиакриламиды), эффективные в нейтральных средах или на положительно заряженных поверхностях, в случае флотационных концентратов сталкиваются с проблемой электростатического отталкивания. Поверхность магнетита, модифицированная крахмалом и находящаяся в щелочной среде (рН 9–10), имеет отрицательный заряд. Введение анионного полимера может усиливать это отталкивание, делая механизм мостиковой флокуляции трудноосуществимым, если только в жидкой фазе не присутствуют ионы ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ), способные скомпенсировать заряд. Однако зависимость от жесткости воды делает этот метод нестабильным в условиях замкнутого водооборота ГОКов [145; 149].

Катионные флокулянты представляют наибольший интерес именно для систем с остаточной анионной химией. Теоретически катионные флокулянты должны обеспечивать нейтрализацию заряда, активно взаимодействуя с отрицательными центрами поверхности, созданными крахмалом и оксидами железа [151]. Это позволяет не только снизить модуль дзета-потенциала до значений, благоприятных для коагуляции, но и частично вытеснить

или экранировать гидрофобные радикалы собирателя, восстанавливая гидрофильность поверхности, что подтверждается исследованиями [176]. Важным преимуществом катионных полимеров является меньшая зависимость их эффективности от ионного состава воды по сравнению с анионными аналогами, что обеспечивает стабильность процесса агрегации [177].

Тем не менее, применение катионных флокулянтов также имеет свои ограничения. Избыточная дозировка может привести к перенасыщению поверхности положительным зарядом (перезарядке), что вызовет повторную стабилизацию суспензии за счет электростатического отталкивания. Кроме того, возможно образование мицеллярных структур полимера в объеме пульпы, которые, адсорбируясь на перегородке, могут блокировать поры фильтровальных элементов [147]. Оптимальный диапазон дозировок в таких системах значительно уже, чем для обычных шламов, и требует точного учета концентрации остаточных флотореагентов.[149]

Для керамических фильтров, работающих по капиллярному принципу, критически важна гидрофильность поверхности пор. Адсорбция гидрофобных компонентов может нарушить капиллярный эффект, приводя к проскоку воздуха и падению вакуума. Кроме того, образование труднорастворимых комплексов между остаточными реагентами и ионами жесткости оборотной воды способствует химическому засорению пор, которое невозможно удалить стандартными методами промывки водой [178]. Сравнительные данные о степени такого засорения для тканевых и керамических перегородок в присутствии комплекса реагентов (депрессор + собиратель + флоулянт/коагулянт) практически отсутствуют, что создает риски при выборе оборудования и регламентов его обслуживания [119].

Засорение фильтровальных перегородок представляет собой одну из наиболее критических проблем, определяющих эксплуатационную эффективность и производительность фильтровального оборудования [122; 132]. Данное явление носит комплексный характер и приводит к снижению скорости фильтрации, повышению гидравлического сопротивления и, как следствие, к существенному падению производительности, росту энергозатрат и увеличению частоты замены фильтротканей или регенерации керамических фильтрующих элементов [123; 133; 134].

Анализ литературы позволяет выделить несколько механизмов засорения, однако степень их изученности для различных типов фильтров неодинакова. Наиболее исследованным является механический механизм, при котором мелкие частицы проникают в поры фильтрующего материала, забивая их изнутри и уменьшая эффективный диаметр каналов, что прямо увеличивает гидравлическое сопротивление. Вместе с тем, влияние

химического осаждения веществ (карбонатов, сульфатов, оксидов) на поверхности и в порах фильтра изучено преимущественно для систем водоочистки, тогда как для железорудных пульп с высоким содержанием ионов жесткости данный аспект остается недостаточно освещенным [123; 135].

Отдельного внимания заслуживает проблема биологического засорения. Микроорганизмы способны колонизировать поверхность фильтрующего материала, образуя биопленки, которые не только физически блокируют поры, но и создают дополнительное сопротивление потоку [136; 137]. Однако в доступных источниках практически отсутствуют данные о влиянии биообрастания именно на керамические фильтры в условиях оборотного водоснабжения обогатительных фабрик, где химический состав воды может ингибировать или стимулировать рост микрофлоры.

Критическим аспектом, требующим дальнейшего изучения, является взаимосвязь между механическими повреждениями перегородки и ускоренным засорением смежных элементов. Отрыв или разрушение фильтровальной перегородки может привести к проникновению загрязняющих веществ в систему, что ускоряет деградацию оборудования [138]. Тем не менее, количественные критерии предельного состояния керамических пластин, при которых регенерация становится неэффективной, в литературе не систематизированы [139]. Одним из индикаторов засорения служит рост перепада давления на фильтре, который требует увеличения энергозатрат для поддержания желаемой скорости потока [134].

Анализ литературных данных показывает, что интенсификация фильтрования флотационных концентратов требует не просто добавления флокулянтов для агрегации частиц, а глубокого понимания механизмов их взаимодействия с предварительно модифицированной поверхностью частиц. Существующие методики, разработанные для магнетитовых концентратов после магнитной сепарации, неприменимы без коррекции, учитывающей эффекты конкурентной адсорбции, стерической стабилизации крахмалом и гидрофобизации аминами. Отсутствие систематизированных данных о количественных закономерностях этих процессов для конкретных пар реагентов, используемых на российских ГОКах, формирует научный пробел, требующий экспериментального заполнения.

### **1.6 Анализ научного пробела и обоснование направления исследований**

Проведенный анализ литературных источников позволяет констатировать, что к настоящему времени достаточно подробно изучены фундаментальные основы процесса фильтрования, механизмы удержания влаги в осадках и влияние гранулометрического состава на проницаемость осадка. Также установлены общие закономерности работы вакуум-фильтров, включая преимущества керамических фильтрующих элементов перед тканевыми аналогами.

Однако, несмотря на значительный объем знаний, в области интенсификации фильтрования железорудных концентратов, существует ряд нерешенных вопросов, формирующих научный пробел:

1. Внедрение обратной катионной флотации для повышения качества магнетитовых концентратов приводит к ухудшению фильтрационных характеристик из-за доизмельчения и адсорбции остаточных флотационных реагентов (собирателей, депрессоров), но механизмы нейтрализации этого влияния с помощью специальных реагентов-интенсификаторов в присутствии остаточных флотореагентов изучены недостаточно.

2. Существующие методики подбора флокулянтов и ПАВ разработаны преимущественно для концентратов магнитной сепарации, не прошедших флотационное дообогащение. Нет систематизированных данных о синергетическом или нейтрализующем взаимодействии между остаточными флотационными реагентами и добавляемыми флокулянтами и коагулянтами.

3. Несмотря на высокую эффективность керамических вакуум-фильтров, проблема поддержания их долгосрочной производительности требует дальнейшего изучения и разработки более эффективных способов восстановления проницаемости керамических элементов.

### Выводы к главе 1

1. Качество железорудных концентратов, предназначенных для окомкования, жестко регламентировано по влажности. При фильтровании также важна не только достижение заданной влажности, но и ее стабильность для обеспечения равномерной работы окомкователей и обжиговых машин;

2. Ухудшение фильтруемости концентратов связано с тенденцией к более тонкому измельчению для раскрытия минералов. Рост содержания тонких классов (<10 мкм) приводит к формированию менее проницаемых осадков и увеличению влагоудерживающей способности;

3. Керамические дисковые вакуум-фильтры являются более перспективным оборудованием для обезвоживания тонкоизмельченных концентратов, обеспечивая меньшие энергозатраты по сравнению с тканевыми фильтрами. Однако их эксплуатация осложняется не решенной проблемой засорения пор и снижения производительности со временем эксплуатации;

4. Применение обратной катионной флотации для повышения качества концентрата вносит дополнительный негативный фактор: остаточные флотационные реагенты адсорбируясь на поверхности частиц, изменяют поверхностные свойства, что приводит к снижению производительности и повешению влажности получаемых осадков;

5. Химические методы интенсификации (применение флокулянтов, коагулянтов, ПАВ) обладают высокой эффективностью для улучшения структуры осадка. Однако существующие решения не учитывают специфику взаимодействия данных реагентов с поверхностью частиц, предварительно модифицированной флотационными реагентами.

8. Отсутствие единой научно обоснованной стратегии, сочетающей подбор интенсифицирующих реагентов с учетом остаточной флотационной химии и методов регенерации фильтрующих элементов, сдерживает повышение эффективности обезвоживания на действующих предприятиях. Это обуславливает необходимость проведения собственных экспериментальных исследований для разработки оптимальных технологических режимов.

## Глава 2. Объекты, методы и методики исследований

В процессе подготовки рукописи применялись инструменты языковых моделей исключительно в качестве вспомогательного средства орфографической и стилистической редакции. Их функционал ограничивался корректурой синтаксических конструкций и приведением изложения в соответствие с нормами научно-технического стиля. Все методологические решения, описание экспериментальных установок, алгоритмы обработки данных, а также интерпретация результатов сформированы автором самостоятельно без участия генеративных моделей.

### 2.1 Объекты исследования

Объектом исследования являлся железорудный магнетитовый концентрат, полученный в результате обратной катионной флотации на АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева». Химический состав концентрата характеризовался следующим содержанием компонентов: массовая доля общего железа ( $Fe_{\text{общ}}$ ) – 69,7 %, кремнезема ( $SiO_2$ ) – 2,4 %. Пробоотбор осуществлялся с керамических дисковых вакуум-фильтров КДФ-90 участка фильтрования. Отбор проб осуществлялся в соответствии с ГОСТ 26136-84.

Для исследования электродного потенциала поверхности был подготовлен штучной образец минерала магнетита. Из образца были вырезаны пластинки толщиной 4 мм. Рабочая поверхность пластинок подвергалась механической полировке. На противоположную поверхность наносился токопроводящий серебросодержащий клей (Keller, Россия), после чего фиксировался медный контактный провод. Образец герметизировался парафином методом погружения, за исключением полированной рабочей поверхности, что обеспечивало электроизоляцию боковых граней и контактной зоны.

### 2.2 Характеристика реагентов для интенсификации процесса фильтрования

В ходе экспериментальных исследований использовался комплекс реагентов, применяемых в технологической схеме обратной катионной флотации магнетитовых концентратов, а также реагенты-интенсификаторы фильтрации. Выбор реагентов обусловлен их промышленным применением на предприятии и теоретическими предпосылками влияния на поверхностные свойства минералов.

Декстрин – гидролизованный щелочью кукурузный крахмал, применяется при обратной флотации магнетитового концентрата как депрессор магнетита. Расходы его как правило составляют от 500 до 1200 г/т [41];

3-(изодецилокси)пропиламин – органическое соединение, производное аммиака, в котором атомы водорода замещены на углеводородные радикалы. Выступает как правило собирателем пустой породы (кварц, кальцит и т.п.). Обладает пенящими свойствами. Расходы как правило составляют от 50 до 200 г/т [43];

Гидроксид натрия (NaOH) – корректирует pH пульпы до щелочного диапазона (9–10), создавая условия для эффективной депрессии магнетита и активации собирателя [179];

Реагент А – высокомолекулярный полиэлектролит со средним анионным зарядом на основе акриламида и акрилата натрия;

Реагент К – полимерный коагулянт с высокой флокулирующей способностью имеющий катионный характер с высокой плотностью заряда на основе полидиаллилдиметиламмония хлорида.

Все реагенты использовались в виде водных растворов, которые приготавливались на дистиллированной воде для исключения влияния ионного состава водопроводной воды на результаты экспериментов. Концентрация рабочих растворов контролировалась весовым методом с точностью до 0,01 г.

Из железорудного концентрата готовили водную суспензию (250 мл) с содержанием твердой фазы 50 % (масс.), жидкую фазу которой подщелачивали за счет добавления 1-% водного раствора гидроксида натрия до значений pH = 9-10. В подготовленную суспензию добавляли реагенты в соответствии с выбранными режимами (Таблица 1), после дозировки каждого реагента, суспензия интенсивно перемешивалась 5 минут. После обработки осадки фильтровали на воронке Бюхнера через фильтр обеззоленный «синяя лента» и сушили при комнатной температуре.

Таблица 1 – Режимы модификации частиц магнетитового концентрата реагентами

№	Обозначение	Описание
1	Исх.	Исходный не обработанный концентрат/минерал
2	Д	Добавление раствора декстрина к исходному образцу из расчета 900 мг/л жидкой фазы, перемешивание в течение 5 минут
3	Ам	Добавление раствора амина к исходному образцу из расчета 300 мг/л жидкой фазы, перемешивание в течение 5 минут
4	Д+Ам	Добавление раствора декстрина (900 мг/л), перемешивание в течение 5 минут, добавление раствора амина (300 мг/л), перемешивание в течение 5 минут
5	Д+Ам+Р(А)	Добавление раствора декстрина (900 мг/л), перемешивание в течение 5 минут, добавление раствора амина (300 мг/л), перемешивание в течение 5 минут, добавление раствора реагента А (30 мг/л), перемешивание в течение 5 минут
6	Д+Ам+Р(К)	Добавление раствора декстрина (900 мг/л), перемешивание в течение 5 минут, добавление раствора амина (300 мг/л), перемешивание в течение 5 минут, добавление раствора реагента К (30 мг/л), перемешивание в течение 5 минут

### 2.3 Характеристика реагентов для регенерации фильтрующих элементов

Реагенты регенерационной композиции:

1. Щавелевая кислота ( $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ , ГОСТ 22180-76) – основной кислотный агент, обеспечивающий растворение отложений оксида железа (III), гидроксида железа (III) и органических загрязнений.
2. Оксиэтилидендифосфоновая кислота (ОЭДФК, HEDP,  $\text{C}_2\text{H}_8\text{O}_7\text{P}_2$  ТУ 2439-363-05763441-2002) – комплексообразующий агент, обеспечивающий хелатирование ионов двухвалентного железа ( $\text{Fe}^{2+}$ ) и ионов щелочноземельных металлов ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ba}^{2+}$ ), что предотвращает повторное осаждение солей и способствует удалению отложений оксида железа (II).
3. Вода техническая – растворитель.

### 2.4 Методы и оборудование для исследования физико-химических свойств

Комплекс исследований включал определение гранулометрического состава, удельной поверхности, электрокинетического потенциала, морфологии частиц, а также смачиваемости и электрохимических свойств поверхности.

Определение распределения частиц и агрегатов по размерам проводилось на представительных пробах с использованием лазерного дифракционного анализатора Fritsch Particle Sizer «Analysette 22» (Fritsch GmbH, Германия). Принцип действия анализатора основан на физическом явлении дифракции лазерного излучения на частицах, находящихся во взвешенном состоянии. Прибор использует запатентованную оптическую схему «обратной оптики Фурье» с сходящимся лазерным лучом. Данная конструкция позволяет изменять диапазон измерений путем автоматического перемещения измерительной ячейки вдоль оптической оси без замены фокусирующих линз, что обеспечивает высокую динамику измерений и оптимальное согласование параметров для каждого диапазона крупности. Устройство оснащено ультразвуковой ванной для диспергирования агломератов и центробежным насосом для циркуляции суспензии через измерительную ячейку. Однако для оценки степени агрегации частиц при использовании реагентов А и К в различных дозировках стандартная процедура подготовки проб была модифицирована. Измерение осуществлялось в следующих условиях: диапазон измерений составлял от 0,1 до 254,8 мкм, ультразвуковая обработка была полностью отключена для сохранения целостности формируемых агрегатов. Мощность насоса была установлена на минимально возможном уровне, достаточном для обеспечения воспроизводимости результатов и предотвращения седиментации крупных частиц, что составило 30 % от максимальной

мощности. Такой подход позволил зафиксировать размер вторичных агрегатов, образующихся под действием полимеров, без их разрушения гидродинамическими силами.

Определение удельной площади поверхности проводилось на приборе ПСХ-12М (ООО «Собственные технологии», Россия). Метод измерения основан на методе газопроницаемости Козени и Кармана в соответствии с ГОСТ 21043-87 [180], который устанавливает зависимость между удельной поверхностью порошка и гидравлическим сопротивлением слоя частиц при фильтрации через него газа. Данный метод является стандартизированным для порошковых материалов и обеспечивает высокую воспроизводимость результатов для материалов с узким диапазоном крупности.

Методика измерения заключается в определении времени прохождения фиксированного объема воздуха через уплотнённый слой исследуемого образца при постоянной разности давлений. Расчет удельной поверхности осуществлялся приборным программным обеспечением по формуле (6):

$$S_0 = 14 \sqrt{\frac{\Delta P \cdot F \cdot \delta^3}{Q \cdot \eta \cdot L \cdot (1 - \delta)^2}} \quad (6)$$

где  $S_0$  – поверхность на единицу объема,  $\text{см}^2/\text{г}$ ;  
 $\Delta P$  – разность давлений по сторонам образца, Па;  
 $\delta$  – поперечное сечение образца,  $\text{см}^2$ ;  
 $F$  – коэффициент пористости;  
 $Q$  – расход воздуха,  $\text{см}^3/\text{с}$ ;  
 $\eta$  – динамическая вязкость воздуха, Па·с;  
 $L$  – высота образца, см.

Средний эквивалентный размер частиц ( $d$ ) рассчитывался по формуле (7):

$$d = \frac{6}{\rho \cdot S_0} \quad (7)$$

где  $\rho$  – плотность материала,  $\text{г}/\text{см}^3$ ;  
 $S_0$  – удельная площадь поверхности,  $\text{см}^2/\text{г}$ .

Подготовка проб включала предварительное высушивание исследуемого материала до постоянной массы при температуре  $105 \pm 5$  °С для удаления адсорбционной влаги, которая может исказить результаты измерений газопроницаемости. Перед загрузкой в кювету порошок гомогенизировался путём перемешивания в течение 5 минут. Навеска порошка массой, рассчитанной сопутствующим программным обеспечением с учётом насыпной плотности материала, помещалась в измерительную кювету. Уплотнение слоя осуществлялось с помощью ручного пресса со строго дозированным усилием для обеспечения постоянной пористости слоя во всех экспериментах. Высота уплотнённого

слоя регистрировалась встроенным датчиком с точностью до 0,01 мм. Площадь поперечного сечения кюветы являлась калиброванной константой прибора.

Определение дзета-потенциала производилось на приборе Malvern Zetasizer Nano ZS (Malvern Instruments, Великобритания). Прибор использует метод электрофоретического рассеяния света (ЭРС) для измерения электрофоретической подвижности частиц в жидкой среде под действием внешнего электрического поля. Так как данный прибор имеет технические ограничения по максимальному размеру частиц измеряемого образца (верхний предел детектирования), предварительно была проведена классификация исходного порошка концентрата. Для измерения дзета-потенциала был выделен класс частиц крупностью «-3 мкм». Для классификации материала использовался лабораторный воздушный классификатор «ГОЛЬФ-2» (Рисунок 5), предназначенный для разделения порошковых материалов по размерам частиц в потоке воздуха.

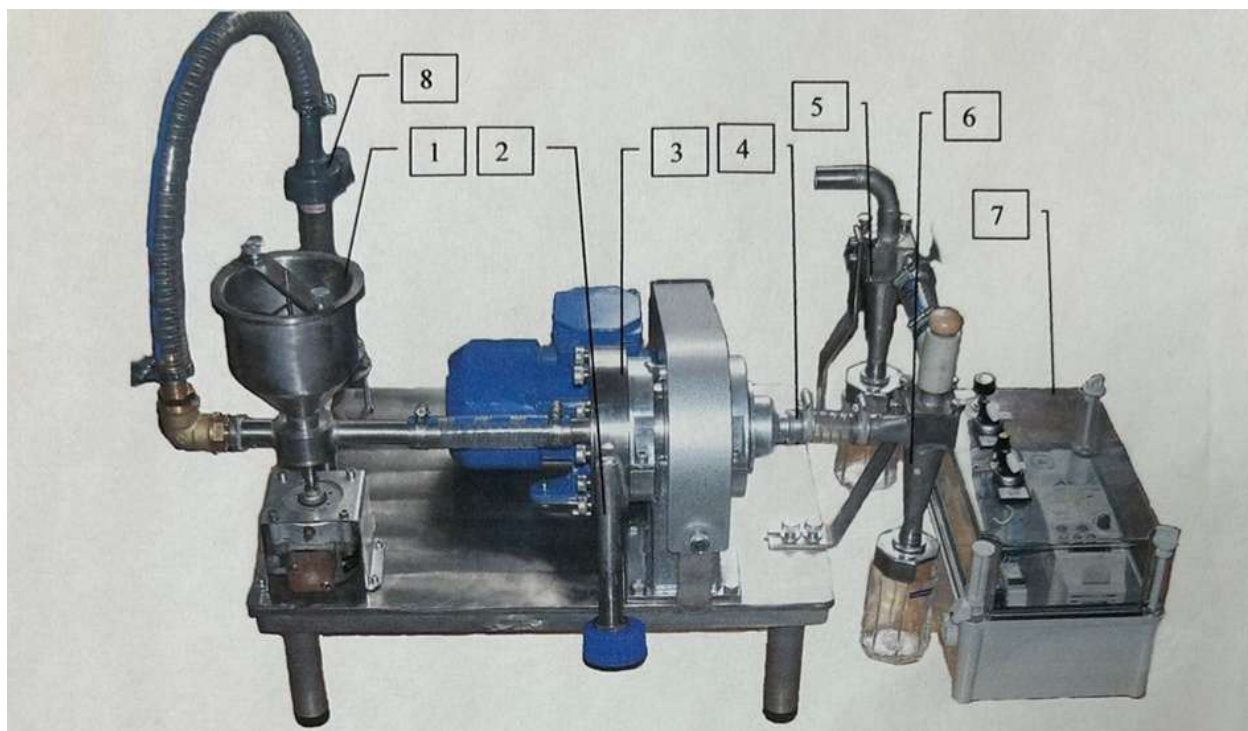


Рисунок 5 – Общий вид классификатора "ГОЛЬФ-2"

1– Бункер питателя; 2– Выход крупной фракции; 3 – Камера классификатора; 4– Выход мелкой фракции; 5 – Первый циклон; 6 – Второй циклон; 7 – Пульт управления; 8 – Ротамер

Далее готовили водную суспензию из образцов магнетита (исходного и модифицированных) в концентрации 10 мг/мл. рН суспензии доводили до значений 9–10 за счет добавления 1%-го раствора NaOH, что соответствовало условиям флотационного обогащения. Суспензия вводилась в кювету прибора для измерения дзета-потенциала (тип кювет DTS 1070). Измерения проводились при температуре 25 °С. Для каждого образца

выполнялось не менее 5 параллельных измерений, результат усреднялся.

Морфология и размерные характеристики порошков после обработки были изучены с помощью растрового электронного микроскопа Tescan Vega 3 (Tescan, Чехия). Метод сканирующей электронной микроскопии (SEM) позволяет получать изображения поверхности с высоким разрешением, фиксируя форму, рельеф и взаимное расположение частиц. Для компенсации поверхностного заряда диэлектрических участков и предотвращения накопления статического электричества, искажающего изображение, образцы покрывали слоем золота (Au) толщиной  $\sim 5$  нм с помощью магнетронного распыления в вакууме. Микроскоп оснащен приставкой рентгеновского микроанализа INCAx-sight (Oxford Instruments), с помощью которой был изучен элементный состав образцов. Данный метод позволяет проводить качественный и полуколичественный анализ распределения химических элементов по поверхности образца.

Для построения распределений по размерам обрабатывали не менее 300 частиц на фотографиях с различным увеличением с использованием программного обеспечения ImageJ. Статистическая обработка изображений позволяла получить гистограммы распределения частиц по эквивалентному диаметру.

Для определения фазовых состояний исходного магнетита был проведен рентгеновский дифракционный анализ (XRD) при комнатной температуре с использованием дифрактометра ДРОН-4 с излучением  $\text{CuK}\alpha$  в диапазоне  $2\theta$  от 20 до 90 градусов. Идентификация фаз проводилась путем сравнения полученных дифрактограмм с данными международной базы JCPDS.

Наличие химических связей и функциональных групп на поверхности частиц до и после обработки были также изучены методами ИК-спектроскопии с помощью приставки нарушенного полного внутреннего отражения на вакуумном ИК-Фурье спектрометре «Vertex 70 v» (Bruker, Германия). Использование приставки НПВО позволило исследовать образцы без сложной подготовки в виде таблеток с KBr. Данные регистрировали в спектральном диапазоне  $400\text{--}4000\text{ см}^{-1}$  при давлении 250 Па с разрешением  $4\text{ см}^{-1}$  и накоплением 100 сканирований на спектр для улучшения отношения сигнал/шум.

Для оценки закрепления реагентов с частицами магнетита использовали метод УФ-видимой спектрофотометрии (UV-mini 1240, Shimadzu, Япония). Оптическую плотность растворов реагентов (pH=9-10) до добавления магнетита измеряли в диапазоне 230-800 нм, после чего в исследуемые растворы добавляли магнетит (50% по массе) и перемешивали в соответствии с режимами. После обработки пробы фильтровали и измеряли оптическую плотность раствора. Разница концентрации до и после погружения образца в раствор использовалась для определения способности к закреплению реагента. Количество

связанного реагента рассчитывали относительно исходной концентрации реагента/смеси реагентов. Для построения калибровочной кривой измеряли поглощение растворов реагентов за счет 8 последовательных разбавлений (1:1) исходного раствора модификатора с рабочей концентрацией. Эксперименты по оценке закрепления реагентов с поверхностью частиц проводились в трех повторах для каждого типа реагента.

Для измерения краевого угла смачивания из порошков магнетита (исходного и модифицированных) были спрессованы таблетки диаметром 10 мм при усилии 5 тонн на квадратный сантиметр с использованием 50-тонного гидравлического прессы (Киевский РМЗ, Украина). Высокое давление прессования обеспечивало получение механически прочных таблеток с минимальной шероховатостью поверхности, что необходимо для корректного измерения угла смачивания. Гидрофильность/гидрофобность полученных образцов оценивали методом измерения краевого угла смачивания по модели «лежачей капли» с использованием оптического тензиометра Easy Drop Kruss (KRÜSS, Германия). В качестве тестовой смачивающей жидкости применяли дистиллированную воду. Объем капли дозировался автоматически и составлял 5 мкл. Измерительная установка оснащена цифровой видеокамерой формата FireWire (IEEE 1394) и программным обеспечением C200SW, что позволяет регистрировать видеоизображение капли и осуществлять автоматизированный анализ геометрических характеристик её профиля в реальном времени по уравнению Юнга-Лапласа. Измерения проводились в нескольких точках поверхности таблетки, результат усреднялся.

Измерения электродного потенциала проводились на портативном многофункциональном исследовательском приборе «ЭЛ-02.06» (изготовитель – научно-производственная фирма «Элнитекс», Россия) принципиальная схема которого представлена на Рисунок 6. Основными функциями прибора являются программное регулирование заданного напряжения на исследуемом объекте в режиме «потенциостат» или заданного тока через исследуемый объект в режиме «гальваностат» и регистрация параметров напряжения, тока и времени исследуемого процесса. В данной работе прибор использовался в режиме «гальваностат» по двухэлектродной схеме. В качестве рабочего электрода служили подготовленные образцы на основе магнетита, электродом сравнения являлся стандартный хлорсеребряный электрод. Электролитом служил раствор фонового состава, соответствующий жидкой фазе пульпы. Для оценки влияния реагентов рабочий электрод помещался в растворы реагентов на 5 минут перед началом измерений для формирования адсорбционного слоя. Регистрация потенциала велась в динамике в течение 600 секунд для оценки кинетики установления равновесия на границе раздела фаз.

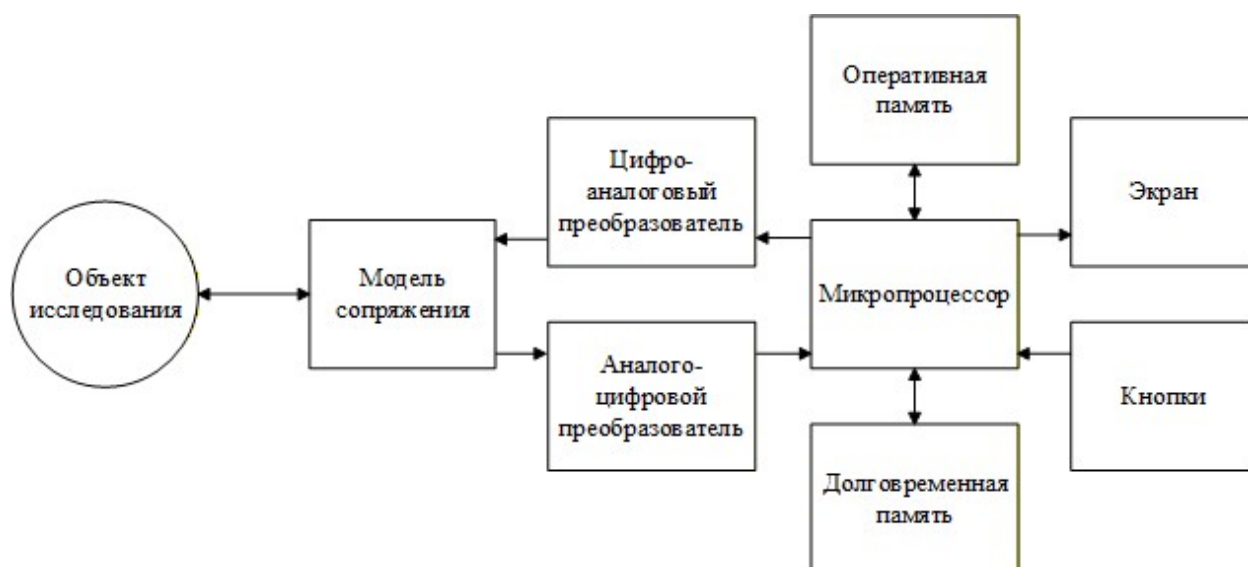


Рисунок 6 – Принципиальная схема прибора «ЭЛ-02.06»

В связи с тем, что основной целью данной работы являлась оптимизация процесса фильтрования железорудного концентрата после флотационного обогащения, то целесообразно отдельно рассмотреть методики исследований на обезвоживание.

## 2.5 Методы и оборудование для исследования процессов обезвоживания

Для проведения тестовых испытаний по осаждению готовятся образцы испытуемых флокулянтов с рабочей концентрацией 0,01 %. Перед началом тестов готовится проба исходного питания с содержанием твердого 200 г/л. Тесты проводятся в цилиндрах объемом 500 мл. В цилиндр набирается проба, добавляется исследуемый реагент в соответствии с режимом обработки и после проба перемешивается. После нескольких перемешиваний наблюдается процесс осаждения твердого с фиксацией по времени прохождения контрольного участка (для определения скорости осаждения), определением высоты осадка (расчет плотности осадка), чистоты получаемого осветленного слоя (производится визуальная оценка). Результаты тестов заносятся в таблицу.

Испытания по определению удельного сопротивления осадка проводили на специальной установке (Рисунок 7), работы которой основана на фильтрации пульпы минерального сырья с применением технологии вакуумной фильтрации, в которой в качестве фильтрующей перегородки используются бумажные фильтры, установленные в воронку Бюхнера. Воронка Бюхнера через уплотнительную герметичную прокладку устанавливается в колбу Бунзена, которая подсоединяется к вакуумному ресиверу (или вакуумному насосу). Подача пульпы в воронку Бюхнера осуществляется

перистальтическим насосом, что обеспечивает постоянство скорости подачи и исключает влияние гравитационного напора.

Объем (масса) испытуемого образца пульпы определяется в зависимости от плотности и крупности материала таким образом, чтобы толщина влажного осадка после фильтрования составляла 4-6 мм. Контроль за точной дозировкой объема (массы) исследуемого образца осуществляется лабораторными весами, на которые установлена колба Бунзена с воронкой Бюхнера. Объем фильтрата, скорость истечения фильтрата, толщина осадка определяются ультразвуковым (УЗ) датчиком расстояния, установленным над поверхностью осадка. Разница давления фильтрации определяется датчиком давления, встроенным в вакуумную линию. Отсчет начала фильтрования ведется с момента открытия электромагнитного клапана, установленного между вакуумным ресивером (насосом) и колбой Бунзена, что обеспечивает синхронизацию начала процесса и записи данных.

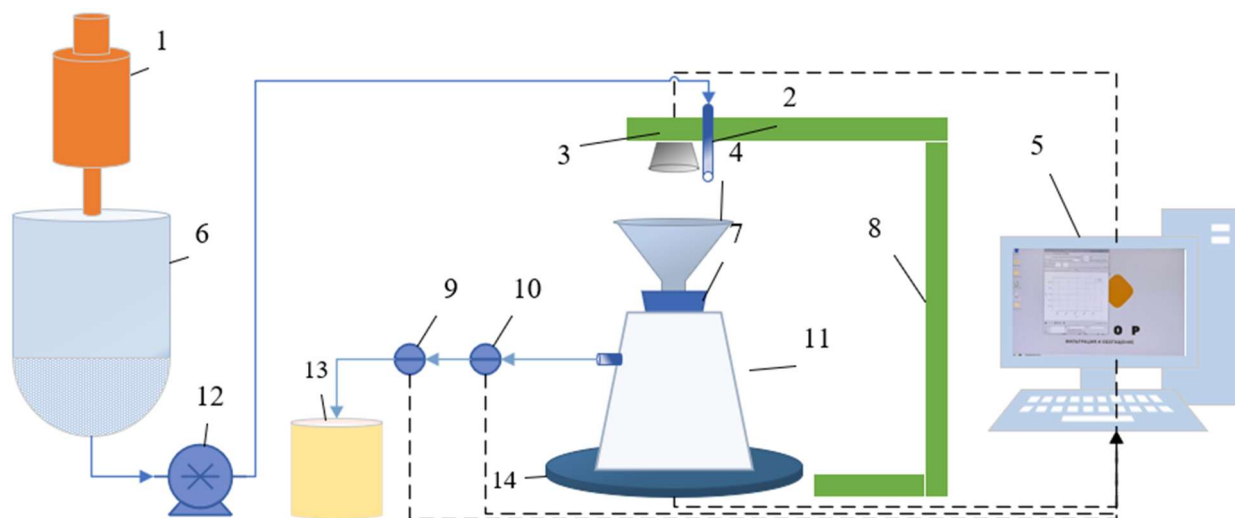


Рисунок 7 – Установка (стенд) для определения удельного сопротивления осадка  
 1 – двигатель с мешалкой; 2 – патрубок подачи суспензии; 3 – УЗ датчик расстояния; 4 –  
 воронка Бюхнера; 5 – ПК с блоком обработки сигналов и данных; 6 – емкость для  
 суспензии; 7 – уплотнение воронки; 8 – штатив; 9 – электромагнитный клапан; 10 –  
 датчик давления; 11 – колба Бунзена; 12 – насос дозирования суспензии; 13 –  
 вакуумный ресивер; 14 – лабораторные весы.

Полученные данные позволили рассчитать удельное объемное сопротивление осадков [18], которое рассчитывалось по основному уравнению фильтрации, интегрированного для условий постоянной разности давлений которое имеет следующий вид:

$$\frac{\tau}{V} = \frac{\mu r X}{2\Delta P F^2} V + \frac{\mu R_{\text{пер}}}{\Delta P F} \quad (8)$$

где  $\tau$  – продолжительность фильтрования, с;  
 $V$  – объем фильтрата, м<sup>3</sup>;  
 $\mu$  – вязкость жидкой фазы суспензии, (Н·с)/м<sup>2</sup>;  
 $r$  – удельное объемное сопротивление слоя осадка, м<sup>-2</sup>;  
 $X$  – объем осадка, образующийся при получении 1 м<sup>3</sup> фильтрата, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  
 $\Delta P$  – разность давлений, Па;  
 $F$  – поверхность фильтрования, м<sup>2</sup>;  
 $R_{\text{пер}}$  – сопротивление фильтровальной перегородки, м<sup>-1</sup>.

В координатах  $\frac{\tau}{V}$  от  $V$  уравнение (8) является уравнением прямой и имеет вид:

$$\frac{\tau}{V} = MV + K \quad (9)$$

где  $M$  – константа фильтрации, характеризующая удельное сопротивление слоя осадка, с/м<sup>3</sup>;  
 $K$  – константа фильтрации, характеризующая сопротивление фильтровальной перегородки, с/м<sup>3</sup>.

Константа  $M$  находилась по графику  $\frac{\tau}{V} = f(V)$ , построенному по экспериментальным точкам, которая равна тангенсу угла наклона этой прямой, далее определялось удельное сопротивление слоя осадка:

$$r = \frac{2M\Delta P F^2}{\mu X} \quad (10)$$

Влияние флотационных реагентов на производительность и влажность получаемого осадка определялось на лабораторной установке «Бакор-тест» (Рисунок 8), которая включает в себя ресивер для сбора фильтрата и вакуумный насос, создающий разрежение до -0,85 бар. К ресиверу подключается керамический фильтрующий элемент, обладающий эффективной площадью фильтрации 0,05 м<sup>2</sup>, через соединительный шланг. Данная установка позволяет моделировать цикл работы промышленного дискового вакуум-фильтра, включая стадии набора осадка, сушки и разгрузки.

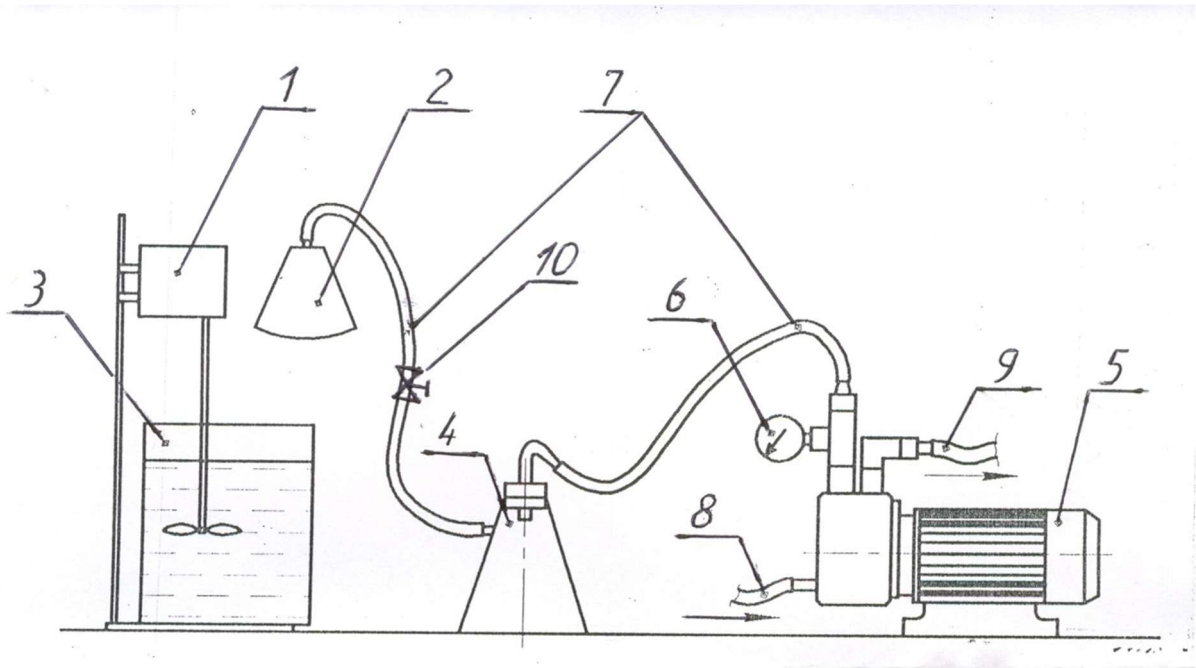


Рисунок 8 – Схема установки «Бакор-тест».

1 – перемешивающее устройство; 2 – фильтрующий элемент; 3 – емкость с суспензией; 4 – ресивер для сбора фильтрата; 5 – вакуум-насос; 6 – вакуумметр; 7 – соединительные шланги; 8 – подвод воды для вакуум-насоса; 9 – выпуск воздуха.

Фильтрующий элемент помещается в суспензию, после чего на заранее установленное время открывается клапан для подачи вакуума, что позволяет накопить осадок. После завершения набора осадка фильтрующий элемент извлекается для сушки потоком воздуха. Затем удаляется осадок, и его масса фиксируется. Полученный осадок подвергается проверке на содержание остаточной влаги в соответствии с ГОСТ 12764-73 [181], а также рассчитывается производительность по массе осадка, времени фильтрации и площади фильтрующего элемента. После каждого теста фильтрующий элемент промывается водой под давлением 1 бар в течение 3-4 секунд, что имитирует процесс обратной промывки.

Определение остаточной влажности осадка проводят согласно ГОСТ 12764-73 «Руды железные, концентраты, агломераты и окатыши. Метод определения влаги» [181]: отбирают представительную пробу, взвешивают и высушивают ее при температуре 105-110 °С до постоянного веса и вновь взвешивают. Полученные данные подставляют в формулу:

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100 \quad (11)$$

где  $m_1, m_2$  – вес соответственно влажного и высушенного осадка, г.

В ходе проведения промышленных испытаний для оперативного контроля остаточной влажности использовался портативный анализатор влажности Sartorius MA35 (Sartorius, Германия) следующим образом: из усредненной пробы отбирался материал в количестве 10–15 г, который помещался на предварительно взвешенное алюминиевое блюдо анализатора. В процессе работы анализатор нагревал образец до 105–110 °С, что способствовало испарению влаги, одновременно автоматически регистрируя вес образца. Сушка образца продолжалась до достижения постоянного значения его массы. После завершения процесса анализа, после подачи звукового сигнала, на дисплей выводились данные о влажности образца.

Контроль производительности промышленных вакуум фильтров выполнялся согласно методике разработанной в ООО «НТЦ «Бакор» который основывается на весовом методе, по которому отбор проб производится специальным пробоотборником, представляющим собой металлический стакан с внутренним диаметром 74 мм и площадью его цилиндра 0,0043 м<sup>2</sup>. Пробы отбираются со всех дисков фильтра и с обеих сторон фильтрующих элементов от геометрического центра ФЭ. Масса проб взвешивается на тарированных весах с абсолютной погрешность 5 г. и по формуле определяется удельная производительность:

$$q = \frac{M \cdot V \cdot 60}{S \cdot n} \quad (12)$$

где  $q$  – удельная производительность фильтра, кг/м<sup>2</sup>·ч;

$v$  – скорость вращения вала, об/мин;

$s$  – площадь пробоотборника, м<sup>2</sup>;

$n$  – количество отобранных проб;

60 – перевод значения кг/м<sup>2</sup>·мин в кг/м<sup>2</sup>·ч.

Исследования эффективности предложенной глубокой регенерации проводились по следующей методике:

1. Определение удельной водопроницаемости демонтированных ФЭ, которое заключается в определении количества воды, подаваемой под давлением 1 бар и проходящей через полость фильтрующего элемента в течение 60 секунд. Далее, учитывая эффективную площадь, производится перерасчет на удельную водопроницаемость по формуле:

$$q = \frac{V \cdot 60 \cdot 1000}{S} \quad (13)$$

Где  $q$  – удельная водопроницаемость, м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·ч;  
 $V$  – объем воды прошедший за 60 секунд, л;  
 $S$  – эффективная площадь фильтрования керамического фильтрующего элемента, м<sup>2</sup>;  
60 – коэффициент для перевода значения в часы;  
1000 – коэффициент перевода значения в м<sup>3</sup>.

2. Глубокая регенерация в два этапа:

2.1 Замачивание в кислотном составе в течение 12 часов и последующая промывка подачей воды в поровое пространство;

2.2 Замачивание в щелочном составе в течение 24 часов и последующая промывка подачей воды в поровое пространство;

3. Определение удельной водопроницаемости после регенерации, при тех же условиях, что и до проведения глубокой регенерации.

### **Глава 3. Установление закономерностей между химическим составом поверхности магнетитового концентрата и детектируемыми физико-химическими свойствами**

#### **3.1. Введение и обоснование выбора комплекса физико-химических методов**

Макроскопические параметры процесса фильтрования, такие как удельная производительность и влажность осадка, являются интегральными показателями, не раскрывающими физико-химическую природу наблюдаемых изменений. Классические теории фильтрования (Дарси, Козени-Кармана) оперируют удельным сопротивлением осадка как константой или функцией давления, однако в стандартном виде не учитывают вариации краевого угла смачивания и толщины двойного электрического слоя, вызванные адсорбцией реагентов. Для ультратонких классов частиц (<10 мкм), преобладающих в флотационных концентратах после доизмельчения, именно поверхностные силы начинают доминировать над гравитационными, определяя структуру порового пространства осадка и гидравлическое сопротивление потоку фильтрата. В связи с этим, интерпретация результатов фильтрационных испытаний без количественной оценки состояния поверхности твердой фазы может привести к ошибочным технологическим выводам.

Для установления достоверных закономерностей между химической модификацией поверхности и фильтрационными характеристиками был сформирован комплекс взаимодополняющих физико-химических методов исследования, результаты которых представлены в Главе 3.

#### **3.2 Характеристика исходного магнетита**

Дифрактограмма исходного концентрата (Рисунок 9) свидетельствует о том, что основной фазой является магнетит со структурой шпинели (JCPDS: №19-0629), пространственная группа  $Fd\bar{3}m$  [182]. На дифрактограмме также присутствуют пики кварца (JCPDS: №85-0794) [183]. Пик при  $33,1^\circ$ , вероятно, соответствует фазе гематита (JCPDS № 33-0664) [184].

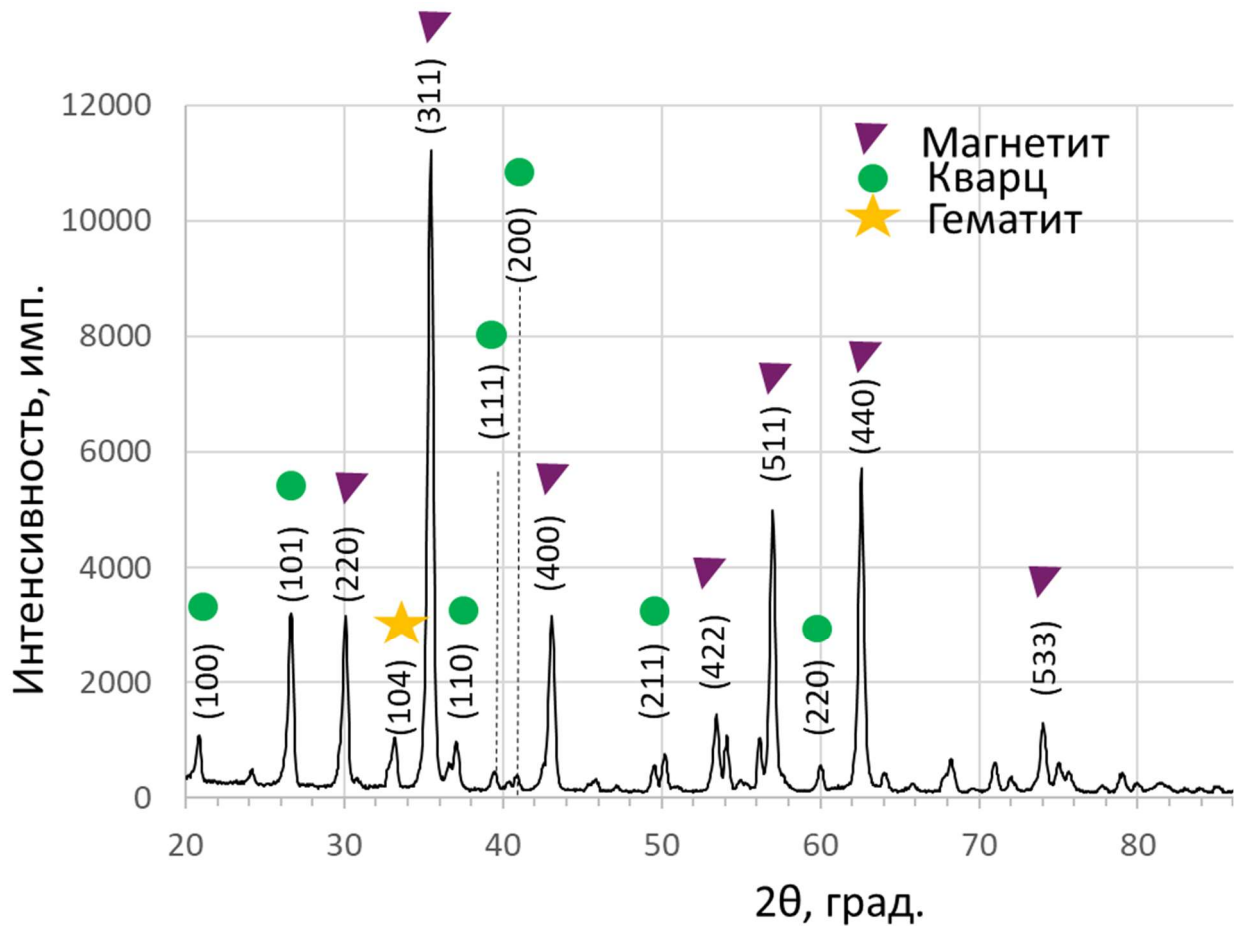


Рисунок 9 – Дифрактограмма порошка железорудного концентрата

Анализ гистограмм распределения, полученных методом лазерной дифракции (Рисунок 10) свидетельствуют о мультимодальном распределении, что объясняется составным характером пробы, сформированной из материалов, отобранных в разное время и прошедших процедуру усреднения. В классическом варианте обычно имеет место моно- или бимодальное распределение частиц по размерам после высокоэнергетического измельчения [185].

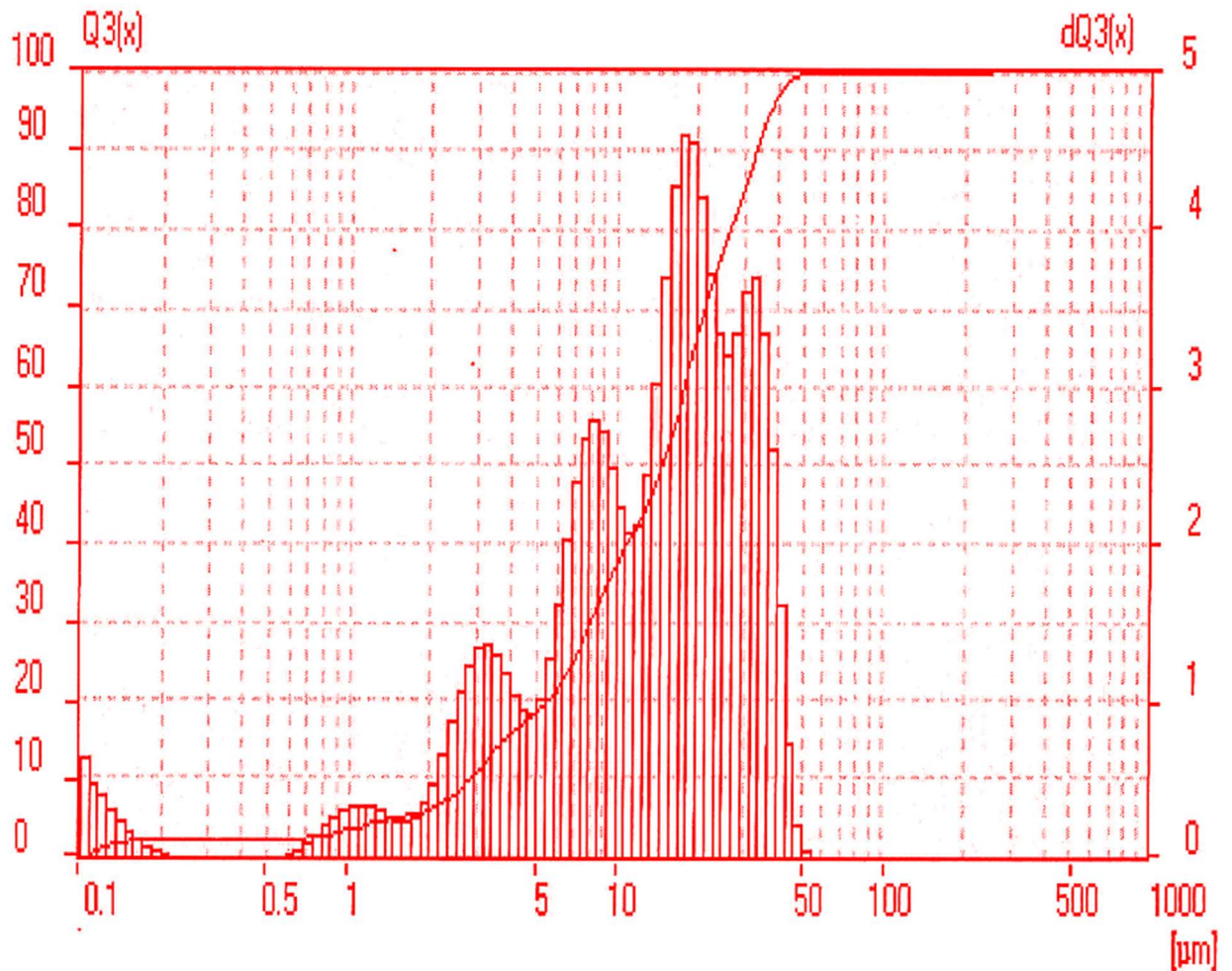


Рисунок 10 – Результаты измерений на лазерном дифрактометре « Fritsch Analysette 22»

Из анализа распределения частиц по классам крупности (Таблица 2) можно сделать вывод о мелкодисперсности данного материала свидетельством чему является нахождение половины всех частиц во фракции менее 15  $\mu\text{m}$ . Распределение частиц по классам крупности является важным технологическим параметром, влияющим на эффективность работы обогатительного оборудования. Данный параметр для исследуемого концентрата явно свидетельствует об ожидаемом уплотнении осадка и соответственно ухудшению фильтруемости. Следует отметить, что в составе присутствуют наночастицы размером менее 200 нм в количестве 2,1 %, значение было определено графическим путем с использованием программного обеспечения ImageJ.

Таблица 2 – Гранулометрический состав исходной пробы флотационного железорудного концентрата

Класс крупности, мкм	Частный выход класса, %	Суммарный выход класса, %	
		по плюсу	по минусу
-63+50	0,05	0,05	100
-50+44	0,76	0,81	99,95
-44+30	14,13	14,94	99,19
-30+25	7,85	22,79	85,06
-25+20	10,89	33,68	77,21
-20+15	16,26	49,94	66,32
-15+10	12,85	62,79	50,06
-10+5	18,92	81,71	37,21
-5+2	12,14	93,85	18,29
-2+1	2,61	96,46	6,15
-1+0	3,54	100	3,54
Итого	100	-	-

Микрофотографии исходного концентрата и полученное из них распределение по размерам (Рисунок 11) показывают, что частицы имеют преимущественно угловатую неправильную форму с характерными признаками хрупкого разрушения материала, что является следствием применения для доводки концентрата высокоэнергетических мельниц бисерного типа. Размер частиц варьируется от 0,1 до 50 мкм. Полученное значение среднего размера частиц (5,1 мкм) в 2-3 раза ниже того значения, которое по классическим представлениям считается благоприятным для обратной катионной флотации магнетита.

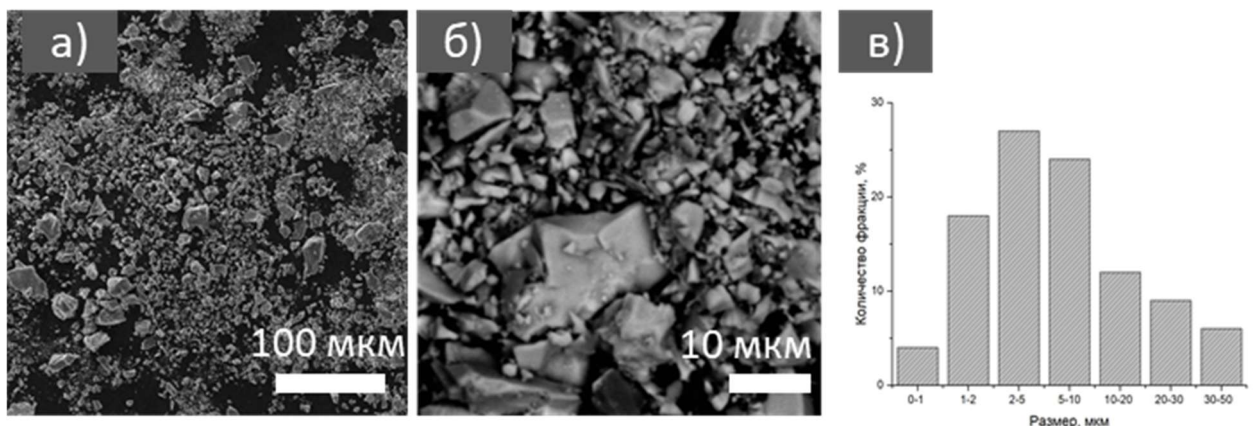


Рисунок 11 – Микрофотографии железорудного концентрата с распределением частиц по размерам

Значение удельной площади поверхности, измеренное методом газопроницаемости, составило  $0,207 \pm 0,021 \text{ м}^2/\text{г}$ . Размер частиц, рассчитанный по формуле (7), составил 5,7 мкм, что подтверждает наличие нанодисперсной фазы в составе образца.

На картах распределения элементов, полученных методом энергодисперсионной спектроскопии (Рисунок 12), кроме железа (69,9 %), кислорода О (27,1 %), и кремния (1,5 %), обнаружено содержание калия в количестве порядка 0,2 % и углерода 1,3 %. Небольшие содержания щелочных металлов характерны для концентратов производства «Михайловского» ГОКа. Основное распределение углерода фиксируется по краям снимка и, вероятно, является фоном от клеевой подложки (канцелярский скотч).

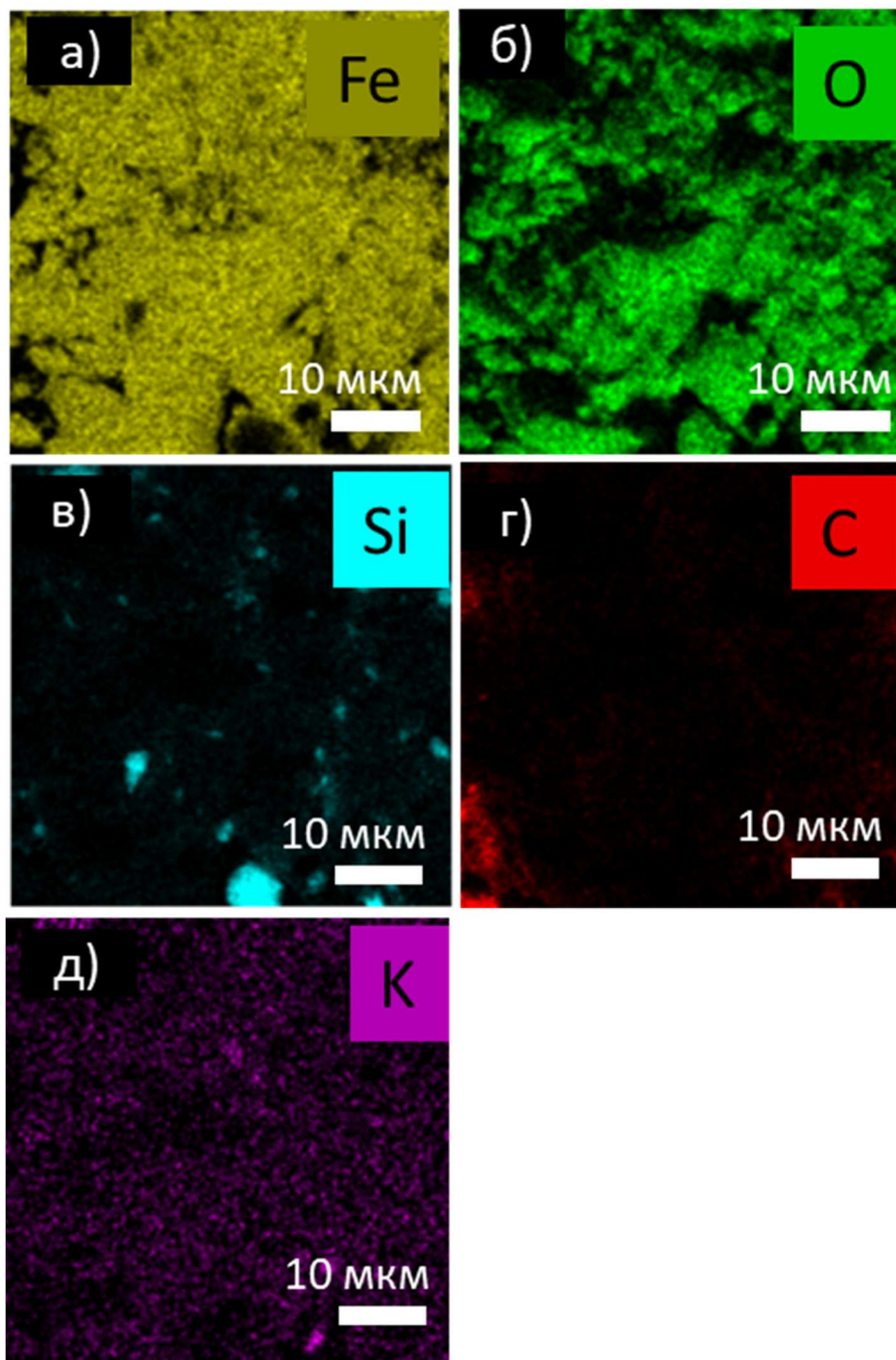


Рисунок 12 – Карты распределения элементов ЭДС  
а – железо, б – кислород, в – кремний, г – углерод, д – калий

При ИК-анализе исходного образца (Рисунок 13) наблюдается острые интенсивные пики на значениях волнового числа  $465\text{ см}^{-1}$  и  $555\text{ см}^{-1}$ . Эти полосы характерны для магнетита - основные колебания Fe-O [186; 187]. Были обнаружены пики Si-O-Si ( $1080\text{ см}^{-1}$  и  $798\text{ см}^{-1}$ ) и Si-OH ( $960\text{ см}^{-1}$  и  $1630\text{ см}^{-1}$ ) [188; 189], что свидетельствует о присутствии кремнезема и является характерным для железных руд. Отсутствие выраженных пиков в области  $2800\text{-}3600\text{ см}^{-1}$  свидетельствует о низком содержании гидроксильных групп/адсорбированной воды, а также отсутствии органических соединений. Спектр является характерным для неокисленной железной руды (неокисленных железистых кварцитов) с преобладанием магнетита как основного рудного минерала.

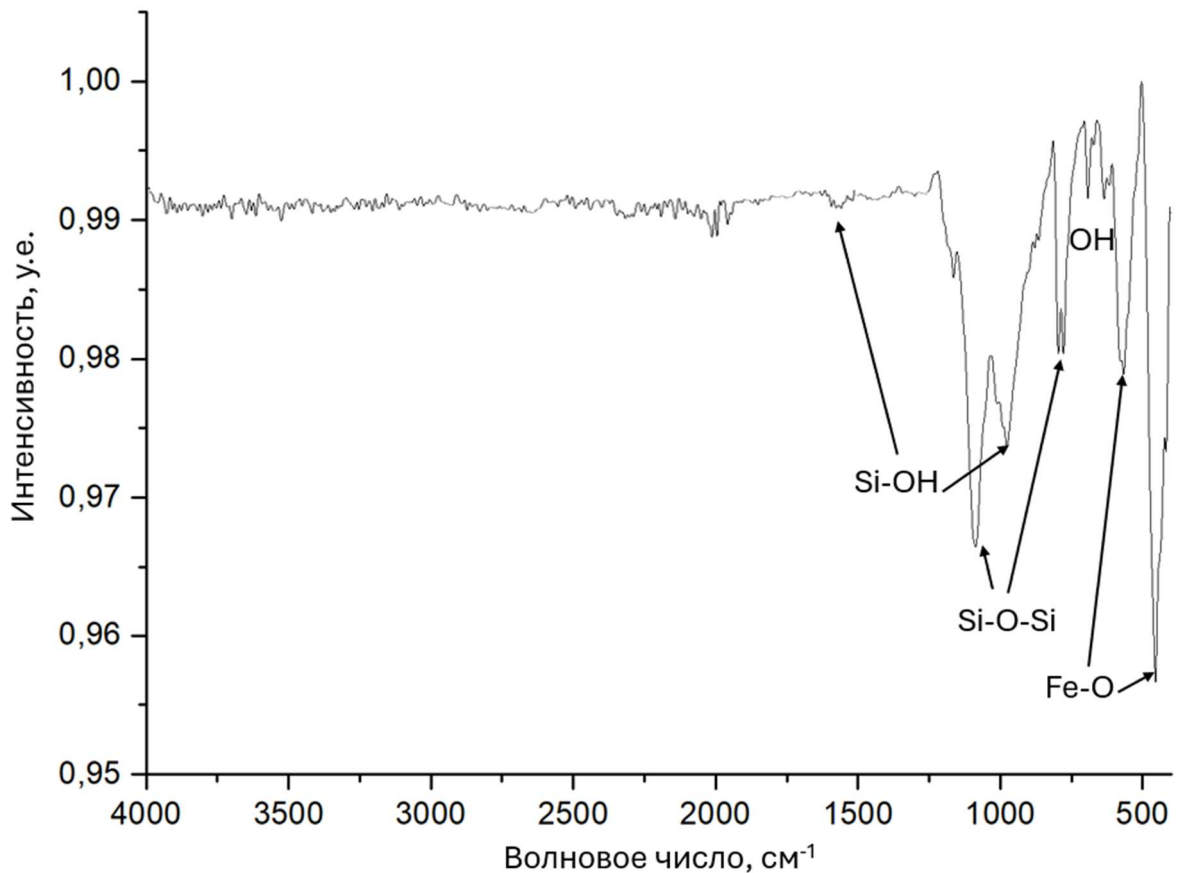


Рисунок 13 – ИК-спектр исходного порошка железорудного концентрата

Стоит отметить, что значительное влияние на значения измеренного краевого угла смачивания могут влиять как химические свойства, так и физические свойства, такие как шероховатость поверхности и распределение пор на испытуемых образцах [190; 191]. При взаимодействии капли воды с поверхностью порошкового слоя происходит распределение капли и ее впитывание, за счет проникновения в поры образца через промежутки между частицами. Полное впитывание капли происходило через 3-4 секунды.

Значения краевого угла смачивания для таблеток, спрессованных из исходного порошка железорудного концентрата, составил  $22,7 \pm 1,1^\circ$  (Рисунок 14), что хорошо согласуется с литературными данными [192] и говорит о том, что исходный образец магнетита обладает гидрофильными свойствами, это обусловлено природой оксидов железа: поверхность магнетита в водной среде гидратирована и покрыта слоями гидроксильных групп ( $\equiv\text{Fe-OH}$ ), которые активно образуют водородные связи с молекулами воды.

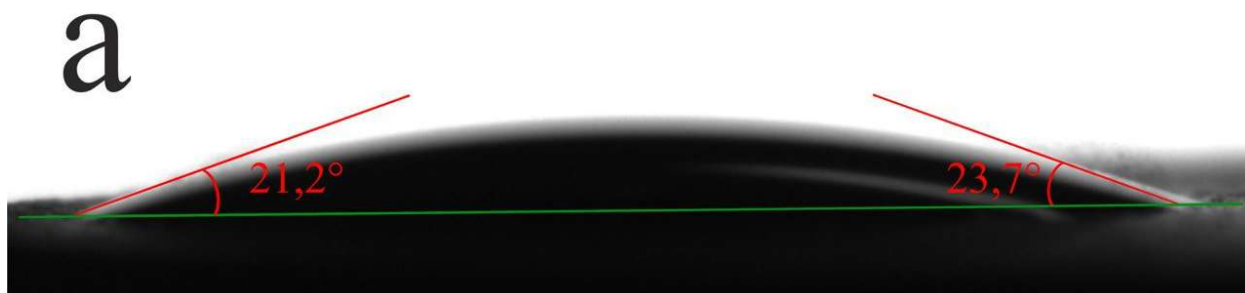


Рисунок 14 – Краевой угол смачивания образца из исходного магнетитового концентрата

Отрицательное значение дзета-потенциала (-13,7 мВ) при рН 9–10 согласуется с литературными данными [193–195]. В щелочной среде происходит диссоциация поверхностных гидроксильных групп по кислотному типу ( $\equiv\text{Fe-OH} \rightarrow \equiv\text{Fe-O}^- + \text{H}^+$ ), что приводит к преобладанию отрицательного заряда на поверхности. Это создает электростатический барьер отталкивания между частицами, препятствующий их коагуляции. Однако модуль потенциала (-13,7 мВ) не является критически высоким, что допускает возможность агрегации частиц под действием сил Ван-дер-Ваальса, особенно в присутствии электролитов или полимеров.

Такое сочетание обеспечивает естественную склонность частиц к формированию проницаемых агрегатов, однако наличие ультратонких классов в реальном концентрате требует дополнительной модификации для эффективного обезвоживания, так как тонкие пленки воды удерживаются в микропорах за счет капиллярных сил.

### 3.3 Влияние флотационных реагентов и полимерных добавок на химический состав поверхности

При различных вариантах обработки реагентами ни один из режимов не привел к существенным изменениям в морфологии частиц, при этом химический состав поверхности образцов значительно меняется. Режим 2 подразумевал обработку частиц гидролизированным крахмалом (Д), являющимся депрессором магнетита в концентрациях близким к

технологическим ( $C=900$  мг/л, время контактирования 5 мин, перемешивание). В сравнение с исходным порошком магнетита было показано, что обработка «Д» повышает содержание углерода (С) в образце (Таблица 3), что свидетельствует о его адсорбции на поверхность. Обработка собирателем 3-(изодецилокси)пропиламином (Ам), являющимся собирателем кремнезема (Режим 3,  $C=300$  мг/л, время контактирования 5 мин, перемешивание) приводит к появлению в составе азота (N), равномерно распределенного по поверхности частиц, и также повышенное содержание углерода относительно исходного образца. При последовательной обработке декстрином и амином (Режим 4,  $C_{\text{декстрин}}= 900$  мг/л, перемешивание в течение 5 минут, добавление  $C_{\text{амин}}= 300$  мг/л, перемешивание в течение 5 минут), количество азота несколько снижается, при этом количество углерода возрастает, что может свидетельствовать о формировании более плотного органического слоя на поверхности частиц. Стоит также отметить, что теоретический состав магнетита содержит FeO (31,03 %) и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (68,97%), что в пересчете на содержание Fe<sub>общ</sub> (72,36 %) и O<sub>общ</sub> (27,64 %) дает массовое соотношение 2,62, что хорошо согласуется с экспериментальными данными. При этом обработка реагентами (за исключением декстрина), приводит к росту относительной доли кислорода, что уменьшает соотношение [Fe]/[O]. Стоит отметить, что определение точного содержания углерода в составе образцов не представляется возможным из-за наличия фонового сигнала от углеродного скотча, тем не менее ЭДС анализ свидетельствует о повышении плотности сигнала от углерода на поверхности частиц магнетита.

Таблица 3 – Атомный состав для исходного и модифицированного магнетитового концентрата, определенный методом ЭДС

№	Обозначение	Концентрация элемента, ат.%							[Fe]/[O]
		[Fe]	[O]	[Si]	[C]	[K]	[N]	[Ca]	
1	Исх.	69,9	27,1	1,5	1,3	0,2			2,6
2	Д	69,6	26,3	1,5	2,4	0,1	-	0,1	2,6
3	Ам	64,5	27,5	1,6	5,2	0,2	0,9	0,1	2,3
4	Д+Ам	63,9	27,5	1,5	6,6	0,2	0,2	0,1	2,3
5	Д+Ам+Р(А)	65,2	26,5	1,3	6,7	0,1	0,1	0,1	2,5
6	Д+Ам+Р(К)	56,0	29,4	2,1	10,9	0,2	1,2	0,2	1,9

На представленных ИК-спектрах (Рисунок 15) исходного магнетита (1) и после модификации (2-6). Появление пиков в области 2800-3000 см<sup>-1</sup> соответствует углеводородным группам, в то время как широкий пик с максимумом 3400 см<sup>-1</sup> относится к гидроксильным группам/адсорбированной воде. Появление данных пиков свидетельствуют о сорбции органических реагентов на поверхность частиц магнетита.

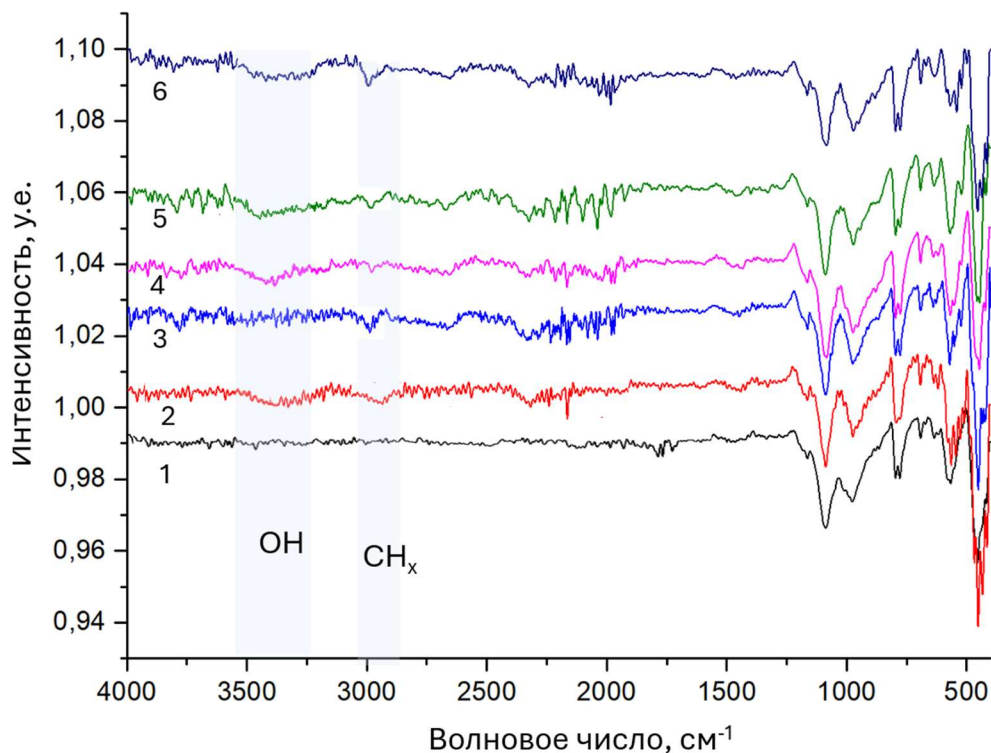


Рисунок 15 – ИК-спектры исходного порошка магнетита (1) и модифицированных реагентами образцов (2-6)

Определение закрепление реагентов с поверхностью частиц магнетита оценивали спектрофотометрически. Пик поглощения гидролизованного декстрина (900 мг/л) находился на длине волны 282 нм, для амина (300 мг/л) 278 нм (Рисунок 16). Спектры анионного и катионного реагентов не приведены в связи с их низкой рабочей концентрацией (30 мг/л). Процент закрепления гидролизованного декстрина при режиме обработки 2 составил  $25,5 \pm 5,7\%$ . Режим обработки 3 привел к 100% переходу амина из жидкой фазы. При обработке смесью реагентов на режимах 4-6 количество сорбированных реагентов определялось относительно оптической плотности обрабатываемой смеси, и было установлено как  $41,4 \pm 3,7\%$ ,  $54,8 \pm 5,9\%$  и  $63,4 \pm 2,5\%$ , соответственно. Было показано, что увеличение компонентов смеси приводит к большему количеству сорбированных реагентов на поверхность частиц. Меньшая загрузка при режиме 4 может обуславливаться ростом суммарной концентрации реагентов (900 мг/л Д + 300 мг/л Ам), добавление анионного реагента, вероятно, способствует формированию более отрицательно-заряженного слоя на поверхности частиц, таким образом уменьшая количество сорбированных реагентов. При этом, стоит отметить уменьшение загрузки реагентов при добавлении катионного реагента. Данные ЭДС анализа свидетельствует об увеличении содержания азота и углерода в составе, однако глубина ЭДС анализа составляет примерно

1 мкм. Вероятно, при добавлении катионного реагента происходит более быстрая агломерация частиц, таким образом уменьшается удельная площадь поверхности, что влияет на суммарное закрепление на поверхности частиц. При этом растет содержание органических соединений непосредственно на поверхности агломератов.

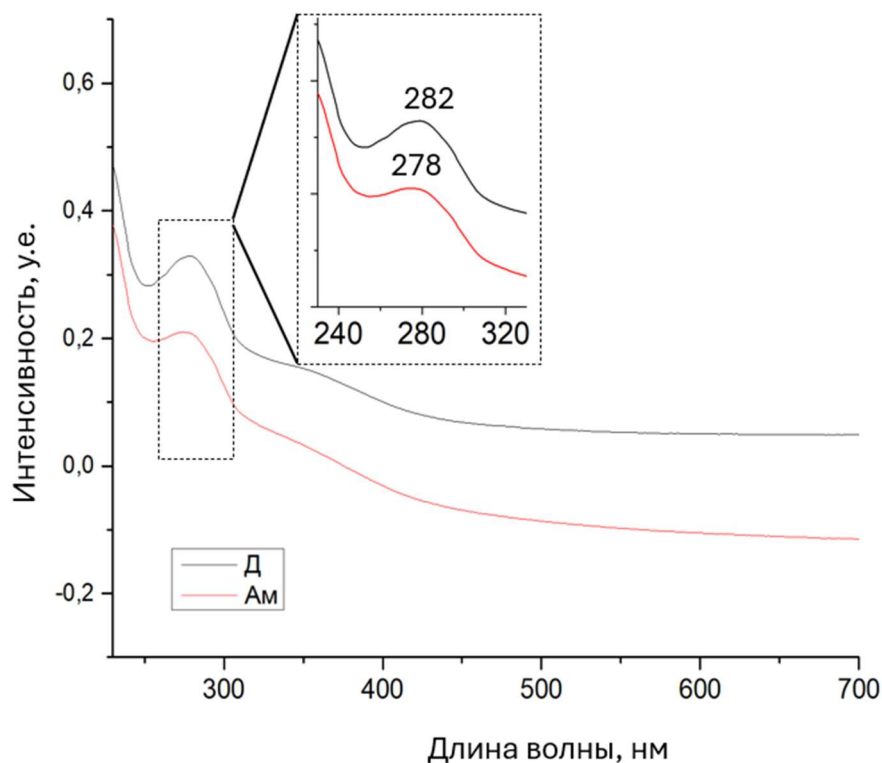


Рисунок 16 – спектры поглощения гидролизованного декстрина (Д) и амина (Ам)

### 3.4 Влияние флотационных агентов и полимерных добавок на физические свойства поверхности

Результаты измерений краевого угла смачивания и дзета-потенциала систематизированы в Таблица 4, изменения электродного потенциала представлены на Рисунок 17.

Таблица 4 – Значения краевого угла смачивания и дзета-потенциала для исходного и модифицированного магнетитового концентрата

№	Обозначение	Значение краевого угла смачивания, °	Значение дзета-потенциала, мВ
1	Исх.	$22,7 \pm 1,1$	$-13,7 \pm 0,3$
2	Д	$30,0 \pm 1,3$	$-17,5 \pm 0,5$
3	Ам	$34,2 \pm 1,0$	$-8,7 \pm 0,8$
4	Д+Ам	$30,7 \pm 0,9$	$-15,6 \pm 0,4$
5	Д+Ам+Р(А)	$30,5 \pm 0,9$	$-17,2 \pm 0,4$
6	Д+Ам+Р(К)	$27,1 \pm 1,2$	$-8,5 \pm 0,9$

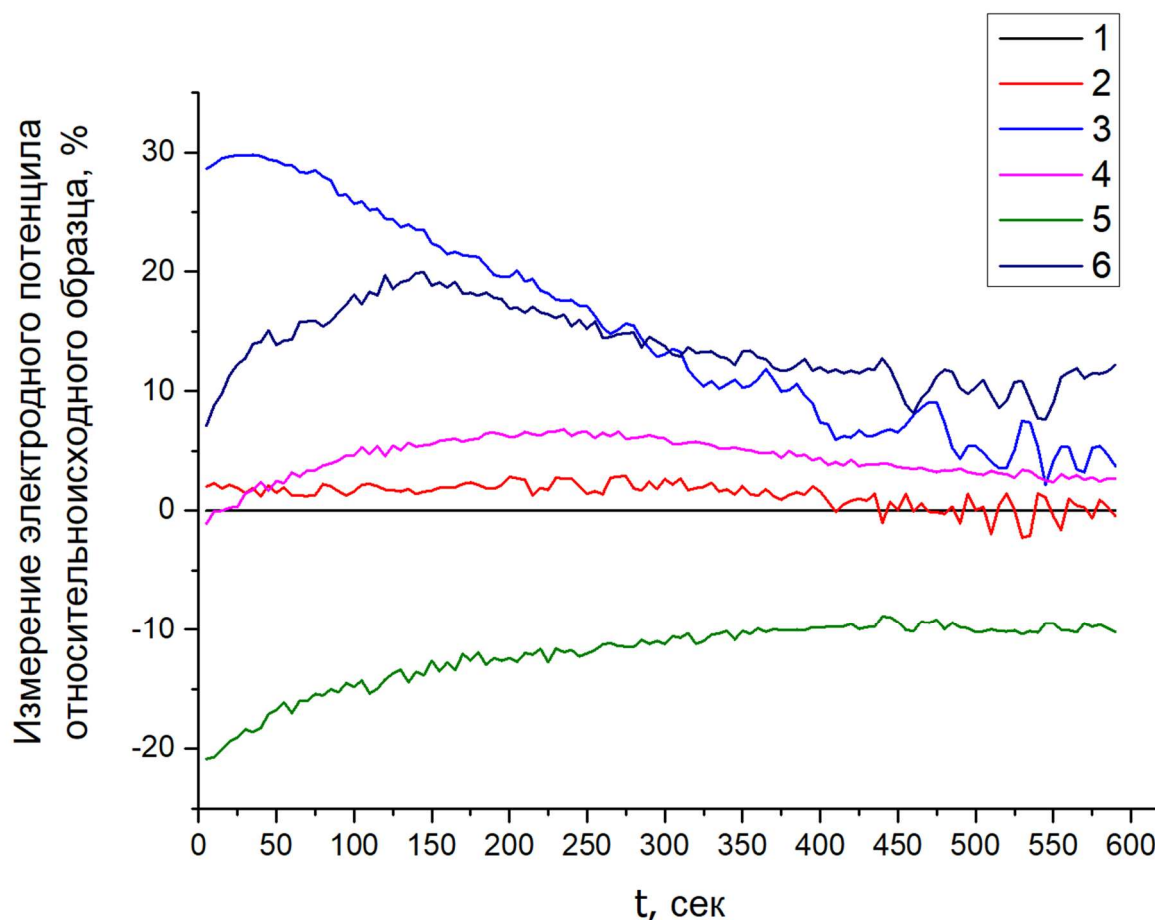


Рисунок 17 – Изменение электродного потенциала магнетитовых электродов после выдержки в растворах с модификаторами (2 - Д; 3 – Ам; 4 – Д+Ам; 5 - Д+Ам+Р(А); 6 - Д+Ам+Р(К)), нормированных на значение электродного потенциала исходного магнетита (1)

Ожидалось, что декстрин сохранит или усилит смачиваемость поверхности, однако экспериментально зафиксировано увеличение краевого угла смачивания до  $30,0^\circ$ . Несмотря на то, что декстрин является гидрофильным полимером, его адсорбция может приводить к структурным изменениям в приповерхностном слоях воды. Увеличение отрицательного значения дзета-потенциала (до  $-17,5$  мВ) свидетельствует о диссоциации адсорбированных гидроксильных групп полисахарида. Механизм адсорбции декстрина на магнетите в щелочной среде обусловлен специфической хемосорбцией посредством образования координационных связей между гидроксильными группами полисахарида и поверхностными атомами железа, а также водородных связей между гидроксильными группами декстрина и поверхностными гидроксильными группами или атомами кислорода на поверхности магнетита. Образующийся полимерный слой усиливает электростатическое отталкивание между частицами, способствуя пептизации тонких фракций и их стабилизации. С технологической точки зрения, это негативно сказывается на скорости

осаждения и фильтрации, так как не агрегированные частицы приводят к кольматации пор фильтрующей перегородки и в самом осадке, что приводит к низкой проницаемости. Электродный потенциал показывает слабую динамику: незначительный положительный сдвиг в начале (+2 %) сменяется около нулевыми значениями.

Обработка катионным собирателем (3-(изодецилокси)пропиламин) приводит к наиболее значимым изменениям. Зафиксировано максимальное увеличение краевого угла смачивания до  $34,2^\circ$  (Рисунок 18). Визуально форма капли на поверхности прессованного порошка становится более сферической, что подтверждает рост гидрофобности, но в целом поверхность остается гидрофильной (краевой угол смачивания менее  $50^\circ$ ).

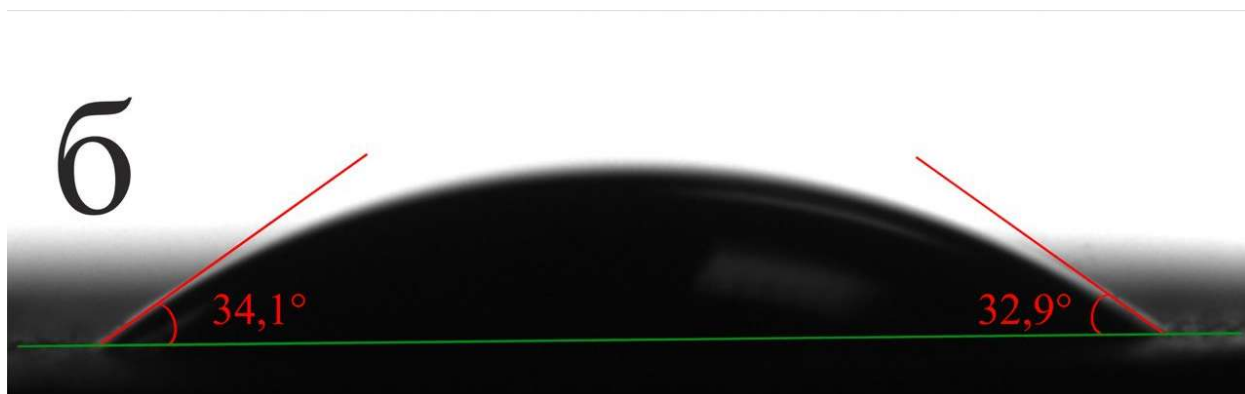


Рисунок 18 – Краевой угол смачивания образца обработанного амином

Хотя амин предназначен для флотации кварца, часть реагента может адсорбироваться на магнетите вследствие неидеальной селективности, которая приводит к адсорбции на не занятых декстрином активных центрах поверхности. Длинная углеводородная цепь ( $C_{10}$ – $C_{12}$ ) экранирует гидрофильные участки оксида железа, обращаясь гидрофобными хвостами в раствор. Снижение модуля дзета-потенциала (до  $-8,7$  мВ) указывает на частичную компенсацию отрицательного заряда поверхности катионными группами аммония ( $R-NH_3^+$ ). Механизм адсорбции включает электростатическое взаимодействие положительно заряженных аммониевых групп с отрицательно заряженными центрами на поверхности магнетита. Электродный потенциал демонстрирует высокий положительный сдвиг (+28 % на 5-й секунде), указывающий на интенсивное электрохимическое взаимодействие и быструю кинетику адсорбции. Несмотря на снижение заряда (что теоретически должно способствовать коагуляции), частичная гидрофобизация поверхности аминами способствует образованию агрегатов с «закрытыми» порами. В таких агрегатах вода удерживается за счет капиллярных сил в гидрофобных полостях, что снижает скорость фильтрации и увеличивает остаточную влажность.

При последовательном введении депрессора и собирателя, что моделирует реальный технологический цикл обратной флотации, наблюдается конкурентная адсорбция. Краевой угол ( $30,7^\circ$ ) и дзета-потенциал ( $-15,6$  мВ) занимают промежуточные значения между режимами 2 и 3. Это указывает на то, что декстрин экранирует активные центры поверхности, препятствуя адсорбции амина. Однако совокупный эффект сохраняет тенденцию к стабилизации суспензии. Отрицательный заряд создает энергетический барьер, способствует плотной упаковке частиц в осадке. Это может негативно повлиять на фильтруемость флотационных концентратов по сравнению с концентратами чистой магнитной сепарации.

Для нивелирования негативного влияния флотационных реагентов были исследованы два типа полиэлектролитов, различающихся по знаку заряда макромолекулы: высокомолекулярного полиэлектролита со средним анионным зарядом на основе акриламида и акрилата натрия (Реагент А) и полимерный коагулянт имеющий катионный характер с высокой плотностью заряда на основе полидиаллилдиметиламмония хлорида (Реагент К). Выбор этих реагентов обусловлен необходимостью проверки гипотезы о компенсации заряда как ключевом факторе улучшения фильтрации.

Добавление Реагента А к флотационному концентрату (режим 5) не оказало существенного влияния на смачиваемость (краевой угол  $30,5^\circ$ ), однако усилило отрицательное значение дзета-потенциала до  $-17,2$  мВ. Это объясняется адсорбцией отрицательно заряженных групп полиакриламида на поверхности частиц. В условиях, когда поверхность уже имеет отрицательный электрокинетический потенциал (благодаря декстрину и природе магнетита при рН 9–10). Электродный потенциал фиксирует устойчивый отрицательный сдвиг (от  $-20\%$  до  $-10\%$  относительно исходного образца).

Реагент К (режим 6) демонстрирует более благоприятное сочетание изменения поверхностных свойств, по сравнению с Реагентом А. Дзета-потенциал снижается по модулю даже ниже, чем у исходного образца (до  $-8,5$  мВ). Это свидетельствует об эффективной нейтрализации отрицательного заряда катионными группами полимера. Снижение электростатического отталкивания должно способствовать коагуляции и формированию агрегатов. Механизм взаимодействия здесь преимущественно электростатический: положительно заряженные группы полидиаллилдиметиламмония притягиваются к отрицательным участкам поверхности (декстрин, оксиды железа). Краевой угол смачивания уменьшается до  $27,1^\circ$  по сравнению с режимом 4 имитирующем флотацию. Предположительно, катионный полимер вытесняет или экранирует гидрофобные радикалы амина, восстанавливая способность поверхности к смачиванию водой. Наблюдается положительный сдвиг электродного потенциала с тенденцией к росту

во времени (от +7% до +20% относительно исходного магнетита). Динамика роста потенциала указывает на то, что адсорбция катионного полимера является процессом, развивающимся во времени, возможно, включающим переориентацию макромолекул на поверхности.

### Выводы к главе 3

По результатам проведенных исследований поверхностных свойств магнетитового концентрата сформулированы следующие выводы:

1. Установлены базовые физико-химические характеристики исходного магнетитового концентрата. Поверхность частиц исходного концентрата обладает выраженными гидрофильными свойствами (краевой угол смачивания  $22,7 \pm 1,1^\circ$ ) и отрицательным зарядом в щелочной среде (дзета-потенциал  $-13,7 \pm 0,3$  мВ при pH 9–10). Фазовый состав представлен преимущественно магнетитом с примесями кварца и гематита. Высокая дисперсность материала (50 % частиц менее 15 мкм) и развитая удельная поверхность ( $0,207 \pm 0,021$  м<sup>2</sup>/г) создают предпосылки к повышенному капиллярному удержанию влаги;

2. Показано, что последовательное введение депрессора (декстрина) и собирателя (амин) приводит к существенной модификации поверхности частиц магнетита. Декстрин адсорбируется посредством водородных связей и координационного взаимодействия с атомами железа, увеличивая дзета-потенциал до  $-17,5 \pm 0,5$  мВ и создавая стерический барьер, что затрудняет агрегацию тонких фракций в объеме суспензии. Амин адсорбируется электростатически на незанятых декстрином участках повышая краевой угол смачивания до  $34,2 \pm 1,0^\circ$ . Совместное действие данных реагентов формирует устойчивый адсорбционный слой, затрудняющий агрегацию тонких частиц ухудшающий водоотдачу осадка за счет роста капиллярного удержания влаги в более мелких порах.

3. При добавлении Реагента А флокуляция происходит только за счет мостикового механизма за счет физической адсорбции и электростатически на ограниченных участках, где заряд поверхности локально скомпенсирован ионами металлов из жидкой фазы суспензии и связывании нескольких частиц макромолекулой полиэлектролита. В следствии чего его влияние на поверхностные свойства минимально.

4. Реагент К демонстрирует более благоприятное влияние на поверхностные свойства: Дзета-потенциал снижается по модулю даже ниже, чем у исходного образца (до -8,5 мВ). Снижение электростатического отталкивания должно способствовать коагуляции и формированию агрегатов. Механизм взаимодействия здесь преимущественно

электростатический: положительно заряженные группы полидиаллилдиметиламмония хлорида притягиваются к отрицательным участкам поверхности (декстрин, оксиды железа). Данные свойства должны способствовать образованию более проницаемого осадка и, как следствие, к улучшению фильтрационных свойств.

5. Количественно оценена загрузка реагентов на поверхность частиц магнетита. Методом УФ-видимой спектрофотометрии установлено, что индивидуальная адсорбция гидролизованного декстрина и амина составляет  $25,5 \pm 5,7$  % и 100 %, соответственно. Разность в загрузке объясняется как различием в концентрации исходных растворов (С(Д) 900 мг/л, С(Ам) 300 мг/л), так и увеличением сорбции положительно-заряженных соединений на отрицательно-заряженную поверхность магнетита за счет влияния электростатических сил. При совместном применении реагентов (режимы флотации и интенсификации) наблюдается увеличение суммарной загрузки с  $41,4 \pm 3,7$  % до  $63,4 \pm 2,5$  % по мере усложнения схемы обработки, что указывает на синергетическое влияние реагентов на процесс сорбции и вероятное формирование многослойных покрытий реагентов за счет электростатических взаимодействий между анионными и катионными компонентами в системе. Данные элементного анализа (EDS) подтверждают увеличение содержания углерода и азота на поверхности модифицированных образцов, коррелирующее с режимами обработки.

## **Глава 4. Исследование фильтрационных свойств магнетитового концентрата при различных реагентных обработках**

Эффективность процесса вакуумной фильтрации железорудных концентратов определяется не только макроскопическими параметрами (гранулометрический состав, плотность пульпы), но и фундаментальными физико-химическими характеристиками поверхности твёрдой фазы. В разделе 3 было установлено, что реагенты обратной катионной флотации (декстрин и амин) формируют на поверхности частиц магнетита устойчивый адсорбционный слой, который изменяет электрокинетический потенциал и смачиваемость. Данные изменения напрямую влияют на капиллярное давление в порах осадка и его проницаемость.

Целью данной главы являлось количественное описание влияния выявленных в Главе 3 изменений поверхностных свойств на фильтрационные характеристики концентрата, а также определение оптимальных дозировок реагентов-интенсификаторов для нивелирования негативного эффекта флотационных реагентов.

### **4.1 Исследование влияния флотационных реагентов на производительность и влажность получаемого осадка**

Для количественной оценки влияния реагентных режимов обратной катионной флотации на технологические показатели обезвоживания был проведён цикл экспериментов на лабораторной установке «Бакор-тест», моделирующей промышленный процесс вакуумной фильтрации на керамических дисковых фильтрах. В качестве фильтрующей перегородки использовались керамические ФЭ производства ООО «НТЦ «Бакор» с водопроницаемостью  $5,5\text{--}6,5 \text{ м}^3/(\text{м}\cdot\text{ч})$  и средним размером пор  $1,8\text{--}2,4 \text{ мкм}$ .

В ходе экспериментов варьировались дозировки основных реагентов технологической схемы: Декстрина и Амина. Оценка эффективности осуществлялась по двум критериям: изменению удельной производительности, отнесенной к режиму без реагентов и остаточной влажности получаемого осадка фильтрования.

Результаты экспериментальных исследований систематизированы в Таблица 5, позволяющей провести сравнительный анализ влияния индивидуальных и комбинированных режимов дозирования реагентов.

Таблица 5 – Влияние реагентных режимов обратной катионной флотации на фильтрационные характеристики магнетитового концентрата

Реагент	Расход, г/т	Толщина осадка, мм	Изменение производительности, %	Остаточная влажность, %
Декстрин	0	10,9±0,1	0	9,8 ± 0,2
	60	10,8±0,1	-1 ± 1	9,7 ± 0,1
	300	10,4±0,2	-4 ± 2	9,7 ± 0,1
	600	8,5±0,3	-22 ± 3	9,0 ± 0,2
	900	5,4±0,2	-51 ± 4	7,8 ± 0,3
	1200	4,0±0,2	-63 ± 5	8,3 ± 0,2
Амин	0	11,2±0,1	0	10,0 ± 0,2
	9	10,5±0,2	-6 ± 2	10,1 ± 0,1
	45	9,8±0,2	-13 ± 2	10,1 ± 0,1
	90	9,3±0,3	-17 ± 3	10,1 ± 0,2
	135	8,2±0,3	-27 ± 4	9,9 ± 0,2
	180	8,7±0,3	-35 ± 4	9,6 ± 0,2
Декстрин + Амин	0+0	11,5±0,2	0	10,0 ± 0,3
	60+9	11,3±0,1	-2 ± 1	10,5 ± 0,2
	300+45	9,2±0,3	-20 ± 3	10,4 ± 0,2
	600+90	7,9±0,3	-32 ± 4	9,3 ± 0,2
	900+135	5,8±0,3	-49 ± 5	8,2 ± 0,3
	1200+180	5,1±0,3	-68 ± 6	7,7 ± 0,3

Для наглядной иллюстрации выявленных закономерностей построены три графические зависимости, отражающие влияние индивидуальных реагентов и их комбинации на фильтрационные показатели.

Анализ данных, представленных на (Рисунок 19), указывает на нелинейную зависимость фильтрационных характеристик от концентрации депрессора. При дозировках до 300 г/т снижение производительности не превышает 4 %, что близко к значениям доверительного интервала измерений. Однако при превышении порогового значения 300 г/т наблюдается экспоненциальное падение производительности (до -63 % при 1200 г/т). Снижение влажности осадка при высоких дозировках декстрина (до 7,8 % при 900 г/т) является следствием уменьшения толщины осадка: за фиксированное время цикла формируется тонкий слой, который более эффективно обезвоживается.

Снижение производительности объясняется механизмом установленным в Главе3: образующийся полимерный слой на поверхности магнетита обладает стерическим фактором отталкивания, который способствует пептизации тонких фракций и их стабилизации. При фильтровании не агрегированные частицы приводят к коагуляции пор фильтрующей перегородки и в самом осадке, что приводит к низкой проницаемости и снижению производительности.

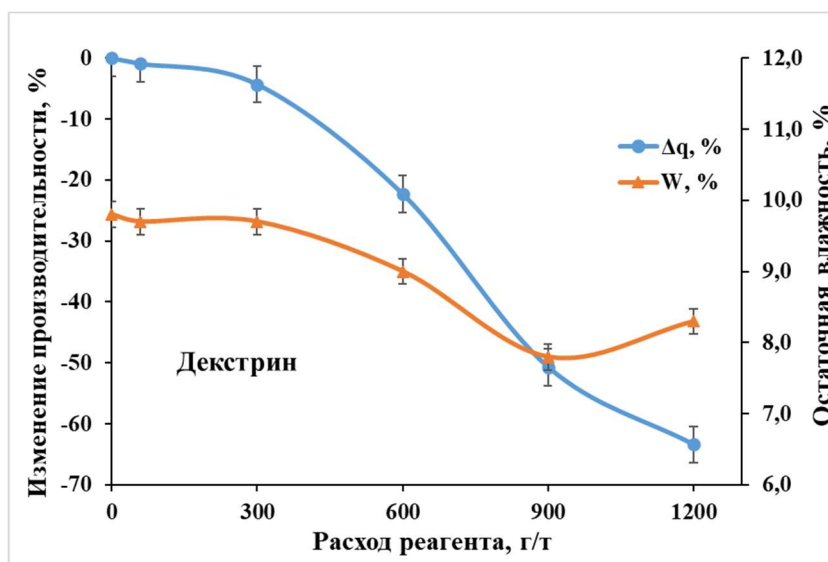


Рисунок 19 – Зависимость относительной производительности ( $\Delta q$ ) и влажности осадка ( $W$ ) от расхода декстрина

Графики производительности и влажности осадка (Рисунок 20) свидетельствуют о том, что наблюдается линейное ухудшение процесса фильтрования, при котором падение производительности достигает 35 % при дозировке 180 г/т. Несмотря на снижение производительности до 25 % влажность остается на том же уровне и снижается только при снижении производительности на более 35%, что свидетельствует о затрудненной водоотдаче получаемого осадка фильтрования. Из чего можно сделать следующий вывод: гидрофобизированные частицы склонны к образованию менее проницаемого осадка, что является прямым следствием их слабого взаимодействия с водой, что устраняет энергетический барьер для плотного межчастичного контакта и способствует формированию компактных агрегатов с мелкими порами, создающими высокое гидравлическое сопротивление потоку жидкости

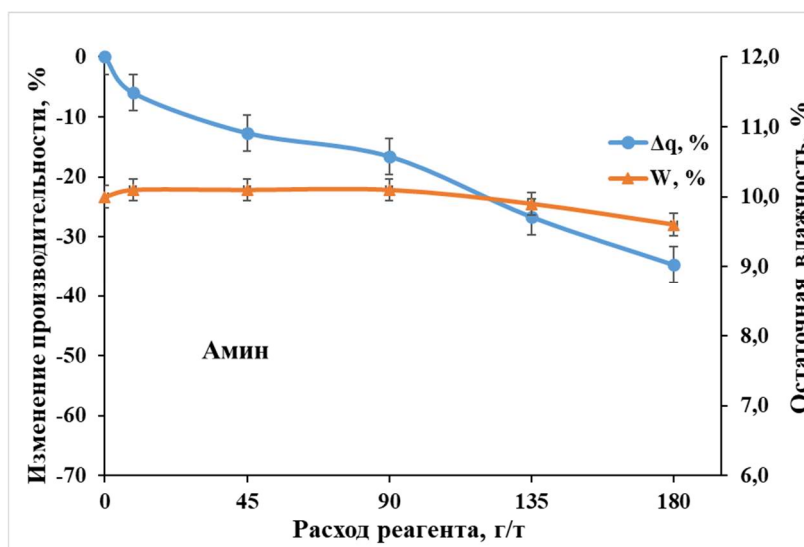


Рисунок 20 – Зависимость относительной производительности ( $\Delta q$ ) и влажности осадка ( $W$ ) от расхода амина

Экспериментальные данные по влиянию комбинации реагентов декстрина и амина на производительность и влажность получаемого осадка (Рисунок 21). Анализ кривых выявляет наличие синергетического эффекта негативного влияния на фильтрацию: при комбинации расходов 300 г/т декстрина и 45 г/т амина снижение производительности составляет 20 %, что превышает снижение при раздельном применении данных реагентов (4 % и 13 % соответственно). При максимальных дозировках (1200 + 180 г/т) падение производительности достигает 68 %. Но в целом, можно отметить схожесть тренда снижения производительности с графиком при добавлении только декстрина, из чего можно сделать следующий вывод о том, что фактор стабилизации тонких фракций преобладает над фактором гидрофобизации.

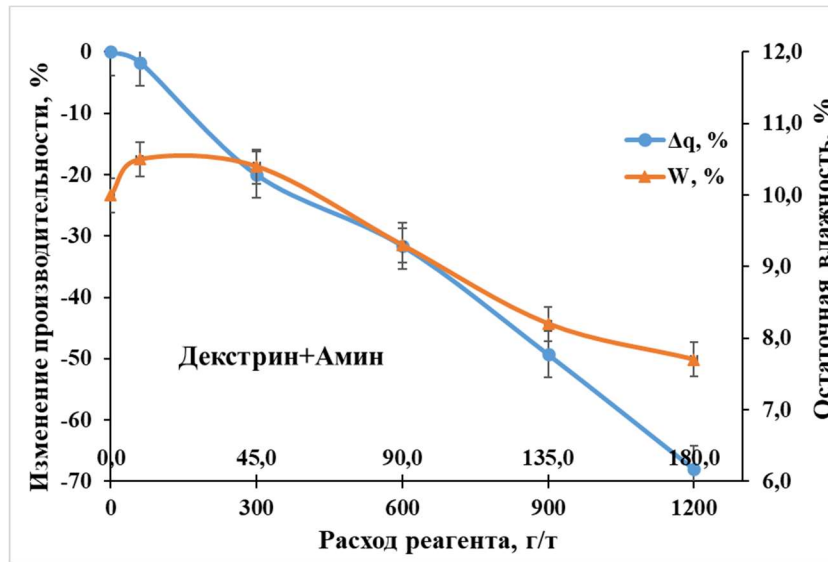


Рисунок 21 – Зависимость относительной производительности ( $\Delta q$ ) и влажности осадка (W) от расхода комбинации реагентов «декстрин+амин»

Таким образом, проведённые исследования позволяют констатировать, что реагенты обратной катионной флотации оказывают существенное негативное влияние на фильтруемость магнетитовых концентратов. Критическими порогами, после которых наблюдается резкое падение производительности, являются 600 г/т для декстрина и 90 г/т для амина. Совместное применение реагентов приводит к синергетическому ухудшению фильтрационных характеристик, что требует разработки специальных мер интенсификации процесса обезвоживания.

#### 4.2 Исследование влияния реагентов на агрегацию, сопротивления осадка и влажность получаемого осадка

При анализе распределения частиц по крупности исходного концентрата и после добавления реагентов А и К (Рисунок 22). Видно, что применение реагентов обоих типов приводит к смещению распределения в сторону более крупных частиц, что выражается в отсутствии пиков наиболее мелких частиц крупностью менее 2 мкм на дифрактограммах после обработки исходного материала по причине образования ими более крупных агрегатов, определяемых как единые частицы, что приводит к ярко выраженному увеличению содержания агрегатов крупностью 30-44 мкм. При этом доля частиц фракции 5-10 мкм количественно не изменяется, что можно объяснить относительно равномерным агрегированием частиц и их «переходом» с одной фракции в другую.

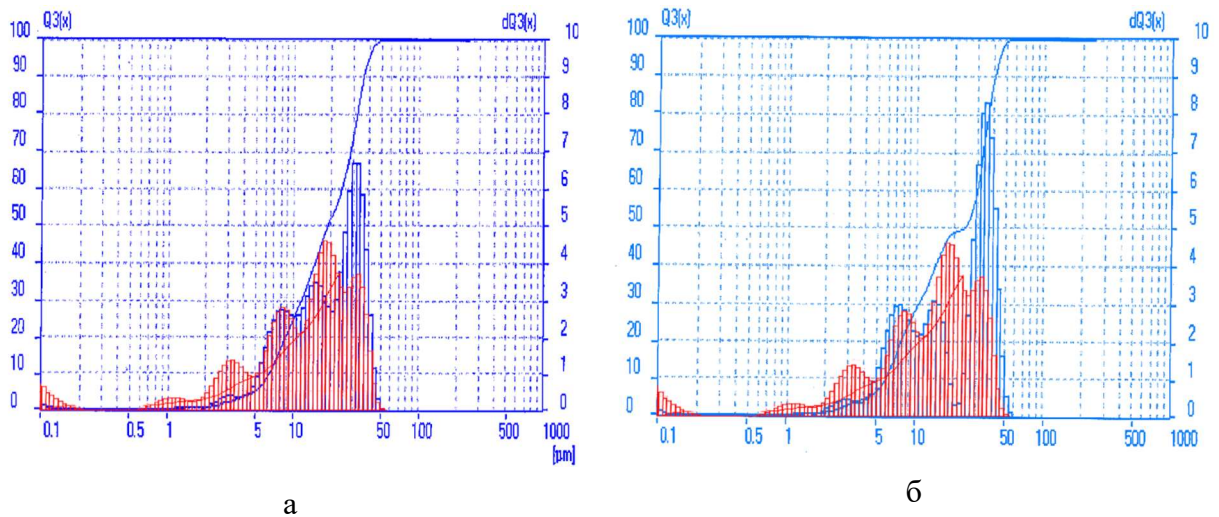


Рисунок 22 – Распределение частиц по крупности: красный цвет – исходный продукт; а – при применении Реагента А с расходом 5 г/т; б – при применении Реагента К с расходом 20 г/т

В связи с тем, что наибольший практический интерес представляют фракции менее 5 мкм, которые, помимо увеличения сопротивления осадка, могут закупоривать поры фильтрующей перегородки, и учитывая, что наиболее крупная фракция характеризуется самым высоким пиком (-44+30 мкм) в распределении частиц, в Таблица 6 представлены выходы данных классов во всех экспериментах.

Таблица 6 – Изменение выхода классов крупности -5+0 мкм и -44+30 мкм при применении реагентов А и К

Реагент	Расход реагента, г/т	Выход класса крупности, %	
		-5+0 мкм	-44+30 мкм
Д+Ам	600+200	18,3	14,1
Д+Ам+Р(А)	600+200+2,5	5,4	30,4
	600+200+5,0	5,2	24,8
	600+200+7,5	13,9	12,0
	600+200+10	13,6	10,6
Д+Ам+Р(К)	600+200+10	8,4	36,3
	600+200+20	8,6	33,0
	600+200+30	8,1	32,6
	600+200+40	6,4	35,1

По результатам измерений выявлено, что при использовании Реагента А наиболее выраженное изменение в выходе классов наблюдается при расходе 2,5-5 г/т, при котором выход класса -5+0 мкм снижается с 18,3 % до 5,2-5,4 %, а выход класса -44+30 мкм возрастает с 14,1 % до 24,8-30,4 %.

При использовании Реагента К изменение в выходе классов наблюдается во всем диапазоне расхода от 10 до 40 г/т. При этом выход класса -5+0 мкм снижается с 18,3 % до 6,4-8,6 %, выход класса -44+30 мкм возрастает с 14,1 % до 32,6-36,3 %.

Из результатов проведенных измерений можно сделать вывод о том, что для реагента А существует определённый интервал эффективного расхода, при слишком высоком расходе полное покрытие поверхности частиц предотвращает дальнейшую агрегацию частиц. Так наиболее оптимальным расходом для Реагента А является диапазон 2,5-5 г/т, а для Реагента К 10-40 г/т. [196]

Для подтверждения эффективной агрегации тонких частиц были проведены тесты по осаждению для определения скорости осаждения и максимального уплотнения сгущенного продукта через 1 час отстаивания, результаты приведены в Таблица 7 и Рисунок 23.

Таблица 7 – Данные по скорости осаждения в зависимости от реагентной обработки

№	Реагент	Расход реагента, г/г	Скорость осаждения		Чистота осв. слоя, г/л	Высота упл. слоя, мм	Пористость, упл. слоя, %
			абс., м/ч	отн., %			
1	Исх.	-	12,06	100	0,6	27	38
2	Д	600	11,24	93	1,1	24	23
3	Ам	200	12,15	101	0,8	26	30
4	Д+Ам	600+200	10,76	89 (100)	1,1	28	34
5	Д+Ам+Р(А)	600+200+5	28,56	237 (266)	0,1	40	55
6	Д+Ам+Р(К)	600+200+20	13,77	114 (128)	0,2	32	43

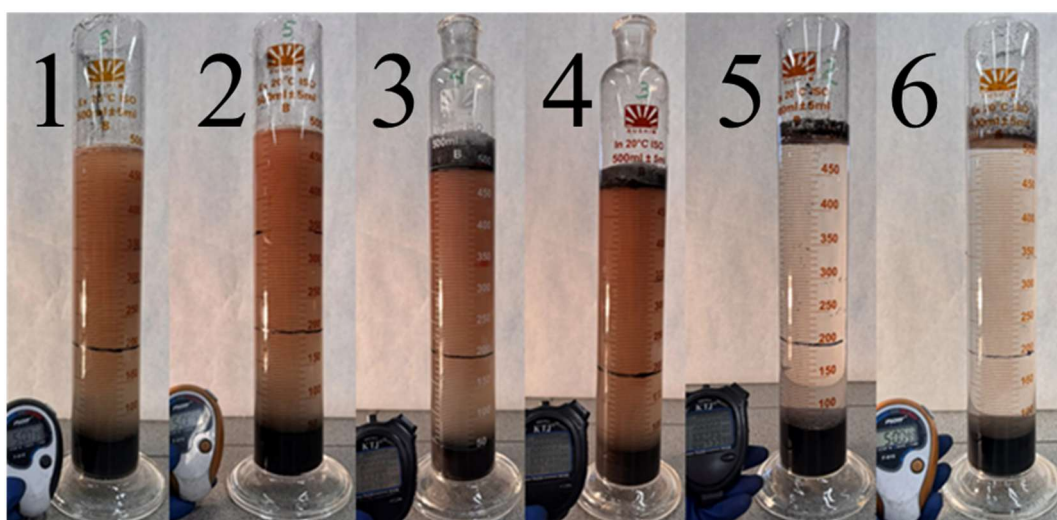


Рисунок 23 – Визуальная оценка осветленного слоя после 5 минут осаждения исходного концентрата (1) и после добавления реагентов согласно режимам обработки (2-6)

Установлено, что введение декстрина снижает скорость осаждения частиц магнетита, что подтверждает вывод о стабилизирующем действии данного реагента за счет усиления электростатического отталкивания при смещении дзета-потенциала в более отрицательную зону (с  $-13,7 \pm 0,3$  до  $-17,5 \pm 0,5$  мВ). Амин не вносит статически весомого изменения в скорость осаждения и плотность сгущенного продукта.

При дозировании реагента А с расходом 5 г/г наблюдается кратное увеличение скорости осаждения (+166%) относительно режима 4 и получение визуально чистого осветленного слоя. Реагент К при расходе 20 г/г увеличил скорость осаждения на 28% относительно режима 4, при получении визуально чистого осветленного слоя. Это подтверждает эффективность выбранных реагентов для агрегирования тонких частиц флотационного железорудного концентрата для интенсификации процесса фильтрования.

На следующем этапе исследовали влияние данных реагентов на процесс фильтрования. На Рисунок 24 и Таблица 8 представлены зависимости удельного

сопротивления осадка и влажности от расходов реагентов по усреднённым данным трех параллельных опытов. Следует отметить, что значения остаточной влажности осадка, полученные в серии опытов по определению удельного сопротивления, превышают показатели, зафиксированные при исследовании влияния флотационных реагентов на установке «Бакор-тест» (раздел 4.1) и в промышленных условиях. Данное расхождение обусловлено различиями в методике и оборудовании для фильтрации.

При исследовании влияния флотационных реагентов использовалась установка «Бакор-тест», моделирующая процесс вакуумной фильтрации на керамических элементах. Полученные на ней данные по влажности максимально приближены к показателям промышленного оборудования благодаря идентичности физико-химических свойств фильтрующей перегородки. В свою очередь, при изучении удельного сопротивления осадка использовалась колба Бюхнера с бумажными фильтрами, которые обладают иными фильтрационными свойствами. Также в данных тестах не соблюдается соотношение времени формирования осадка и его просушки. Таким образом, для оценки абсолютных значений влажности и технологических показателей приоритетными считаются данные установки «Бакор-тест» и промышленных испытаний, тогда как данные колбы Бюхнера используются преимущественно для сравнительного анализа удельного сопротивления осадка.

Таблица 8 – Значения удельного объемного сопротивления осадка и влажности получаемого осадка для исходного и модифицированного магнетитового концентрата

№	Тип реагента	Расход реагента, г/т	Значение удельного объемного сопротивления осадка, $\cdot 10^{13} \text{ м}^{-2}$	Значение влажности полученного осадка, %
1	Д+Ам	600+200	5,2±0,1	14,18±0,10
2	Д+Ам+Р(А)	600+200+2,5	4,0±0,2	14,11±0,23
3	Д+Ам+Р(А)	600+200+5,0	3,3±0,1	14,12±0,19
4	Д+Ам+Р(А)	600+200+7,5	4,2±0,1	14,72±0,06
5	Д+Ам+Р(А)	600+200+10	5,0±0,1	14,66±0,10
6	Д+Ам+Р(К)	600+200+10	4,7±0,1	13,95±0,15
7	Д+Ам+Р(К)	600+200+20	4,9±0,1	13,57±0,12
8	Д+Ам+Р(К)	600+200+30	6,1±0,1	14,07±0,09
9	Д+Ам+Р(К)	600+200+40	5,8±0,2	13,72±0,11

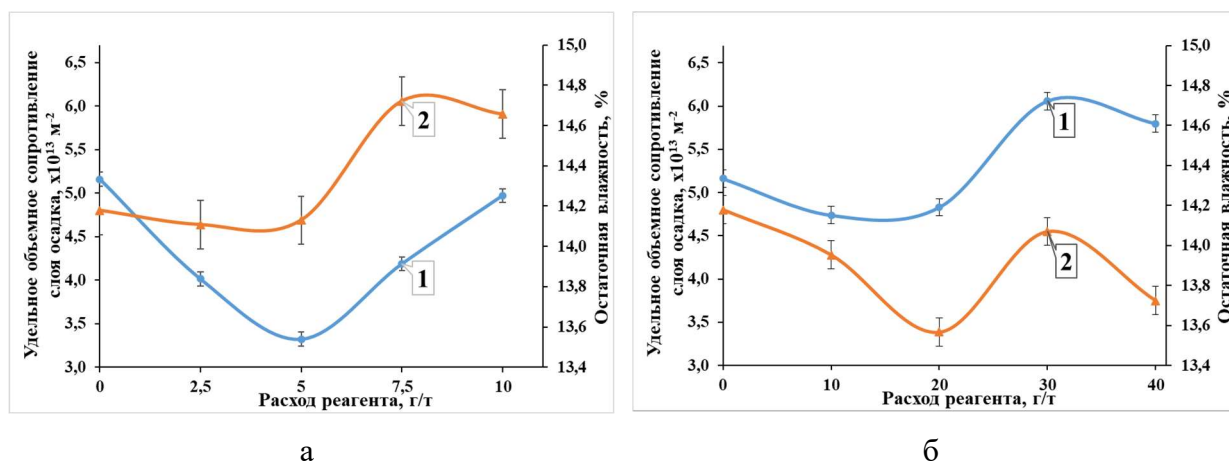


Рисунок 24– Зависимости сопротивления слоя (1) и остаточной влажности (2) осадка от типа реагента и его расхода. а – Реагент А; б – Реагент К

Из полученных данных видно, что без применения реагентов-интесификаторов удельное сопротивление осадка составило  $5,2 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-2}$ , при влажности осадка 14,18 %. При использовании реагента А было зафиксировано наименьшее значение удельного сопротивления осадка  $3,3 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-2}$  при расходе 5 г/т, без значительного изменения влажности, которая составила 14,12 %. В свою очередь, удельное сопротивление осадка при добавлении компонента К имело наименьшее значение в  $4,7 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-2}$  при расходе 10 г/т. Однако, наименьшая остаточная влажность 13,57 % была зафиксирована при расходе реагента 20 г/т, при котором удельное сопротивление осадка составило  $4,9 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-2}$ .

При превышении оптимальных расходов реагентов (реагент А – 5 г/т, реагент К – 20 г/т) наблюдается увеличение удельного сопротивления осадка и увеличение влажности, это связано с несколькими факторами:

- 1) Избыток полимера приводит к перенасыщению поверхности частиц, что вместо агрегирования вызывает стабилизацию суспензии или образование очень мелких, плотных агрегатов;
- 2) Свободные молекулы полимера в растворе увеличивают вязкость фильтрата;
- 3) Образующаяся пространственная сетка из полимера и частиц обладает высокой водоудерживающей способностью и низкой пористостью, увеличивая сопротивление фильтрации.

#### Выводы к главе 4

1. Было подтверждено, что присутствие флотационных реагентов обратной катионной флотации магнетита приводят к снижению эффективности процесса фильтрования до 68%. Последовательное введение депрессора (декстрин) и собирателя (амин) при обратной флотации магнетита создаёт на поверхности частиц устойчивый адсорбционный слой. Декстрин увеличивает отрицательный заряд и стерическое отталкивание, стабилизируя суспензию, что приводит к образованию менее проницаемых осадков фильтрования;

2. Определены оптимальные диапазоны дозировок реагентов-интенсификаторов: 2,5-5 г/т для анионного флокулянта и 10-20 г/т для катионного. Превышение данных дозировок приводит к пептизации и гелеобразованию, что ухудшает фильтрационные характеристики.

3. Выявлено, что при применении анионного флокулянта целесообразно для повышения производительности фильтровального оборудования за счет снижения фильтрационного сопротивления, в то время как использование катионного полимера необходимо для достижения минимальной влажности осадка. Совокупность полученных данных создает научную основу для разработки режимов реагентной обработки, позволяющих создать условия для обеспечения глубокого обезвоживания осадка при сохранении высокой скорости фильтрования.

## Глава 5. Промышленные испытания по интенсификации процесса фильтрации

### 5.1 Условия проведения промышленных испытаний

Целью промышленных испытаний являлась верификация закономерностей, установленных в лабораторных условиях (главы 3–4), в масштабе действующего производства, а также определение оптимальных режимов дозирования реагента-интенсификатора. Несмотря на более низкое удельное сопротивление осадка при использовании Реагента А, для проведения промышленных испытаний был выбран Реагент К, вследствие обеспечения меньшей остаточной влажности, что является приоритетным критерием для последующего окомкования и возможностью повышения производительности при помощи оптимизации режимов работы вакуум-фильтра.

Испытания проводились на фабрике окомкования АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева» в период производства офлюсованных железорудных окатышей из флотационного концентрата с массовой долей железа не менее 70,3 %. Объектом исследования выступали керамические дисковые вакуум-фильтры КДФ-90, оснащенные фильтрующими элементами из пористой керамики. (Рисунок 25).



Рисунок 25 – Общий вид промышленного керамического вакуум-фильтра КДФ-90

В качестве фильтруемого материала выступал магнетитовый концентрат, полученный по схеме обратной катионной флотации. В период испытаний массовая доля класса «–44 мкм» варьировалась в диапазоне 94–98 %, а удельная площадь поверхности

концентрата составляла от 1800 до 2200 см<sup>2</sup>/г (по данным оперативного учета АО «Михайловский ГОК» и лаборатории ООО «НТЦ «Бакор»).

Для дозирования реагента использовалась станция приготовления флокулянта (СПФ-500, ООО «НТЦ «Бакор», РФ) (Рисунок 26 а) обеспечивающая приготовление раствора концентрацией 0,1–0,2 % и его подачу насосом-дозатором (Рисунок 26 б). Точка ввода реагента К была выбрана в питающем трубопроводе вакуум-фильтров (Рисунок 26 в) между пульподелителем и ванной фильтра. Такая схема обеспечивает точный расчет удельного расхода на единицу массы концентрата и исключает влияние нестабильности подачи пульпы между различными фильтрами участка. Время контакта реагента с пульпой до поступления в ванну фильтра составляло 15–30 секунд, что обеспечивало первичное перемешивание в турбулентном потоке.

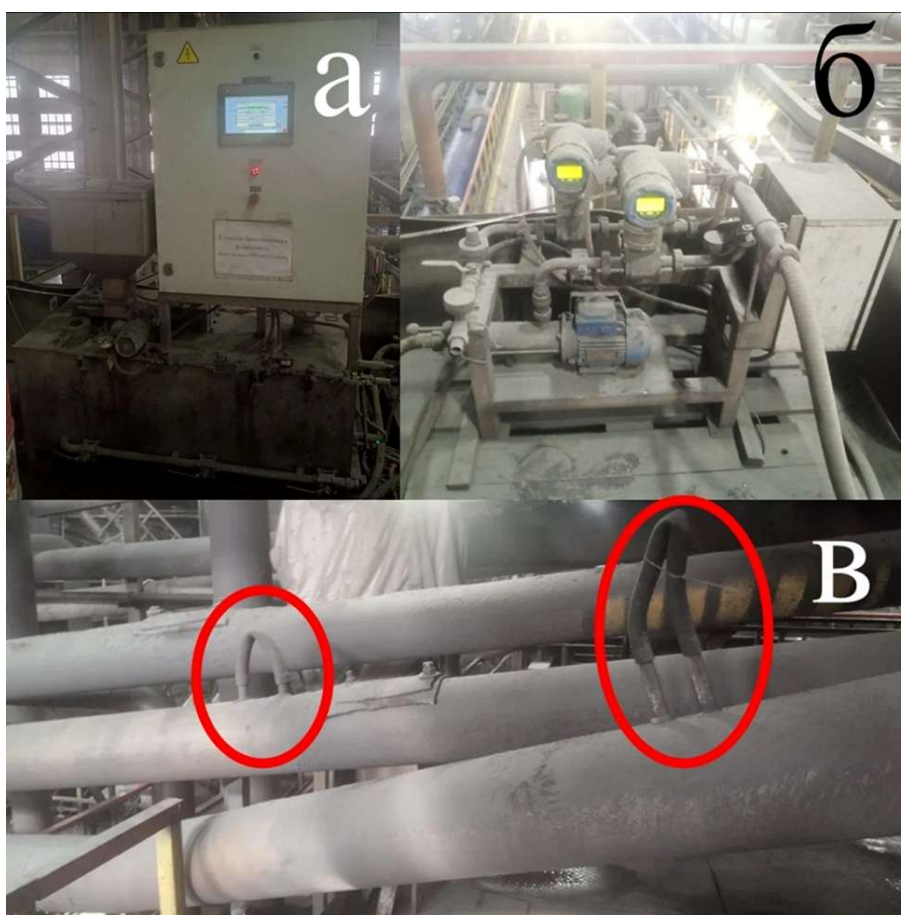


Рисунок 26 – Станция приготовления и дозирования флокулянта СПФ-500 (а) с насос-дозатором с регулируемой производительностью и контрольно-измерительными приборами (б) и точка ввода флокулянта (в)

Контроль технологических показателей осуществлялся посредством отбора проб для определения влажности на портативном анализаторе и оперативного учета производительности фильтров согласно способу описанному в п.2.5 по формуле (12).

## 5.2 Результаты промышленных испытаний по интенсификации процесса фильтрации

Анализ работы вакуум-фильтра № 10 в базовом режиме без применения реагента К выявил существенную нестабильность технологических показателей. В течение фильтроцикла (работы фильтра от старта до регенерации) производительность колебалась в диапазоне 28–34 т/ч при среднем значении 30 т/ч, а влажность осадка варьировалась от 9,8 % до 10,7 % (Таблица 9). Такие колебания влажности выходят за верхний предел допустимых значений для процесса окомкования (10,2 %), что создает технологические риски для качества товарных окатышей и стабильности работы обжиговых машин.

При введении Реагента К в дозировке 40 г/т, начиная с шестого часа работы фильтра, проведя визуальный анализ (Рисунок 27) можно однозначно утверждать о положительной динамике изменения технологических показателей. На графике чётко прослеживается точка перехода от базового режима к опытному (правее зеленой линии), после которой фиксируется устойчивый рост удельной производительности с 27,0 т/ч до 34,7 т/ч, что соответствует приросту +22 %. При этом ключевым индикатором эффективности разработанного режима является не только абсолютное увеличение производительности, но и существенное сужение диапазона колебаний влажности осадка: амплитуда изменения снижается с 3,1 % в базовом режиме до 1,2 % при дозировании реагента К.

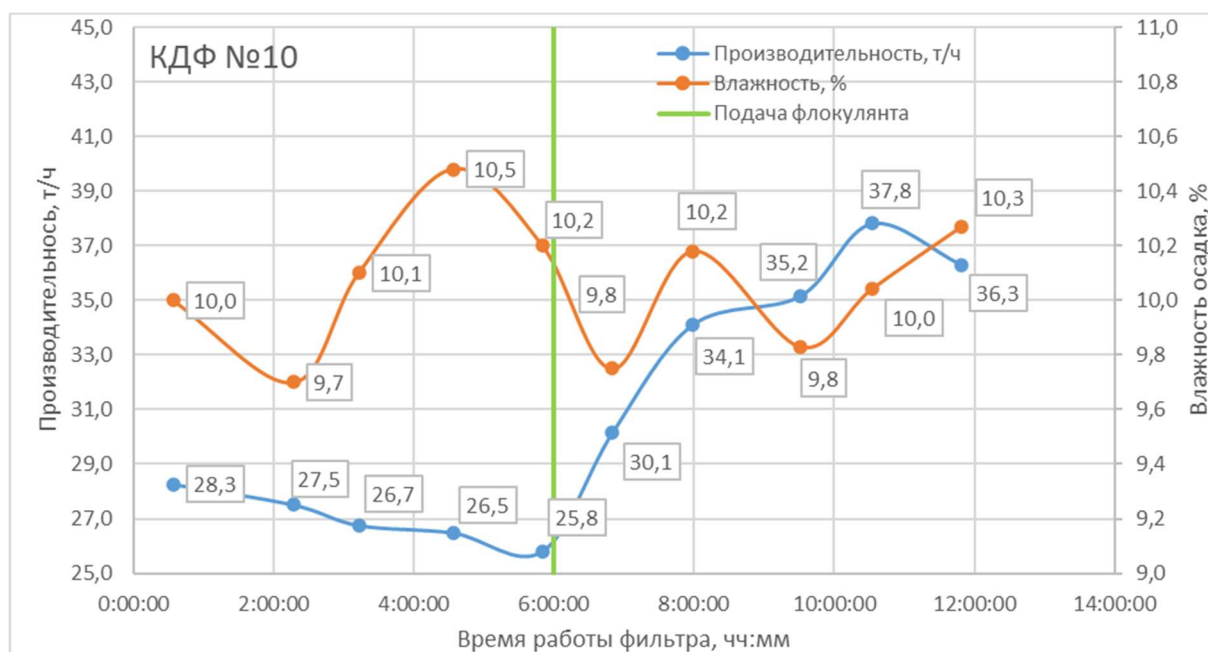


Рисунок 27 – Графики производительности и влажности В/Ф 10 при дозировании Реагента К

Таблица 9 – Технологические показатели работы В/Ф №10 в базовом режиме и при дозировании реагента

Дата время	Время работы, ч:мм	Влажность осадка, %	Производительность фильтра, т/ч	Расход Р(К), г/т	Влажность осадка средняя, %	Производительность фильтра средняя, т/ч
20.01.25 03:54	0:42	10,7	33,7	-	10,2	30,1
20.01.25 04:50	1:38	9,8	28,0			
20.01.25 05:42	2:30	10,3	30,0			
20.01.25 08:59	5:49	10,2	30,4			
20.01.25 11:38	8:28	10,1	29,9			
20.01.25 12:04	8:54	10,0	29,3			
20.01.25 13:56	10:33	10,2	29,3			
Регенерация азотной кислотой						
20.01.25 16:17	0:34	10,0	28,3	-	10,1	27,0
20.01.25 17:55	2:17	9,7	27,5			
20.01.25 18:51	3:13	10,1	26,7			
20.01.25 20:15	4:34	10,5	26,5			
20.01.25 21:31	5:50	10,2	25,8			
20.01.25 22:30	6:50	9,8	30,1	40	10,0	34,7
20.01.25 23:39	7:59	10,2	34,1			
21.01.25 01:11	9:31	9,8	35,2			
21.01.25 02:12	10:32	10,0	37,8			
21.01.25 03:29	11:49	10,3	36,3			

Для подтверждения воспроизводимости результатов и определения оптимальной дозировки испытания были продублированы на вакуум-фильтре № 11, оснащённом модернизированной распределительной головкой с увеличенным сечением отводов в вакуумный ресивер, что объясняет более высокие показатели производительности без использования реагентов по сравнению с вакуум-фильтром №10.

Анализ данных представленных в Таблица 10 показывает, что в штатном режиме без применения реагента К, значения производительности варьировались в диапазоне 38,9–53,6 т/ч при среднем значении 46,9 т/ч, а остаточная влажность осадка колебалась в пределах 9,3–10,6 % при среднем значении 10,0 %. Амплитуда колебаний производительности и влажности свидетельствует о недостаточной устойчивости процесса. При введении Реагента К с расходом 40 г/т зафиксировано увеличение производительности до 48,1 т/ч, при этом диапазон колебаний сузился, что указывает на стабилизирующее действие реагента. Средний показатель влажности составил 9,7 %, что на 0,3 % ниже относительно базового режима. Диапазон колебаний влажности сократился до 0,8 % (9,2–10,0 %), что подтверждает гипотезу о формировании более однородной структуры осадка за счёт агрегации ультратонких частиц. При повышении расхода реагента до 50 г/т средняя производительность возросла до 49,0 т/ч, однако влажность увеличилась до 10,2 %. Данный факт подтверждает о наличии оптимума дозировки: превышение порогового значения приводит к перенасыщению поверхности частиц полимером, что снижает проницаемость осадка.

Следующий эксперимент был направлен на уточнение оптимального диапазона дозировки. В базовом фильтроцикле без реагента средняя производительность составила 56,4 т/ч при влажности 10,0 %. При дозировании флокулянта с расходом 25 г/т зафиксировано повышение производительности до 65,2 т/ч (+15 %) при сохранении влажности на уровне 10,2 %. Однако при увеличении расхода до 40 г/т производительность снизилась до 58,9 т/ч при той же влажности. Попытка вернуть производительность на высокий уровень путем снижения расхода до 20-30 г/т не дала мгновенного эффекта, что указывает на инерционность процесса насыщения суспензии в ванне фильтра полимером и необходимость поддержания стабильного режима дозирования.

Таблица 10 – Технологические показатели работы В/Ф №11 при различных режимах подачи Реагента К

Дата время	Время работы, ч:мм	Влажность осадка, %	Производительность фильтра, т/ч	Расход Р(К), г/т	Влажность осадка средняя, %	Производительность фильтра средняя, т/ч
19.01.2025 13:34	0:55	9,7	46,6	-	10,0	46,9
19.01.2025 14:38	1:59	9,8	49,8			
19.01.2025 15:03	2:23	9,3	38,9			
19.01.2025 16:50	4:11	10,4	46,9			
19.01.2025 18:10	5:30	9,9	52,3			
19.01.2025 19:07	6:28	10,2	53,6			
19.01.2025 20:15	7:31	10,0	45,7			
19.01.2025 21:20	8:37	9,5	41,0			
19.01.2025 22:23	9:40	10,3	47,7			
19.01.2025 23:24	10:40	10,6	46,7			
Регенерация азотной кислотой						
20.01.2025 1:49	1:11	9,8	43,8	40	9,7	48,1
20.01.2025 2:50	2:16	9,2	49,9			
20.01.2025 3:50	3:12	9,8	48,8			
20.01.2025 4:46	4:08	10,0	54,2			
20.01.2025 5:38	5:00	9,6	51,2			
20.01.2025 9:00	8:26	10,0	41,0			
20.01.2025 11:30	10:56	10,2	44,8	50	10,2	49,0
20.01.2025 12:13	11:38	10,3	39,9			
20.01.2025 13:42	12:47	10,4	53,6			
20.01.2025 15:11	14:16	10,2	56,9			
20.01.2025 16:08	15:07	9,9	49,6			
20.01.2025 17:53	16:52	10,1	53,5	-	10,3	48,6
20.01.2025 18:50	17:49	10,4	53,6			
20.01.2025 20:28	19:23	10,3	38,6			

Продолжение Таблицы 10

Дата время	Время работы , ч:мм	Влажность осадка, %	Производительность фильтра, т/ч	Расход Р(К), г/т	Влажность осадка средняя, %	Производительность фильтра средняя, т/ч
Регенерация азотной кислотой						
28.01.2025 21:02	0:26	9,8	50,9	-	10,0	56,4
28.01.2025 21:49	1:13	10,0	53,8			
28.01.2025 23:34	2:58	9,9	59,3			
29.01.2025 1:37	5:01	10,0	58,8			
29.01.2025 3:47	7:11	10,1	57,8			
29.01.2025 5:35	8:39	10,2	59,1			
29.01.2025 6:29	9:54	10,3	55,0			
Регенерация азотной кислотой						
29.01.2025 10:53	2:40	10,3	63,4	25	10,2	65,2
29.01.2025 11:50	3:36	10,1	64,3			
29.01.2025 13:37	5:23	10,3	67,1			
29.01.2025 14:56	6:42	10,2	66,1			
29.01.2025 16:00	7:46	10,2	58,0	40	10,2	58,9
29.01.2025 16:36	8:22	10,2	59,8			
29.01.2025 17:26	9:13	10,1	60,4	30	10,1	60,4
29.01.2025 17:56	9:43	10,1	58,5			
29.01.2025 18:35	10:21	10,2	56,8	20	10,2	57,7
Регенерация азотной кислотой						
29.01.2025 20:57	0:53	9,5	57,2	-	9,7	53,6
29.01.2025 22:01	1:57	9,9	56,7			
29.01.2025 23:13	3:09	9,6	46,8			
30.01.2025 1:54	5:44	9,7	67,4	30	9,8	72,4
30.01.2025 3:37	7:27	9,9	71,3			
30.01.2025 6:47	10:22	9,7	78,6			

Было подтверждено, что эффективный расход Реагента К равен 30 г/т, при котором средняя производительность достигла 72,4 т/ч при влажности 10,1 %, что на 33 % превышает показатели базового режима данного цикла. При этом отмечена высокая стабильность работы фильтра: колебания производительности в течение 6 часов подачи реагента К не превышали  $\pm 8$  %, а влажность удерживалась в целевом коридоре 9,7–9,9%.

При сопоставлении результатов Главы 4 (лабораторные испытания) и Главы 5 (промышленные испытания) выявлено расхождение в оптимальных дозировках реагента: 10–20 г/т и 25–30 г/т соответственно. Увеличение расхода на 30–50% в промышленных условиях является эффектом масштабирования и обусловлено следующими факторами:

1. В лабораторной установке обеспечивается идеальное распределение реагента в объеме пульпы за короткое время. В промышленном трубопроводе время контакта и интенсивность перемешивания ограничены скоростью потока. Часть полимера может не успеть адсорбироваться на поверхности частиц до момента попадания на фильтрующую перегородку.

2. Возможна частичная потеря реагента (адсорбция полимера на стенках трубопроводов, в запорной арматуре) и взаимодействие с ионами оборотной воды до момента фильтрации, т.к. в лабораторной работе для приготовления реагента использовалась дистиллированная вода.

3. Промышленная пульпа характеризуется большими колебаниями плотности и гранулометрии в отличии от подготовленной лабораторной пробы. Повышенная дозировка создает запас по расходу реагента, обеспечивая стабильность даже при кратковременных ухудшениях качества питания.

Внедрение разработанной технологии не требует капитальной реконструкции участка фильтрования, так как дозирование осуществляется в существующие коммуникации, а фильтровальное оборудование остается тем же. Необходимо внедрение только станции приготовления и дозирования флокулянта, которое может быть установлено у накопительной емкости цеха фильтрации. Это позволит увеличить удельную производительность фильтров на 5–10%. Для крупного ГОКа это означает выпуск тысяч тонн дополнительного товарного продукта ежегодно.

### Выводы к главе 5

1. В условиях промышленного предприятия АО «Михайловский ГОК» подтверждена эффективность применения катионного флокулянта Реагент К для интенсификации фильтрации флотационных магнетитовых концентратов.
2. Оптимальный расход реагента в промышленных условиях составляет 25–30 г/т. Превышение данной дозировки не приводит к росту производительности, а ее снижение не обеспечивает стабильности процесса.
3. Применение реагента позволяет увеличить производительность фильтров КДФ-90 по усредненным данным на 5-10% (в отдельных случаях до 33 %) при стабилизации влажности концентрата на уровне не более 10,2%, что удовлетворяет требованиям металлургического передела.
4. Результаты промышленных испытаний согласуются с данными лабораторных исследований с учетом коэффициента масштабирования оптимальной дозировки реагента К, обусловленного гидродинамическими условиями промышленного трубопровода и нестабильностью питания.

## Глава 6. Разработка и обоснование способа регенерации керамических фильтрующих элементов

### 6.1 Анализ причин снижения фильтрующей способности керамических элементов

Особенностью производства окатышей на АО «Карельский окатыш» является политика нулевых выбросов, что подразумевает вовлечение в повторную переработку побочных технологических продуктов. Одним из таких продуктов является продукт пылеулавливания на электрофилтрах, который после разгрузки распульповывается и направляется в перемешиватели с пульпой магнетитового концентрата и таким образом, вместе с основной пульпой, попадает в питание фильтров КДФ. Другим продуктом добавляемым в перемешиватель является смывы обжиговых машин. По результатам минералогического анализа (Таблица 11, Рисунок 28) проб электрофльтрации (КО-1) и смывов с участка обжига (КО-2) установлено преобладание гематита над магнетитом (соотношение гематит:магнетит примерно 4:1). Высокая доля гематита в данных продуктах обусловлена интенсивным температурным окислением магнетита в процессе обжига окатышей. Основной примесью к оксидам железа в пробе КО-1 является кварц (15%), в пробе КО-2 – кварц (30%) и кальцит (30%). Кальцит в пробе КО-2 присутствует в форме тончайшей пудры, которая в воде вместе с гематитом образует коллоидную взвесь, не осаждающуюся в течение длительного времени. Гранулометрический состав отложений характеризуется следующими параметрами: магнетит 1–50 мкм, гематит 1–300 мкм (проба КО-1); магнетит 1–20 мкм, гематит 1–40 мкм (проба КО-2).

Таблица 11 – Минералогический анализ проб электрофльтрации и смывов с участка обжига

Номер пробы	КО-1	КО-2
<i>Минералы</i>	<i>Содержание, %</i>	
Магнетит	16	4
Гематит	69	36
Кварц	15	30
Полевые шпаты	-	Следы
Слюды	-	-
Хлорит	-	-
Амфибол	-	-
Кальцит	Следы	30
Рутил, анатаз	-	Следы
Пирит	Ед. зерна	-
Пирротин	Ед. зерна	-
<i>Сумма</i>	<i>100.0</i>	<i>100.0</i>

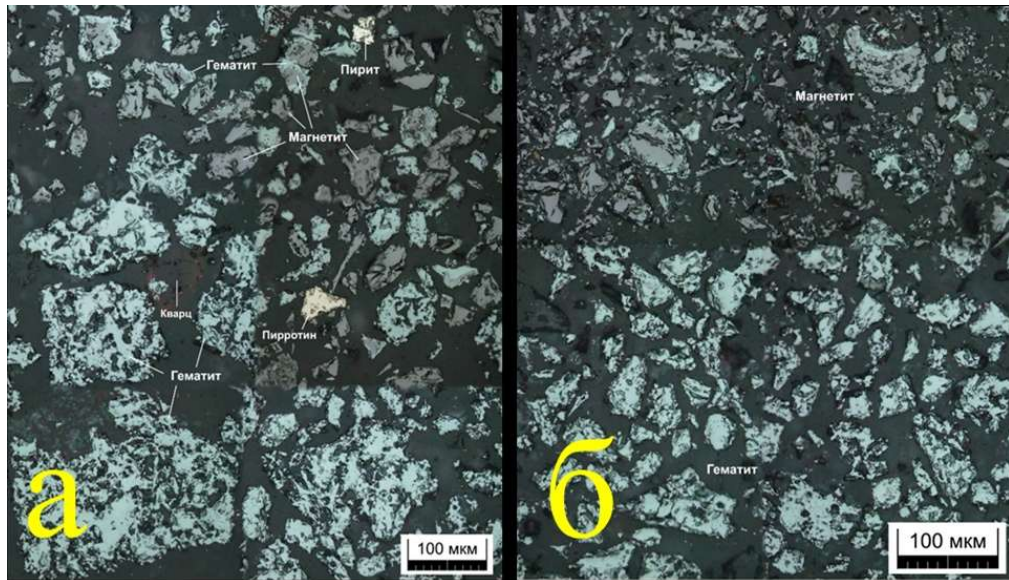


Рисунок 28 – Фотографии монтированных аншлифов пробы продукта электрофильтрации – а; пробы смывов обжиговых машин – б

Для выявления механизмов засорения был проведен элементный анализ с помощью растрового электронного микроскопа серии MIRA (Tescan, Чехия) оснащённого детектором EDS X-MAX 80 (Oxford Instruments) (Рисунок 29) образцов керамических фильтрующих элементов, отработавших более 1000 часов на участке обезвоживания магнетитового концентрата АО «Карельский окатыш». Было выявлено нахождение примесей сульфата бария и гидроксида железа, осаждающихся в порах и на поверхности фильтрующего элемента, препятствующей нормальной работе фильтра.

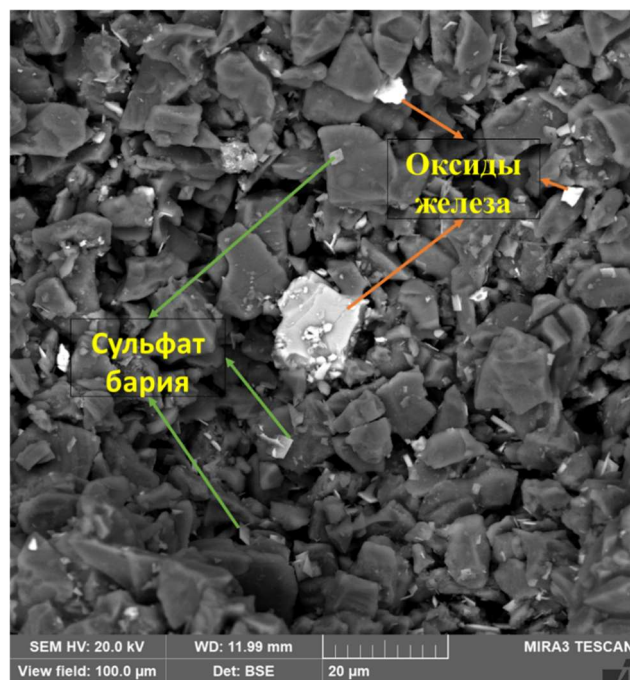


Рисунок 29 – Поверхность мембраны фильтрующего элемента с включениями оксидов железа в порах и барита на поверхности

Особенностью загрязнения сульфатом бария является его химическая инертность к воздействию распространенных кислот ( $\text{HNO}_3$ ,  $\text{HCl}$ ) при концентрациях, безопасных для керамического фильтрующего элемента. Присутствие барита, даже в количестве до 0,2% от массы пульпы, влияет на водопроницаемость из-за субмикронного размера частиц, сравнимого с диаметром пор керамики (0,5–3 мкм), что способствует их застреванию в порах [197].

По результатам микроскопических и минералогических исследований в порах и на поверхности мембраны керамического фильтрующего элемента не были определены никакие другие фазы кроме гематита (или близкие фазы железа в виде гетита, лимонита и т.п.), магнетита и барита, что по всей видимости и явилось причиной снижения производительности фильтра.

Стандартная технология регенерации, применяемая на ряде предприятий, включает ультразвуковую обработку и промывку раствором азотной кислоты концентрацией 0,5–1 %. Исследования показали, что данный метод обеспечивает эффективное удаление солей жесткости, однако обладает низкой эффективностью в отношении оксидов железа и практически не растворяет сульфат бария. В результате, после множества циклов «фильтрация–регенерация», водопроницаемость ФЭ снижается до критических значений. Средний срок службы ФЭ при использовании стандартной методики составляет около 12 500 часов, однако падение производительности до 40–50 % от номинальной наблюдается уже через 700–1000 часов работы. На Рисунок 30 можно отметить, что производительность имеет нисходящий тренд, несмотря на определенные колебания, которые связаны с непостоянством как гранулометрических характеристик входящего питания, так и колебания массового содержания твердого в пульпе. Нисходящий тренд производительности, который начался в начале марта связан с увеличением доли продуктов электрофильтрации и смывов обжиговых машин, которые добавляются в основную пульпу фильтров КДФ. В процессе ежедневного контроля производительности фильтра КДФ было выявлено, что стандартная регенерация в данной ситуации не эффективна - после каждых отработанных суток производительность фильтра становилась все меньше, что также наблюдалось и на соседних фильтрах КДФ. Ввиду того, что гарантийный срок эксплуатации в апреле месяца был исчерпан только на 25% было решено провести исследования, направленные на поиск и внедрение химического способа восстановления производительности керамических вакуум-фильтров.

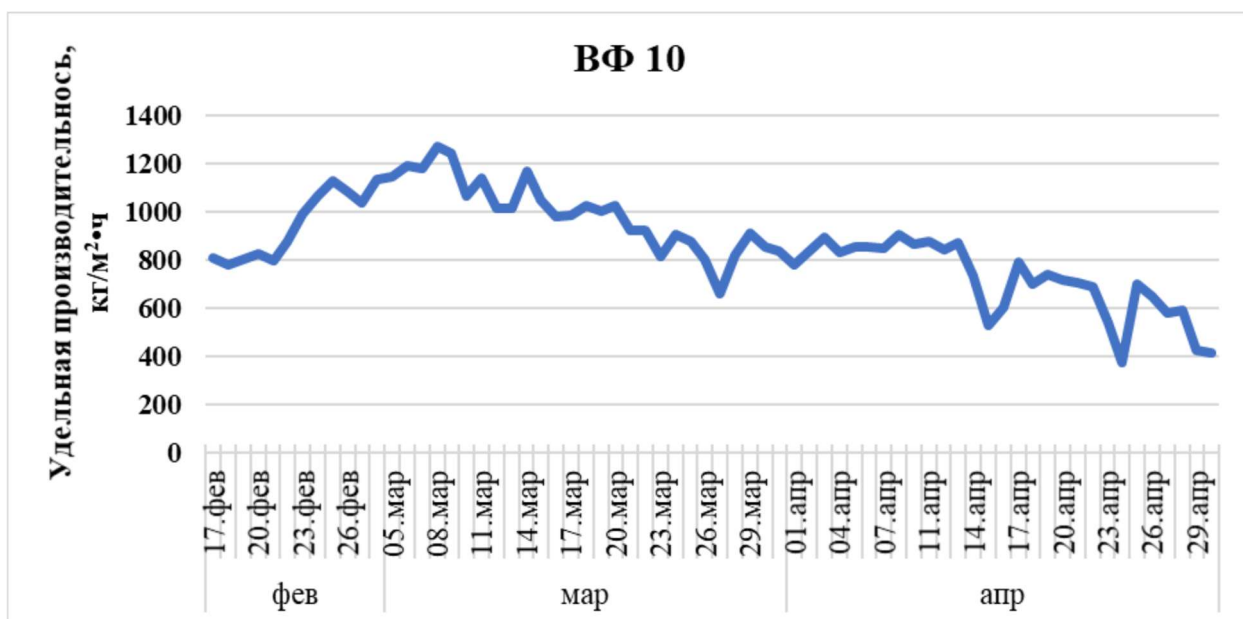


Рисунок 30 – График производительности фильтра КДФ за 1000 часов наработки фильтрующих элементов

## 6.2 Обоснование выбора реагентов для глубокой кислотной регенерации

Принцип действия метода базируется на комплексном химическом воздействии на отложения в порах керамической мембраны с использованием композиции, содержащей щавелевую кислоту и оксиэтилендифосфоновую кислоту (ОЭДФК).

Щавелевая кислота имеет высокую эффективность в отношении оксидов и гидроксидов железа, образуя растворимые оксалатные комплексы [198]. Однако, как показали эксперименты, однокомпонентное использование щавелевой кислоты недостаточно для полного восстановления проницаемости в присутствии оксидов/гидроксидов железа и солей жесткости, а также есть риск осаждения оксалата кальция.

Вторым ключевым компонентом композиции выбрана ОЭДФК. Данный реагент относится к классу комплексонов и обладает высокой способностью к хелатированию ионов двухвалентного железа ( $Fe^{2+}$ ), а также ионов щелочноземельных металлов ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ba^{2+}$ ). Введение ОЭДФК позволяет предотвращать повторное осаждение солей жесткости и растворять отложения оксида железа, которые устойчивы к действию кислот в условиях стандартной регенерации.

Таким образом, композиция данных реагентов должна создавать синергетический эффект, обусловленный сочетанием кислотного растворения (щавелевая кислота) и комплексирования (ОЭДФК). Это обеспечит глубокую очистку порового пространства без

разрушения керамической матрицы. Для подтверждения теоретического выбора были проведены лабораторные исследования. [199]

### 6.3 Лабораторные испытания по регенерации фильтрующих элементов

Для лабораторных исследований были подготовлены образцы (керны) фильтрующих элементов с выраженным снижением толщины слоя осадка толщиной 10 мм и диаметром 24 мм. Далее подготовленные образцы замачивались в регенерационном составе (Щавелевая кислота 1 % + ОЭДФК 1 %) на 12 часов. Контроль регенерации производился визуально по степени очистки налета на мембранном покрытии керамического фильтрующего элемента. По результатам данной работы было определено, что данная композиция эффективно очищает поверхность фильтрующего элемента, что выражается в удалении коричневого налета (Рисунок 31).



Рисунок 31 – Керн фильтрующего элемента до (а) и после (б) обработки предлагаемым регенерационным составом

Для подтверждения эффективности данной композиции, численно измеренной, были проведены испытания на демонтированных керамических фильтрующих элементах, отработавших 7500 фактических часов фильтрования на АО «Карельский окатыш». За это время было проведено 8 циклов стандартной глубокой регенерации (щавелевая кислота + роданид аммония / гидроксид натрия + ЭДТА-2Na).

Показатель удельной водопроницаемости является единственным максимально достоверным для косвенного определения фильтрующей способности. Для данного типа фильтрующих элементов с данным типом мембраны показатель удельной

водопроницаемости для новых фильтрующих элементов находится в диапазоне от 4,5 до 5,5 м<sup>3</sup>/ч<sup>2</sup>·ч. Анализ данных из Таблица 12 свидетельствует, что наиболее значимый эффект наблюдается на сильно загрязненных элементах (№ 73951, 66291), где применение ОЭДФК в сочетании с циркуляцией раствора позволило увеличить водопроницаемость в 6–16 раз по сравнению с исходным состоянием. Циркуляция раствора через внутреннюю полость ФЭ повышает эффективность регенерации за счет интенсификации массопереноса.

Визуальная оценка процесса очистки представлена на Рисунок 32, который иллюстрирует, что рассматриваемая композиция эффективно удаляет отложения окислов железа кирпично-ржавого цвета. Данный эффект может быть использован в качестве оперативного контроля эффективности глубокой регенерации в условиях промышленного применения.

Таблица 12 – Эффективность регенерации керамических фильтрующих элементов различными составами

№ ФЭ	q исх., м <sup>3</sup> /м <sup>2</sup> ·ч	Регенерационный состав	q, м <sup>3</sup> /м <sup>2</sup> ·ч	Прирост q, м <sup>3</sup> /м <sup>2</sup> ·ч	Прирост q, %
66060	1,62	Вымачивание Кислотный состав: Щавелевая кислота 1% + Роданид аммония 1 % Щелочной состав: Гидроксид натрия 0,5% + ЭДТА-2Na 1%	4,73	3,12	192,73
66064	1,48		4,59	13,11	210,26
66024	1,19		4,30	3,10	260,16
66271	2,30	Вымачивание Кислотный состав: Щавелевая кислота 1%. + ОЭДФК 1% Щелочной состав: Гидроксид натрия 0,5% + ЭДТА-2Na 1%	4,60	2,30	99,8
73951	0,29		5,13	4,84	1673,7
88070	4,01		5,73	1,72	42,9
66291	0,48	Циркуляция насосом Кислотный состав: Щавелевая кислота 1%. + ОЭДФК 1% Щелочной состав: Гидроксид натрия 0,5% + ЭДТА-2Na 1%	3,82	3,34	692,9

Примечание: q – удельная водопроницаемость.



Рисунок 32 – Визуальная оценка очистки керамического фильтрующего элемента при регенерации предложенной композицией: а – до регенерации, б – после 4 часов регенерации, в – после 12 часов регенерации

Таким образом, проведенные лабораторные испытания подтвердили высокую эффективность предложенной регенерационной композиции на основе щавелевой и ОЭДФ-кислот. Достигнутые значения удельной водопроницаемости свидетельствуют о возможности восстановления фильтрационной способности керамических элементов до уровня, близкого к исходным характеристикам новых изделий. Однако условия лабораторных экспериментов, характеризующиеся статическим режимом взаимодействия реагента с поверхностью фильтра и ограниченным масштабом образцов, не позволяют в полной мере оценить технологическую эффективность способа в реальных условиях эксплуатации АО «Карельский Окамыш». Для окончательной верификации разработанного метода необходимо учесть влияние динамических факторов, таких как режим вращения вала дисков фильтра, неравномерность распределения загрязнений по площади фильтрации и т.п. Это обуславливает необходимость проведения промышленных испытаний на действующем оборудовании.

#### **6.4 Результаты промышленных испытаний по регенерации керамических фильтрующих элементов**

Испытания проводились на промышленном вакуум-фильтре КДФ в условиях действующего производства АО «Карельский Окамыш». Для получения предложенной глубокой кислотной композиции в ванне смешали 50 кг щавелевой кислоты, 50 кг ОЭДФК и 4900 л воды, что соответствует соотношению массы щавелевой кислоты и массы ОЭДФК при принятии общей массы указанных компонентов за 100% на уровне 50:50%, и соотношению общей массы щавелевой кислоты и ОЭДФК и массы воды при принятии массы водного раствора за 100% на уровне 2:98%. Далее осуществили глубокую кислотную регенерацию керамических фильтрующих элементов, для чего запустили вращение вала на

скорости 0,5 об/мин дискового вакуумного фильтра так, чтобы каждый керамический фильтрующий элемент периодически погружался в ванну с предложенной глубокой кислотной композицией в течение 12 часов. Также для интенсификации процесса регенерации, фильтрующие элементы подвергались периодическому воздействию ультразвука, входящего в состав фильтра КДФ. После чего осуществили обратную промывку керамических фильтрующих элементов водой. Для оценки эффективности предложенного способа сравнивались водопроницаемость фильтрующих элементов до и после проведения глубокой регенерации.

Испытания проводились на двух идентичных дисковых вакуум-фильтрах. На первом фильтре применялась разработанная композиция (щавелевая кислота + ОЭДФК), на втором – известная композиция (щавелевая кислота + роданид аммония). Результаты глубокой кислотной регенерации представлены в Таблица 13 и Рисунок 33.

Таблица 13 – Сравнительная эффективность способов регенерации керамических фильтрующих элементов

Параметр	Ед. изм.	Разработанная композиция	Известная композиция (Аналог)
Исходная водопроницаемость	м <sup>3</sup> /час	49,0	49,2
Водопроницаемость перед регенерацией	м <sup>3</sup> /час	22,4	22,3
Водопроницаемость после регенерации	м <sup>3</sup> /час	48,8	46,9
Степень восстановления	%	99,6	95,3
Срок работы до следующей регенерации	суток	32	29

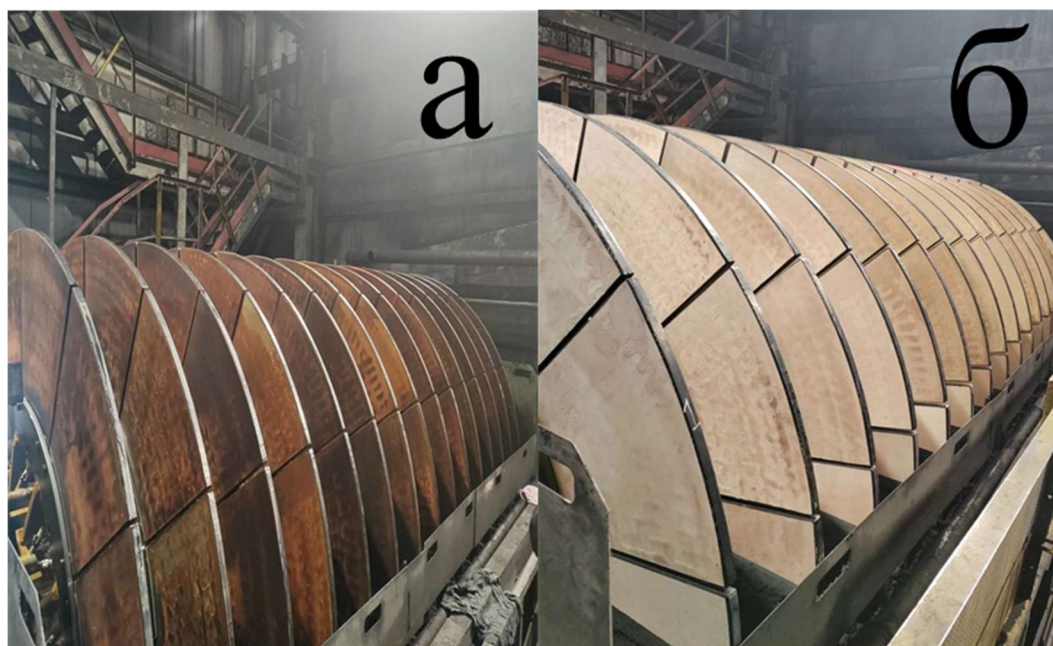


Рисунок 33 – Внешний вид керамических фильтрующих элементов до глубокой регенерацией (а) и после глубокой регенерации предложенной композицией (б)

Применение композиции на основе щавелевой и ОЭДФ кислот позволяет восстановить водопроницаемость до 99,6 % от исходного уровня, что на 4,3 % выше, чем при использовании аналогов. Кроме того, наблюдается увеличение межрегенерационного периода на 10 %, что обусловлено более глубоким удалением отложений оксида железа, являющихся центрами кристаллизации для последующих загрязнений.

Для удаления медленно накапливаемых отложений сульфата бария, устойчивых к кислотной обработке, в регламент внедрена стадия глубокой щелочной регенерации. Она проводится по мере снижения водопроницаемости ниже порогового значения с использованием раствора ЭДТА-2Na и гидроксида натрия. Комбинированное применение кислотной и щелочной регенерации позволяет поддерживать производительность фильтра на уровне новых элементов в течение всего срока службы.

Разработанный способ регенерации защищен патентом РФ № 2 830 008 С 1 «Способ глубокой кислотной регенерации керамического фильтрующего элемента и композиция для его осуществления» от 11.11.2024г. Технология внедрена на предприятиях АО «Карельский окатыш» и АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева». Регламент предусматривает проведение глубокой кислотной регенерации путем периодического прохождения фильтрующих элементов через ванну с реагентом в течение 8–24 часов при скорости вращения вала 0,3–0,5 об/мин.

### **Выводы к главе 6**

1. Определен химико-минералогический состав отложений, формирующихся в порах керамических фильтрующих элементов при обезвоживании магнетитовых концентратов. Установлено, что критическое снижение водопроницаемости обусловлено не только механическим засорением тонкими классами руды, но и химическим закреплением труднорастворимых соединений: оксидов/гидроксидов железа и сульфатов щелочноземельных металлов. Показано, что инертность баритовых отложений к действию распространенных минеральных кислот (азотной, соляной) в безопасных концентрациях является ключевым лимитирующим фактором срока службы ФЭ при использовании стандартных регламентов регенерации.

2. На основании изучения механизмов взаимодействия кислотных агентов с компонентами отложений разработана композиция для глубокой регенерации, реализующая синергетический эффект растворения и комплексообразования. Доказано, что совместное применение щавелевой кислоты и оксиэтилидендифосфоновой кислоты позволяет не только растворять существующие отложения, но и хелатировать ионы

двухвалентного железа и щелочноземельных металлов в растворе. Это предотвращает вторичное осаждение солей жесткости и формирование новых центров кристаллизации в порах керамики, что принципиально отличает разработанный способ от известных аналогов.

3. В ходе лабораторных и промышленных испытаний на АО «Карельский окатыш» экспериментально подтверждена высокая эффективность разработанного способа. Установлено, что применение композиции на основе щавелевой кислоты и ОЭДФК обеспечивает восстановление водопроницаемости керамических элементов до 99,6 % от уровня новых изделий, что на 4,3–5,0 % превышает показатели регенерации известными составами (щавелевая кислота + роданид аммония).

4. Промышленная апробация способа продемонстрировала возможность увеличения межрегенерационного периода эксплуатации фильтровального оборудования на 10 % за счет более полного удаления отложений оксида железа, служащих центрами кристаллизации для последующих загрязнений.

5. Разработанный способ защищен патентом РФ № 2830008 от 11.11.2024г., что подтверждает его новизну. Внедрение технологии позволяет существенно продлить ресурс дорогостоящих керамических элементов и снизить эксплуатационные затраты участка обезвоживания.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлено, что реагенты обратной катионной флотации, присутствующие в железорудном концентрате, в зависимости от их расхода приводят к снижению производительности керамических вакуум-фильтров до 68%. Также показано, что гидролизованный щелочью кукурузный крахмал (декстрин) способствует стабилизации мелких фракций в пульпе за счет усиления электрокинетического отталкивания, что является более значимым фактором, чем гидрофобизация поверхности, осуществляемая за счет адсорбции 3-(изодецилокси)пропиламина (амин);

2. Показано, что введение полиэлектролита с анионным зарядом на основе акриламида и акрилата натрия (реагент А) при расходе 5 г/т способствует агрегированию осадка за счет мостикового механизма и снижению сопротивления осадка, но не приводит к снижению влажности получаемого осадка. Введение катионного полимерного коагулянта на основе полидиаллилдиметиламмония хлорида (реагент К) при расходе 20 г/т приводит к успешному агрегированию частиц без значительного увеличения объема осадка за счет снижения электрокинетического отталкивания частиц, что способствует снижению остаточной влажности осадка фильтрования на 0,6% без снижения производительности;

3. При промышленных испытаниях на участке фильтрования АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева» подтверждена эффективность применения катионного полимерного коагулянта на основе полидиаллилдиметиламмония хлорида (реагент К), которая позволила увеличить производительность керамических дисковых вакуум-фильтров КДФ-90 на 5-10% (в отдельных случаях до 33%) при стабилизации влажности получаемого осадка не более 10,2%, что отвечает требованиям производства окатышей;

4. Установлено, что снижение водопроницаемости керамических фильтрующих элементов обусловлено не только механическим засорением, но и осаждением труднорастворимых соединений (оксиды/гидроксиды железа и сульфаты щелочноземельных металлов), которые при известных способах глубокой регенерации полностью не растворяются, что приводит к накопительному эффекту закупоривания пор керамических фильтрующих элементов.

5. Установлено, что глубокая кислотная регенерация керамических фильтрующих элементов и использованием композиции щавелевой и оксиэтилидендифосфоновой кислот позволяет восстановить водопроницаемость керамических фильтрующих элементов до 99,6% от уровня новых изделий. Полученные результаты подтверждены промышленными испытаниями.

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ**

В настоящей диссертации применяют следующие сокращения и обозначения:

DRI	– Прямое восстановление железа (англ. Direct Reduced Iron)
SEM	– Растровая электронная микроскопия (англ. Scanning Electron Microscopy)
XRD	– Рентгеновский дифракционный анализ (англ. X-ray Diffraction)
В/Ф	– Вакуум-фильтр
ГБЖ	– Горячебрикетированное железо
ГОК	– Горно-обоганительный комбинат
ЖРК	– Железорудный концентрат
ИК-Фурье	– Инфракрасная спектроскопия с Фурье-преобразованием
КДФ	– Керамический дисковый фильтр
НПВО	– Нарушенное полное внутреннее отражение
ОЭДФК, HEDP	– Оксиэтилидендифосфоновая кислота
ПАА	– Полиакриламид
ПАВ	– Поверхностно-активные вещества
pH	– Водородный показатель
СПФ	– Станция приготовления флокулянта
УФ	– Ультрафиолет
ФЭ	– Фильтрующий элемент
ЭДРС / EDS	– Энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия
ЭДТА-2Na	– Динатриевая соль этилендиаминтетрауксусной кислоты
ФОК	– фабрика окомкования

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rebonato, R. Optimal climate policy with negative emissions / R. Rebonato, D. Kainth, L. Melin, D. O'KANE // *International Journal of Theoretical and Applied Finance*. – 2024. – Т. 27. – № 01. – С. 2450012.
2. Caineng, Z. Progress, challenge and significance of building a carbon industry system in the context of carbon neutrality strategy / Z. Caineng, W. Songtao, Y. Zhi и др. // *Petroleum Exploration and Development*. – 2023. – Т. 50. – № 1. – С. 210-228.
3. Пелевин, А. Технологии обогащения железных руд России и пути повышения их эффективности / А. Пелевин // *Записки Горного института*. – 2022. – Т. 256. – С. 579-592.
4. Олейник, Т. Особенности флотации железных руд / Т. Олейник, Л. Скляр, М. Олейник, А. Скляр. – 2017.
5. Кармазин, В.В. Проблемы и перспективы магнитного обогащения / В.В. Кармазин // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2013. – № 1. – С. 560-575.
6. Бижанов, А.М. Синергия агломерации и брикетирования в доменном процессе / А.М. Бижанов, К. Оберто // *Металлург*. – 2021. – № 7. – С. 20.
7. Павловец, В. Развитие техники и технологии окомкования железорудного сырья в металлургии / В. Павловец. – Москва; Вологда : Инфа-Инженерия, 2022.
8. Воскобойников, В.Г. Общая металлургия / В.Г. Воскобойников, В.А. Кудрин, А.М. Якушев. – Металлургия, 1985.
9. Поволоцкий, В. Кинетико-динамическая модель прямого получения железа в шахтной печи / В. Поволоцкий, Ю. Ланцов, С. Плотникова // *Сталь*. – 2014. – № 8. – С. 35-38.
10. Гладкая, Е.А. Технология получения горячбрикетированного железа / Е.А. Гладкая, Д.Н. Елисеев, Т.Х.У. Наринбаев // *Ответственный редактор*. – 2022. – С. 26.
11. Шевцова, Л.А. Преимущества горячбрикетированного железа / Л.А. Шевцова, К.А. Ермоленко, Е.Ю. Лихтина, С.В. Парталюк // *Ответственный редактор*. – 2025. – С. 20.
12. Самойлик, В. Обогащение руд черных металлов / В. Самойлик, А. Корчевский. – Москва; Вологда : Инфра-Инженерия, 2022.
13. Коротич, В.И. Теоретические основы окомкования железнорудных материалов / В.И. Коротич. – М. : Металлургия, 1966. – 137 с.
14. Коротич, В.И. Основы теории и технологии подготовки сырья к доменной плавке: Учебное пособие / В.И. Коротич. – М. : Металлургия, 1978. – 207 с.
15. Kawatra, S. Effects of retained calcium ions in iron ore concentrates on filtration and pelletization performance / S. Kawatra // *5th UBC-McGill Bi-Annual Symposium Metallurgical Society of Canadian ...*, 2004. – 2015.

16. Wang Y., Kinetic Mechanisms and Rate-Limiting Steps in the Thermal Reduction of Iron Oxide Pellets: A Combined Experimental and Modeling Study / Wang Y., Chen X., Li W, et al // Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science. – 2021. – Т. 52. – № 4.
17. Zhu D. Optimization of pellet induration process / Zhu D, et al. // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. – 2015.
18. Chen X., Mechanisms of consolidation and microstructural evolution during hot briquetting of iron ore fines: Experimental and numerical analysis / Chen X., Li Y, Wang H. // Materials & Design. – 2022. – Т. 215.
19. Chizhikova, V. Composition of Iron-Ore Pellets with Different Types of Additives. / V. Chizhikova, R. Vainshtein // Metallurgist. – 2003. – Т. 47.
20. Pietsch, W.B. Agglomeration processes: phenomena, technologies, equipment / W.B. Pietsch. – John Wiley & Sons, 2008.
21. Abouzeid, A.-Z. Effect of iron ore properties on its balling behaviour / A.-Z. Abouzeid, A.A. Seddik // Powder Technology. – 1981. – Т. 29. – № 2. – С. 233-241.
22. De Moraes, S.L. Influence of dispersants on the rheological and colloidal properties of iron ore ultrafine particles and their effect on the pelletizing process—A review / S.L. De Moraes, J.R.B. De Lima, J.B.F. Neto // Journal of Materials Research and Technology. – 2013. – Vol. 2. – № 4. – P. 386-391. DOI: 10.1016/j.jmrt.2013.04.003.
23. ISO 9001:2015 Quality management systems — Requirements. – Geneva: International Organization for Standardization, 2015.
24. ГОСТ ISO 4700–2015 Железорудные окатыши. Определение прочности на раздавливание. – Введ. 2016-07-01. – М.: Стандартиформ, 2015. – 12 с.
25. ГОСТ 15054 Руды железные, концентраты, агломераты и окатыши. Методы отбора и подготовки проб для химического анализа и определения содержания влаги.
26. ISO 4695:2021 Iron ores for blast furnace feedstocks — Determination of the reducibility by the rate of reduction index.
27. ГОСТ Р ИСО 4695–2015 Окатыши железорудные для доменного производства. Определение восстановимости.
28. ISO 3082:2017 Iron ores — Sampling and sample preparation procedures.
29. Fan X., Development and application of optimized expert system for grate-kiln process of iron ore oxide pellet production in BAOWU Ezhou Pelletizing Plant / Fan X., Shu F., Yang G. // Sintering and Pelletizing. – 2014. – Т. 39. – С. 2-6.
30. Tang F., Production application of new disc pelletizer in Ezhou pelletizing plant of BAOWU / Tang F., Huang G. // Researcher Iron Steel. – 2011. – Т. 39. – С. 36-38.
31. Б. К. Мусабаев. Перевозка в специализированном составе рудного концентрата / Б. К. Мусабаев, Т. Р. Токтамысова // Актуальные научные исследования в современном мире. – 2019. – № 10-7(54). – С. 121-128.

32. Пелевин, А.Е. Технология обогащения магнетитовых руд и пути повышения качества железных концентратов / А.Е. Пелевин // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2011. – № 4. – С. 20-28.
33. Сергеев, П. Улучшение производительности и снижение энергоемкости доменного производства чугуна / П. Сергеев, Е. Нешпоренко // Наука и производство Урала. – 2015. – № 11. – С. 42.
34. Стрельникова, И.А. Углеродный след и способы его снижения в металлургии / И.А. Стрельникова // ПЕДАГОГИКА. ОБРАЗОВАНИЕ. ИННОВАЦИИ – 2022. Сборник научных трудов по материалам V Международного научноисследовательского конкурса (г.-к. Анапа, 27 августа 2022 г.). – Анапа : Изд-во «НИЦ ЭСП» в ЮФО, 2022. – С. 55-58.
35. Jégourel, Y. The global iron ore market: From cyclical developments to potential structural changes / Y. Jégourel // The Extractive Industries and Society. – 2020. – Т. 7. – № 3. – С. 1128-1134.
36. Mesquita, J. The synergy of magnetic separation and flotation: A game-changer for processing complex low-grade iron ores / J. Mesquita, Y. Foucaud, E. Kleiderer и др. // Minerals Engineering. – 2025. – Т. 228. – С. 109338.
37. Dai, C. Preparation of high-purity magnetite from iron ore concentrate / C. Dai, P. Chen, H. Tang и др. // Minerals Engineering. – 2024. – Т. 216. – С. 108899.
38. Freitas Simões, F. de. High-intensity magnetic separation as a pre-flotation stage for the purification of complex phosphate ore / F. de Freitas Simões, J.P. Borges, N.J. Pires, M. dos Santos Oliveira // Separation and Purification Technology. – 2025. – С. 134704.
39. Lazutkin, S. Improving a technology for the direct production of iron and vanadium-bearing products based on the Midrex process / S. Lazutkin, Y.S. Yusfin, G. Zinyagin и др. // Metallurgist. – 2001. – Т. 45. – № 9. – С. 354-359.
40. Schwarz, G. Correlation of evaluation methods of iron ore pellets with their performance in a direct reduction plant / G. Schwarz. – 2018.
41. Авдохин, В. Обратная катионная флотация тонкодисперсных железорудных концентратов / В. Авдохин, С. Губин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2006. – № 5. – С. 324-331.
42. Абрамов, А.А. Флотационные методы обогащения / А.А. Абрамов. – 4-е. – М. : Издательство «Горная книга», 2016. – 595 с.
43. Исмагилов Р.И. Экспериментальная оценка эффективности катионных собирателей при обратной флотации надрешетного продукта тонкого грохочения рядового магнетитового концентрата Михайловского ГОКа имени А.В. Варичева / Исмагилов Р.И., Е.Л. Чантурия, Д.В. Шехирев, Х.К. Рахимов // Современные проблемы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья (Плаксинские чтения – 2023). – Москва, 2023.
44. Варичев А.В. Инновационные решения в производстве железорудного сырья на Михайловском ГОКе / Варичев А.В., Угаров А.А., Эфендиев Н.Т. и др. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 5. – С. 141-153. DOI: 10.15372/FTPRPI20170516.

45. Ratnakar Bonda. Enhancing filtration efficiency: A study on moisture reduction in iron ore concentrates / Ratnakar Bonda, P. Sharath Kumar, Attel Umashankar // *International Journal of Science and Research Archive*. – 2025. – Vol. 14. – Enhancing filtration efficiency. – № 1. – P. 1774-1779. DOI: 10.30574/ijrsra.2025.14.1.0249.
46. Li, Y. Dewatering of Mineral Adsorbents / Y. Li. – [Electronic resource] // *Adsorption at Natural Minerals/Water Interfaces : Engineering Materials* / S. Song, B. Li eds. . – Cham : Springer International Publishing, 2021. – P. 305-316. – Mode of access: [http://link.springer.com/10.1007/978-3-030-54451-5\\_8](http://link.springer.com/10.1007/978-3-030-54451-5_8) (date of access: 26.02.2026).
47. Wu, Z.H. Dewatering and Drying in Mineral Processing Industry: Potential for Innovation / Z.H. Wu, Y.J. Hu, D.J. Lee et al. // *Drying Technology*. – 2010. – Vol. 28. – Dewatering and Drying in Mineral Processing Industry. – № 7. – P. 834-842. DOI: 10.1080/07373937.2010.490485.
48. Bonda, R. Investigation of Filtration Variables on Moisture Control in Iron Ore Concentrate for Pelletization / R. Bonda, P.S. Kumar, R. Sah // *Journal of Mines, Metals and Fuels*. – 2025. – P. 49-57. DOI: 10.18311/jmmf/2025/46198.
49. Zhang, W. Grinding of Australian and Brazilian Iron Ore Fines for Low-Carbon Production of High-Quality Oxidised Pellets / W. Zhang, Q. Zhou, J. Pan et al. // *Minerals*. – 2024. – Vol. 14. – № 3. – P. 236. DOI: 10.3390/min14030236.
50. El-Shall, H. Process for dewatering and utilization of mining wastes / H. El-Shall, P. Zhang // *Minerals Engineering*. – 2004. – Vol. 17. – № 2. – P. 269-277. DOI: 10.1016/j.mineng.2003.10.029.
51. Alam, N. Dewatering of coal plant tailings: Flocculation followed by filtration / N. Alam, O. Ozdemir, M.A. Hampton, A.V. Nguyen // *Fuel*. – 2011. – Vol. 90. – Dewatering of coal plant tailings. – № 1. – P. 26-35. DOI: 10.1016/j.fuel.2010.08.006.
52. Dash, M. Studies on the effect of flocculant adsorption on the dewatering of iron ore tailings / M. Dash, R.K. Dwari, S.K. Biswal et al. // *Chemical Engineering Journal*. – 2011. – Vol. 173. – № 2. – P. 318-325. DOI: 10.1016/j.cej.2011.07.034.
53. Kawatra, S.K. Application of Surface Chemical Fundamentals to Improving Industrial Filtration Rates / S.K. Kawatra, V. Claremboux // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. – 2019. – Vol. 40. – № 4. – P. 292-297. DOI: 10.1080/08827508.2019.1598404.
54. Szatyłowicz, E. Magnetic Field Usage Supported Filtration Through Different Filter Materials / E. Szatyłowicz, I. Skoczko // *Water*. – 2019. – Vol. 11. – № 8. – P. 1584. DOI: 10.3390/w11081584.
55. Palica, M. Mechanical dewatering of the flotation concentrate of coking coal / M. Palica // *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. – 1994. – Vol. 33. – № 3. – P. 141-149. DOI: 10.1016/0255-2701(94)90004-3.
56. Li, Z.-S. Dewatering sludge by osmotic technique – A comparative experimental study / Z.-S. Li, L.-S. Tang, L.-J. Zhang, Z.-G. Luo // *Drying Technology*. – 2019. – Vol. 37. – № 6. – P. 680-690. DOI: 10.1080/07373937.2018.1454939.

57. Condie, D.J. The Vacuum Filtration of Iron Ore Ultrafines / D.J. Condie, T. Stoesser, D. Suasnabar, C.J. Veal // *Separation Science and Technology*. – 1998. – Vol. 33. – № 15. – P. 2265-2280. DOI: 10.1080/01496399808545272.
58. Smith, J. Optimal ceramic filtration operating conditions for an iron-ore concentrate / J. Smith, C. Sheridan, L. Van Dyk et al. // *Minerals Engineering*. – 2018. – Vol. 115. – P. 1-3. DOI: 10.1016/j.mineng.2017.10.011.
59. Tripathy, S.K. Design and Analysis of Dewatering Circuits for a Chromite Processing Plant Tailing Slurry / S.K. Tripathy, Y.R. Murthy, S. Farrokhpay, L.O. Filippov // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. – 2021. – Vol. 42. – № 2. – P. 102-114. DOI: 10.1080/08827508.2019.1700983.
60. Van Der Werf, L. Experimental study and modelling of a filtration–consolidation step: Towards the development of a design tool for cassava dewatering / L. Van Der Werf, A. Chiadò Rana, A. Chapuis et al. // *Journal of Food Engineering*. – 2023. – Vol. 342. – Experimental study and modelling of a filtration–consolidation step. – P. 111338. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2022.111338.
61. You, X. Influence of surfactant for improving dewatering of brown coal: A comparative experimental and MD simulation study / X. You, M. He, X. Zhu et al. // *Separation and Purification Technology*. – 2019. – Vol. 210. – Influence of surfactant for improving dewatering of brown coal. – P. 473-478. DOI: 10.1016/j.seppur.2018.08.020.
62. Zheng, F. R31 filter aid enhances filtration of fine hematite concentrate particles / F. Zheng, Y. Guo, J. Fan et al. // *Powder Technology*. – 2021. – Vol. 378. – P. 255-262. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.09.043.
63. Nguyen, C.V. Advanced solid-liquid separation for dewatering fine coal tailings by combining chemical reagents and solid bowl centrifugation / C.V. Nguyen, A.V. Nguyen, A. Doi et al. // *Separation and Purification Technology*. – 2021. – Vol. 259. – P. 118172. DOI: 10.1016/j.seppur.2020.118172.
64. Дмитракова, У.В. Опыт применения различного фильтровального оборудования на отечественных предприятиях / У.В. Дмитракова, А.В. Круглов, Т.И. Юшина, Е.Д. Чылбак-оол // *Обогащение руд*. – 2021. – № 4. – С. 52-56. DOI: 10.17580/or.2021.04.09.
65. Hahn, J. Two percent points less moisture with XL-type high-performance vacuum disc filters / J. Hahn // *MATEC Web of Conferences*. – 2025. – Т. 416. – С. 06005. DOI: 10.1051/mateconf/202541606005.
66. Mukhachev A.P. Disc-type press filter and its industrial testing / Mukhachev A.P, Yelatontsev D.O. // *Geo-Technical Mechanics*. – 2023. – № 166. – С. 84-94. DOI: 10.15407/geotm2023.166.084.
67. Халапян, С.Ю. Разработка модели процесса обезвоживания железорудного концентрата / С.Ю. Халапян, А.О. Анпилов // *Системы управления и информационные технологии*. – 2021. – № 4(86). – С. 18-22. DOI: 10.36622/VSTU.2021.86.4.004.
68. Fränkle, B. Tailings Filtration: Water Jet Spray Cleaning of a Blinded Iron Ore Filter Cloth / B. Fränkle, M. Stockert, T. Sok et al. // *Minerals*. – 2023. – Vol. 13. – Tailings Filtration. – № 3. – P. 416. DOI: 10.3390/min13030416.

69. Gupta, C. Influence of Natural Additive on Slurryability and Flowability of Iron Ore / C. Gupta, S. Kumar // *Journal of Mining Science*. – 2023. – Vol. 59. – № 2. – P. 242-255. DOI: 10.1134/S1062739123020072.
70. Dubey, A. Scale-up prediction of the head loss of a high concentration, non-Newtonian particulate slurry / A. Dubey, V. Prasad, P.K. Senapati et al. // *Particulate Science and Technology*. – 2024. – Vol. 42. – № 7. – P. 1115-1128. DOI: 10.1080/02726351.2024.2352710.
71. Chellappah, K. Aggregation effects in the cake filtration of interacting binary mixtures / K. Chellappah, E.S. Tarleton, R.J. Wakeman // *Chemical Engineering Science*. – 2010. – Vol. 65. – № 24. – P. 6407-6414. DOI: 10.1016/j.ces.2010.09.022.
72. Аманбаев, Т.Р. Влияние процесса осадкообразования на фильтрацию жидкости из суспензии / Т.Р. Аманбаев // *Журнал технической физики*. – 2017. – Т. 87. – № 5. – С. 672-680.
73. Vorobiev, E. Derivation of filtration equations incorporating the effect of pressure redistribution on the cake-medium interface: A constant pressure filtration / E. Vorobiev // *Chemical Engineering Science*. – 2006. – Vol. 61. – Derivation of filtration equations incorporating the effect of pressure redistribution on the cake-medium interface. – № 11. – P. 3686-3697. DOI: 10.1016/j.ces.2006.01.010.
74. Khuzhayorov, B.Kh. An Axi-Symmetric Problem of Suspensions Filtering with the Formation of a Cake Layer / B.Kh. Khuzhayorov, G. Ibragimov, U. Saydullaev, B.A. Pansera // *Symmetry*. – 2023. – Vol. 15. – № 6. – P. 1209. DOI: 10.3390/sym15061209.
75. Khairullin, A.A. Application of the ideal soil model and tube hydraulics to study filtration processes / A.A. Khairullin // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2018. – Т. 194. – С. 062011. DOI: 10.1088/1755-1315/194/6/062011.
76. Höfgen, E. A comparison of filtration characterisation devices for compressible suspensions using conventional filtration theory and compressional rheology / E. Höfgen, S. Kühne, U.A. Peuker, A.D. Stickland // *Powder Technology*. – 2019. – Vol. 346. – P. 49-56. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.01.056.
77. Yukseler, H. A new approach in assessing slurry filterability / H. Yukseler, İ. Tosun, U. Yetis // *Journal of Membrane Science*. – 2007. – Vol. 303. – № 1-2. – P. 72-79. DOI: 10.1016/j.memsci.2007.06.053.
78. Жужиков В. А. Фильтрование: Теория и практика разделения суспензий / Жужиков В. А. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1980. – 400 с.
79. Stepanov, N.V. Rheological effect in the filtration of disperse systems / N.V. Stepanov // *Journal of Engineering Physics*. – 1989. – Vol. 57. – № 3. – P. 1046-1050. DOI: 10.1007/BF00870815.
80. Lai, Q. Enhanced low-rank coal slime dewatering by adjustment of channel wall structure and surface wettability / Q. Lai, Y. Liao, Z. Liu // *Separation and Purification Technology*. – 2020. – Vol. 248. – P. 116970. DOI: 10.1016/j.seppur.2020.116970.
81. Zhang, F. Overview of Fine Coal Filtration. Part I: Evaluation of Filtration Performance and Filter Cake Structure / F. Zhang, G. Bournival, S. Ata // *Mineral Processing and Extractive*

Metallurgy Review. – 2025. – Vol. 46. – Overview of Fine Coal Filtration. Part I. – № 3. – P. 457-478. DOI: 10.1080/08827508.2024.2334956.

82. Yu, W. Characterizing moisture occurrence state in coal gasification fine slag filter cake using low field nuclear magnetic resonance technology / W. Yu, X. Wang, L. Liu et al. // Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. – 2023. – Vol. 45. – № 3. – P. 8004-8014. DOI: 10.1080/15567036.2023.2224253.

83. Kostornov, A.G. Capillary Transport of Low-Viscosity Liquids in Porous Metallic Materials under the Action of Gravitational Force / A.G. Kostornov // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2003. – Vol. 42. – № 9-10. – P. 447-459. DOI: 10.1023/B:PMMC.0000013216.33150.fb.

84. Wei, Y. Effect of hydrogel particle additives on water-accessible pore structure of sandy soils: A custom pressure plate apparatus and capillary bundle model / Y. Wei, D.J. Durian // Physical Review E. – 2013. – Vol. 87. – Effect of hydrogel particle additives on water-accessible pore structure of sandy soils. – № 5. – P. 053013. DOI: 10.1103/PhysRevE.87.053013.

85. Zarate, N.V. Effect of relative humidity on onset of capillary forces for rough surfaces / N.V. Zarate, A.J. Harrison, J.D. Litster, S.P. Beaudoin // Journal of Colloid and Interface Science. – 2013. – Vol. 411. – P. 265-272. DOI: 10.1016/j.jcis.2013.05.048.

86. Fränkle, B. Copper tailings filtration: Influence of filter cake desaturation / B. Fränkle, T. Sok, M. Gleiß, H. Nirschl // Minerals Engineering. – 2024. – Vol. 217. – Copper tailings filtration. – P. 108952. DOI: 10.1016/j.mineng.2024.108952.

87. Yildiz, T. Mechanical Dewatering of Homogeneous and Segregated Filter Cakes by Vibration Compaction / T. Yildiz, U. Stankovic, J. Zolg et al. // ChemEngineering. – 2024. – Vol. 8. – № 3. – P. 49. DOI: 10.3390/chemengineering8030049.

88. Yu, M. Water Morphologies and Distribution in Wet Soil and Sands / M. Yu, X. Peng, Z. Fang. – [Электронный ресурс] // ASME 2008 First International Conference on Micro/Nanoscale Heat Transfer, Parts A and B ASME 2008 First International Conference on Micro/Nanoscale Heat Transfer. – Tainan, Taiwan : ASMEDC, 2008. – С. 881-887. – Режим доступа: <https://asmedigitalcollection.asme.org/MNHT/proceedings/MNHT2008/42924/881/330482> (дата обращения: 03.03.2026).

89. Felby, C. Cellulose–water interactions during enzymatic hydrolysis as studied by time domain NMR / C. Felby, L.G. Thygesen, J.B. Kristensen et al. // Cellulose. – 2008. – Vol. 15. – № 5. – P. 703-710. DOI: 10.1007/s10570-008-9222-8.

90. Zhou, G. A review of recent advances in computational and experimental analysis of first adsorbed water layer on solid substrate / G. Zhou, L. Huang // Molecular Simulation. – 2021. – Vol. 47. – № 10-11. – P. 925-941. DOI: 10.1080/08927022.2020.1786086.

91. Ke, Z.-W. Mechanism for the adsorption of Per- and polyfluoroalkyl substances on kaolinite: Molecular dynamics modeling / Z.-W. Ke, S.-J. Wei, P. Shen et al. // Applied Clay Science. – 2023. – Vol. 232. – Mechanism for the adsorption of Per- and polyfluoroalkyl substances on kaolinite. – P. 106804. DOI: 10.1016/j.clay.2022.106804.

92. Dove, A. Mitigation of lunar dust adhesion by surface modification / A. Dove, G. Devaud, X. Wang et al. // Planetary and Space Science. – 2011. – Vol. 59. – № 14. – P. 1784-1790. DOI: 10.1016/j.pss.2010.12.001.

93. Bowling, R.A. An Analysis of Particle Adhesion on Semiconductor Surfaces / R.A. Bowling // *Journal of The Electrochemical Society*. – 1985. – Т. 132. – № 9. – С. 2208-2214. DOI: 10.1149/1.2114320.
94. Koroleva, Y.V. Study of heat and mass transfer processes in obtaining fresh water from atmospheric air / Y.V. Koroleva, A.S. Magomadov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2017. – Т. 891. – С. 012112. DOI: 10.1088/1742-6596/891/1/012112.
95. Patil, S.V. Mechanical dewatering of red mud / S.V. Patil, B.N. Thorat // *Separation and Purification Technology*. – 2022. – Vol. 294. – P. 121157. DOI: 10.1016/j.seppur.2022.121157.
96. Zhuo, Q. Effect of particle size distribution on filter cake pore structure and coal slurry dewatering process / Q. Zhuo, W. Liu, H. Xu, D. Wang // *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. – 2022. – Vol. 42. – № 6. – P. 1879-1894. DOI: 10.1080/19392699.2020.1781830.
97. Endo, Y. Air and water permeation resistance across dust cakes on filters—effects of particle polydispersity and shape factor / Y. Endo, D.-R. Chen, D.Y.H. Pui // *Powder Technology*. – 2001. – Vol. 118. – № 1-2. – P. 24-31. DOI: 10.1016/S0032-5910(01)00291-1.
98. Bourcier, D. Influence of particle size and shape properties on cake resistance and compressibility during pressure filtration / D. Bourcier, J.P. Féraud, D. Colson et al. // *Chemical Engineering Science*. – 2016. – Vol. 144. – P. 176-187. DOI: 10.1016/j.ces.2016.01.023.
99. Löwer, E. Neighborhood Relationships of Widely Distributed and Irregularly Shaped Particles in Partially Dewatered Filter Cakes / E. Löwer, F. Pfaff, T. Leibner, U.A. Peuker // *Transport in Porous Media*. – 2021. – Vol. 138. – № 1. – P. 201-224. DOI: 10.1007/s11242-021-01600-7.
100. Shin, J.Y. The influence of different shapes and size distributions of coating pigments on packing and dewatering / J.Y. Shin, H.L. Lee // *Journal of Coatings Technology and Research*. – 2020. – Vol. 17. – № 6. – P. 1425-1436. DOI: 10.1007/s11998-020-00371-y.
101. Хатунцева, О.Н. Можно ли описывать ламинарные и турбулентные режимы течения жидкости, интегрируя одни и те же уравнения / О.Н. Хатунцева // *Модели и методы аэродинамики*. – 2022. – С. 84-85.
102. Osterroth, S. The permeability prediction of beds of poly-disperse spheres with applicability to the cake filtration / S. Osterroth, C. Preston, B. Markicevic et al. // *Separation and Purification Technology*. – 2016. – Vol. 165. – P. 114-122. DOI: 10.1016/j.seppur.2016.03.046.
103. Zhuo, Q. Pore structure and permeability of filter cake in coal slurry filtration / Q. Zhuo, D. Wang, H. Xu et al. // *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. – 2022. – Vol. 42. – № 2. – P. 155-170. DOI: 10.1080/19392699.2019.1585830.
104. Ding, Y. Effect of particle shape on the pore structure and permeability of granular materials / Y. Ding, B. Li, X. Li // *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. – 2026. – Vol. 30. – № 1. – P. 1-26. DOI: 10.1080/19648189.2025.2568681.
105. Song, H. The investigation of the particle shape effect on the permeability of porous media through lattice Boltzmann simulation and experimental study / H. Song, J. Xie, P. Yin et al. // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2024. – Vol. 201. – P. 108983. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2024.108983.

106. Zięba, Z. Influence of soil particle shape on saturated hydraulic conductivity / Z. Zięba // *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. – 2017. – Vol. 65. – № 1. – P. 80-87. DOI: 10.1515/johh-2016-0054.
107. Yang, S. Study on the influence of particle shape on pore permeability characteristics of rough soil / S. Yang, D. Chen, Y. Lei et al. // *Physics of Fluids*. – 2025. – Vol. 37. – № 11. – P. 113609. DOI: 10.1063/5.0288749.
108. Liu, Y.F. Pore scale study of the influence of particle geometry on soil permeability / Y.F. Liu, D.-S. Jeng // *Advances in Water Resources*. – 2019. – Vol. 129. – P. 232-249. DOI: 10.1016/j.advwatres.2019.05.024.
109. Banala, A. Influence of particulate geometry on permeability of porous materials / A. Banala, H. Ma, A. Kumar // *Powder Technology*. – 2019. – Vol. 345. – P. 704-716. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.01.064.
110. Fei, W. Impact of three-dimensional sphericity and roundness on heat transfer in granular materials / W. Fei, G.A. Narsilio, M.M. Disfani // *Powder Technology*. – 2019. – Vol. 355. – P. 770-781. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.07.094.
111. Peng, Z. Numerical Investigation of Particle Shape Effect on Sand Shear Strength / Z. Peng, C. Chen, L. Wu // *Arabian Journal for Science and Engineering*. – 2021. – Vol. 46. – № 11. – P. 10585-10595. DOI: 10.1007/s13369-021-05430-z.
112. Yao, T. Quantifying the particle shape and surface roughness of sands / T. Yao, W. Li // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. – 2023. – Vol. 82. – № 4. – P. 135. DOI: 10.1007/s10064-023-03167-7.
113. Wetterling, J. Effects of surface structure on the filtration properties of microcrystalline cellulose / J. Wetterling, T. Mattsson, H. Theliander // *Separation and Purification Technology*. – 2014. – Vol. 136. – P. 1-9. DOI: 10.1016/j.seppur.2014.08.031.
114. Cruz, D. Charge Neutralization Mechanism Efficiency in Water with High Color Turbidity Ratio Using Aluminium Sulfate and Flocculation Index / D. Cruz, M. Pimentel, A. Russo, W. Cabral // *Water*. – 2020. – Vol. 12. – № 2. – P. 572. DOI: 10.3390/w12020572.
115. Huttunen, M. Specific energy consumption of cake dewatering with vacuum filters / M. Huttunen, L. Nygren, T. Kinnarinen et al. // *Minerals Engineering*. – 2017. – Vol. 100. – P. 144-154. DOI: 10.1016/j.mineng.2016.10.025.
116. Taran, Yu.A. Determination of the Maximal Capacity of Effluents Filtering Process with the Filter Partition Pores Clogging / Yu.A. Taran, A.V. Kozlov // *Chemical and Petroleum Engineering*. – 2020. – Vol. 56. – № 3-4. – P. 182-187. DOI: 10.1007/s10556-020-00757-0.
117. Анпилов А. О. Повышение эффективности процесса обезвоживания железорудного концентрата на основе гибридного интеллектуального управления: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Анпилов А. О. – 2023. – 182 с.
118. Белоглазов, И.Н. Фильтрования технологических пульп / И.Н. Белоглазов, В.О. Голубев, О.Н. Тихонов, и др. – М. : ФГУП "Издательский дом «Руда и металлы», 2003. – 320 с.
119. Massinaei, M. Industrial Optimization of Vacuum Disk Filter Dewatering in an Iron Ore Beneficiation Plant / M. Massinaei, S. Siavoshiy, A. Javanshiri. – In Review, 2025. – Режим

доступа: <https://www.researchsquare.com/article/rs-8060071/v1> (дата обращения: 01.03.2026). – [Электронный ресурс].

120. Садыков, В.Х. Совершенствование дисковых вакуум-фильтров для обезвоживания железнорудных концентратов / В.Х. Садыков // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. ГИ Носова. – 2007. – № 3. – С. 19-22.

121. Горлова, О.Е. Обезвоживание продуктов обогащения и обратное водоснабжение обогатительных фабрик / О.Е. Горлова, Н.Н. Орехова. – Москва; Вологда : Инфра-Инженерия, 2022. – 236 с.

122. Воловиков, А.Ю. Разработка математической модели засорения керамических вакуумных дисковых фильтров при обезвоживании железнорудного концентрата / А.Ю. Воловиков, Ю.В. Шариков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № 5. – С. 39-41.

123. Antti Hakkinen. Dewatering of iron ore slurry by a ceramic vacuum disc filter / Antti Hakkinen, Bjarne Ekberg // Chemical Engineering Transactions. – 2009. – Т. 17. – С. 1431-1436. DOI: 10.3303/CET0917239.

124. Van Zwieten, R. From cooperative to uncorrelated clogging in cross-flow microfluidic membranes / R. Van Zwieten, T. Van De Laar, J. Sprakel, K. Schroën // Scientific Reports. – 2018. – Vol. 8. – № 1. – P. 5687. DOI: 10.1038/s41598-018-24088-6.

125. Сизов, А. Автоматизированная система контроля и мониторинга работы керамических дисковых фильтров КДФ-75 / А. Сизов // Молодежь и новые информационные технологии. – 2016. – С. 262-267.

126. Mamghaderi, H. Optimization of role of physical parameters in the filtration processing with focus on the fluid flow from pore / H. Mamghaderi, M. Gharabaghi, M. Noaparast // Minerals Engineering. – 2018. – Т. 122. – С. 220-226.

127. Еременко, Ю. Повышение энергоэффективности процесса обезвоживания железнорудного концентрата путём его автоматизации на основе нейросетевых технологий / Ю. Еременко, С. Халапян, А. Анпилов // Горный журнал. – 2020. – № 3. – С. 62.

128. Patra, A.S. Improved dewatering of iron ore fines by the use of surfactants / A.S. Patra, D. Makhija, A.K. Mukherjee et al. // Powder Technology. – 2016. – Vol. 287. – P. 43-50. DOI: 10.1016/j.powtec.2015.09.030.

129. Науменко В. Г. Обезвоживание продуктов обогащения полезных ископаемых: учебное пособие / Науменко В. Г., Самойлик В. Г., Звягинцева Н. А., Назимко Е. И. – Москва; Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. – 152 с.

130. Eker, O.F. Physics-based prognostic modelling of filter clogging phenomena / O.F. Eker, F. Camci, I.K. Jennions // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2016. – Vol. 75. – P. 395-412. DOI: 10.1016/j.ymsp.2015.12.011.

131. Huntley, G.M. Don't Take Filter Performance for Granted / G.M. Huntley, P.J. Grabowski, D.E. Pinsky // Opflow. – 2001. – Vol. 27. – № 12. – P. 1-15. DOI: 10.1002/j.1551-8701.2001.tb01629.x.

132. Dziubak, T. Experimental and Theoretical Research on Pressure Drop Changes in a Two-Stage Air Filter Used in Tracked Vehicle Engine / T. Dziubak, G. Boruta // *Separations*. – 2021. – Vol. 8. – № 6. – P. 71. DOI: 10.3390/separations8060071.
133. Ghaffour, N. Modeling of fouling phenomena in cross-flow ultrafiltration of suspensions containing suspended solids and oil droplets / N. Ghaffour // *Desalination*. – 2004. – Vol. 167. – P. 281-291. DOI: 10.1016/j.desal.2004.06.137.
134. Hill, E.C. Microbial Contamination and Associated Corrosion in Fuels, during Storage, Distribution and Use / E.C. Hill, G.C. Hill // *Advanced Materials Research*. – 2008. – T. 38. – C. 257-268. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.38.257.
135. Liao, Y. A review of membrane fouling and its control in algal-related membrane processes / Y. Liao, A. Bokhary, E. Maleki, B. Liao // *Bioresource Technology*. – 2018. – Vol. 264. – P. 343-358. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.06.102.
136. Manouchehri, M. A comprehensive review on state-of-the-art antifouling super(wetting and anti-wetting) membranes for oily wastewater treatment / M. Manouchehri // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2024. – Vol. 323. – P. 103073. DOI: 10.1016/j.cis.2023.103073.
137. Liu, S. A failure analysis of a generator unit shutdown due to short circuit of generator positive and negative collector rings / S. Liu, Z. Qian // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2021. – T. 647. – № 1. – C. 012020. DOI: 10.1088/1755-1315/647/1/012020.
138. Reay, D. Intensification of Separation Processes / D. Reay, C. Ramshaw, A. Harvey. – [Electronic resource] // *Process Intensification*. – Elsevier, 2013. – P. 205-249. – Mode of access: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780080983042000067> (date of access: 01.03.2026).
139. Liu, H. Optimization of dewatering process of concentrate pressure filtering by support vector regression / H. Liu, K. You // *Scientific Reports*. – 2022. – Vol. 12. – № 1. – P. 7135. DOI: 10.1038/s41598-022-11259-9.
140. Саламатов, В.И. Исследование фильтрующих свойств тканей из хлопковых и синтетических волокон / В.И. Саламатов // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. – 2020. – Т. 10. – № 2 (33). – С. 325-331.
141. Tudu, K. Enhanced recovery of low-grade iron ore by selective flocculation method / K. Tudu, S. Kumar, N. Mandre // *Journal of Dispersion Science and Technology*. – 2018. – Vol. 39. – № 8. – P. 1075-1079. DOI: 10.1080/01932691.2017.1382371.
142. Navvab Kashani, M. A new method for reconstruction of the structure of micro-packed beds of spherical particles from desktop X-ray microtomography images. Part A. Initial structure generation and porosity determination / M. Navvab Kashani, V. Zivkovic, H. Elekaei, M.J. Biggs // *Chemical Engineering Science*. – 2016. – Vol. 146. – P. 337-345. DOI: 10.1016/j.ces.2016.02.031.
143. Radziuk, D. Ultrasonic Mastering of Filter Flow and Antifouling of Renewable Resources / D. Radziuk, H. Möhwald // *ChemPhysChem*. – 2016. – Vol. 17. – № 7. – P. 931-953. DOI: 10.1002/cphc.201500960.

144. Арефьева, А. Ультразвуковая интенсификация процессов жидкостной десорбции в крупногабаритном технологическом оборудовании / А. Арефьева, Н. Лебедев, И. Симаков и др. // *Ультразвук: проблемы, разработки, перспективы*. – 2017. – С. 128-130.
145. Osasere Orumwense, F. Estimation of the wettability of coal from contact angles using coagulants and flocculants / F. Osasere Orumwense // *Fuel*. – 1998. – Vol. 77. – № 9-10. – P. 1107-1111. DOI: 10.1016/S0016-2361(97)00223-8.
146. Haselhuhn, H.J. Water chemistry analysis of an industrial selective flocculation dispersion hematite ore concentrator plant / H.J. Haselhuhn, J.J. Carlson, S.K. Kawatra // *International Journal of Mineral Processing*. – 2012. – Vols. 102-103. – P. 99-106. DOI: 10.1016/j.minpro.2011.10.002.
147. Mamghaderi, H. Investigation on the effects of chemical pretreatment on the iron ore tailing dewatering / H. Mamghaderi, S. Aghababaei, M. Gharabaghi et al. // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2021. – Vol. 625. – P. 126855. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2021.126855.
148. Zhu, C. Combined sludge conditioning with NaCl-cationic polyacrylamide-rice husk powders to improve sludge dewaterability / C. Zhu, F. Li, P. Zhang et al. // *Powder Technology*. – 2018. – Vol. 336. – P. 191-198. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.05.042.
149. Burkert, H. Coagulants and Flocculants / H. Burkert, J. Hartmann, G. Herth. – [Electronic resource] // *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry* / Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA ed. . – Weinheim, Germany : Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2016. – P. 1-14. – Mode of access: [https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/14356007.a11\\_251.pub2](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/14356007.a11_251.pub2) (date of access: 01.03.2026).
150. Fu, Q. The fate and impact of coagulants/flocculants in sludge treatment systems / Q. Fu, X. Liu, Y. Wu et al. // *Environmental Science: Water Research & Technology*. – 2021. – Vol. 7. – № 8. – P. 1387-1401. DOI: 10.1039/D1EW00165E.
151. Li, W. Enhanced iron recovery from magnetic separation of ultrafine specularite through polymer-bridging flocculation: A study of flocculation performance and mechanism / W. Li, S. Cheng, L. Zhou, Y. Han // *Separation and Purification Technology*. – 2023. – Vol. 308. – Enhanced iron recovery from magnetic separation of ultrafine specularite through polymer-bridging flocculation. – P. 122882. DOI: 10.1016/j.seppur.2022.122882.
152. Onyshchuk, O. To the study of the flocculation and coagulation process in the purification of water for industrial application / O. Onyshchuk // *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*. – 2023. – T. 317. – № 1. – С. 151-154. DOI: 10.31891/2307-5732-2023-317-1-151-154.
153. Cheremisinoff, N.P. Chemical Additives that Enhance Filtration / N.P. Cheremisinoff. – [Electronic resource] // *Handbook of Water and Wastewater Treatment Technologies*. – Elsevier, 2002. – P. 91-122. – Mode of access: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780750674980500061> (date of access: 01.03.2026).
154. Liu, W.-H. Beyond filterability: Understanding the complexities of sludge dewatering through typical coagulation and advanced oxidation / W.-H. Liu, H. Zhang, Y.-L. Zhang et al. // *Journal of Cleaner Production*. – 2023. – Vol. 429. – Beyond filterability. – P. 139520. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.139520.

155. Xia, R. A novel chitosan and polyferric sulfate composite coagulant for biogas slurry pretreatment by simultaneous flocculation and floatation: Performance and underlying mechanisms / R. Xia, W. Liu, L.D. Nghiem et al. // *Water Research*. – 2024. – Vol. 258. – A novel chitosan and polyferric sulfate composite coagulant for biogas slurry pretreatment by simultaneous flocculation and floatation. – P. 121781. DOI: 10.1016/j.watres.2024.121781.
156. Younker, J.M. Effect of adsorbent addition on floc formation and clarification / J.M. Younker, M.E. Walsh // *Water Research*. – 2016. – Vol. 98. – P. 1-8. DOI: 10.1016/j.watres.2016.03.044.
157. Xu, G. Flocculation and filtration performance of coal slime water: role of flocculant molecular weight and coagulants / G. Xu, L. Liu, D. Geng et al. // *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. – 2025. – Flocculation and filtration performance of coal slime water. – P. 1-13. DOI: 10.1080/19392699.2025.2492718.
158. Wang, D. Enhancing the dewatering of oil sands mature fine tailings by coagulation-flocculation and pressure filtration with tannic acid-mediated polymeric complex network / D. Wang, D. Wang, K. Wang et al. // *Separation and Purification Technology*. – 2024. – Vol. 335. – P. 126194. DOI: 10.1016/j.seppur.2023.126194.
159. Wang, D. Examining the effect of conditioning sequence of polymer flocculants and coagulants on sedimentation and filtration of oil sands tailings / D. Wang, D. Wang, H. Zhang et al. // *Minerals Engineering*. – 2025. – Vol. 228. – P. 109324. DOI: 10.1016/j.mineng.2025.109324.
160. Shrimali, K. Polysaccharide Depressants for the Reverse Flotation of Iron Ore / K. Shrimali, J.D. Miller // *Transactions of the Indian Institute of Metals*. – 2016. – Vol. 69. – № 1. – P. 83-95. DOI: 10.1007/s12666-015-0708-4.
161. Lubisi, T.P. Optimization of Reverse Cationic Flotation of Low-Grade Iron Oxide from Fluorspar Tails Using Taguchi Method / T.P. Lubisi, W. Nheta, F. Ntuli // *Arabian Journal for Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 43. – № 5. – P. 2403-2412. DOI: 10.1007/s13369-017-2703-z.
162. Dong, J. Effect of dextrin on flotation separation and surface properties of chalcopyrite and arsenopyrite / J. Dong, Q. Liu, S.H. Subhonqulov // *Water Science and Technology*. – 2021. – Vol. 83. – № 1. – P. 152-161. DOI: 10.2166/wst.2020.568.
163. Veloso, C.H. Investigation of the interaction mechanism of depressants in the reverse cationic flotation of complex iron ores / C.H. Veloso, L.O. Filippov, I.V. Filippova et al. // *Minerals Engineering*. – 2018. – Vol. 125. – P. 133-139. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.05.031.
164. Yang, Z. Coordination reaction triggered xanthan gum and Fe(III) self-assembly and adsorption on hematite surface for quartz-hematite flotation separation / Z. Yang, Q. Teng, Y. Han // *Journal of Molecular Liquids*. – 2023. – Vol. 390. – P. 123126. DOI: 10.1016/j.molliq.2023.123126.
165. Liu, A. Non-polar oil assisted DDA flotation of quartz II: Effect of different polarity oil components on the flotation of quartz / A. Liu, M. Fan, Z. Li, J. Fan // *International Journal of Mineral Processing*. – 2017. – Vol. 168. – Non-polar oil assisted DDA flotation of quartz II. – P. 25-34. DOI: 10.1016/j.minpro.2017.09.003.

166. Zhang, H. Selective adsorption mechanism of dodecylamine on the hydrated surface of hematite and quartz / H. Zhang, Z. Xu, W. Sun et al. // *Separation and Purification Technology*. – 2021. – Vol. 275. – P. 119137. DOI: 10.1016/j.seppur.2021.119137.
167. Liu, W. Novel polyhydroxy cationic collector N-(2,3-propanediol)-N-dodecylamine: Synthesis and flotation performance to hematite and quartz / W. Liu, X. Peng, W. Liu et al. // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2023. – Vol. 33. – Novel polyhydroxy cationic collector N-(2,3-propanediol)-N-dodecylamine. – № 1. – P. 115-122. DOI: 10.1016/j.ijmst.2022.09.020.
168. Wang, X. Understanding adsorption of amine surfactants on the solvated quartz (1 0 1) surface by a jointed Dreiding-ClayFF force field / X. Wang, W. Liu, W. Liu et al. // *Applied Surface Science*. – 2021. – Vol. 566. – P. 150737. DOI: 10.1016/j.apsusc.2021.150737.
169. Li, Y. Effect of Ammonium Salt on the Adsorption Behavior and Surface Characteristics of Sub-Bituminous Coal and Silica / Y. Li, Q. Nie, J. Chen et al. // *ACS Omega*. – 2019. – Vol. 4. – № 6. – P. 10455-10462. DOI: 10.1021/acsomega.9b00466.
170. Yang, B. Differential adsorption of a high-performance collector at solid–liquid interface for the selective flotation of hematite from quartz / B. Yang, W.-Z. Yin, J. Yao et al. // *Journal of Molecular Liquids*. – 2021. – Vol. 339. – P. 116828. DOI: 10.1016/j.molliq.2021.116828.
171. Sun, H. Investigation into the Adsorption Mechanism of a Novel Collector Cetyl Trimethyl Ammonium Chloride on the Surface of Hematite and Quartz / H. Sun, Y. Wang, J. Yao et al. // *Minerals*. – 2023. – Vol. 13. – № 10. – P. 1283. DOI: 10.3390/min13101283.
172. Liu, W. Adsorption of bis(2-hydroxy-3-chloropropyl) dodecylamine on quartz surface and its implication on flotation / W. Liu, W. Liu, S. Dai, B. Wang // *Results in Physics*. – 2018. – Vol. 9. – P. 1096-1101. DOI: 10.1016/j.rinp.2018.04.014.
173. Singh, B.P. The Effect of Flocculants and Surfactants on the Filtration Dewatering of Iron Ore Fines / B.P. Singh, L. Besra // *Separation Science and Technology*. – 1997. – Vol. 32. – № 13. – P. 2201-2219. DOI: 10.1080/01496399708000764.
174. Fu, X. Quantitative competitive adsorption characteristics of sodium humate and dodecylamine on hematite and quartz surfaces / X. Fu, Z. Niu, Y. Gao et al. // *Separation and Purification Technology*. – 2024. – Vol. 330. – P. 125504. DOI: 10.1016/j.seppur.2023.125504.
175. Haselhuhn, H.J. Aqueous Ions in Process Water and Cake Moisture During Iron Ore Filtration / H.J. Haselhuhn, S.K. Kawatra // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. – 2015. – Vol. 36. – № 6. – P. 370-376. DOI: 10.1080/08827508.2015.1004401.
176. Zhang, X. Flotation of Iron Ores: A Review / X. Zhang, X. Gu, Y. Han et al. // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. – 2021. – Vol. 42. – Flotation of Iron Ores. – № 3. – P. 184-212. DOI: 10.1080/08827508.2019.1689494.
177. Cheng, W. Hydrophobic Agglomeration of Fine Pyrite Particles Induced by Flotation Reagents / W. Cheng, Z. Deng, X. Tong, T. Lu // *Minerals*. – 2020. – Vol. 10. – № 9. – P. 801. DOI: 10.3390/min10090801.
178. Gao, S. Parameters of Collision and Adhesion Process Between a Rising Bubble and Quartz in Long-Chain Amine Solution and Their Correlation with Flotation / S. Gao, B. Li, L. Ma et al. // *Minerals*. – 2024. – Vol. 14. – № 11. – P. 1129. DOI: 10.3390/min14111129.

179. Filippov, L.O. An overview of the beneficiation of iron ores via reverse cationic flotation / L.O. Filippov, V.V. Severov, I.V. Filippova // *International Journal of Mineral Processing*. – 2014. – Vol. 127. – P. 62-69. DOI: 10.1016/j.minpro.2014.01.002.
180. ГОСТ 21043-87 Руды железные и концентраты. Метод определения внешней удельной поверхности. — Введ. 1988-01-01 — Москва : Издательство стандартов, 1987 — 24 с.
181. Руды железные, концентраты, агломераты и окатыши : метод определения влаги : ГОСТ 12764-73. — Введ. 1974-01-01. — М. : Изд-во стандартов, 1973. — 4 с. — (Межгосударственный стандарт).
182. Reichel, V. Single crystalline superstructured stable single domain magnetite nanoparticles / V. Reichel, A. Kovács, M. Kumari et al. // *Scientific Reports*. – 2017. – Vol. 7. – № 1. – P. 45484. DOI: 10.1038/srep45484.
183. Joni, I.M. Characteristics of crystalline silica ( $\text{SiO}_2$ ) particles prepared by simple solution method using sodium silicate ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) precursor / I.M. Joni, L. Nulhakim, M. Vanitha, C. Panatarani // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Т. 1080. – С. 012006. DOI: 10.1088/1742-6596/1080/1/012006.
184. Rafi, M.M. Synthesis, characterization and magnetic properties of hematite ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) nanoparticles on polysaccharide templates and their antibacterial activity / M.M. Rafi, K.S.Z. Ahmed, K.P. Nazeer et al. // *Applied Nanoscience*. – 2015. – Vol. 5. – № 4. – P. 515-520. DOI: 10.1007/s13204-014-0344-z.
185. Хиеп, Н.Т. Влияние условий механической обработки на дисперсность частиц графитовой смеси / Н.Т. Хиеп, Ю.В. Конюхов, И.А. Введенская, А.А. Васильев // *Глобальная энергия*. – 2020. – Т. 26. – № 3. – С. 90-100.
186. Suman, S.K. Reverse flotation studies on iron ore slime by the synergistic effect of cationic collectors / S.K. Suman, S. Kumar // *Separation Science and Technology*. – 2020. – Vol. 55. – № 9. – P. 1702-1714. DOI: 10.1080/01496395.2019.1604757.
187. Sharma, R. Effect of open-air and hot-air oven drying on interparticle bonding of iron ore agglomerates / R. Sharma, D.S. Nimaje // *Drying Technology*. – 2021. – Vol. 39. – № 3. – P. 348-357. DOI: 10.1080/07373937.2020.1863423.
188. De Los Arcos, T. Review of infrared spectroscopy techniques for the determination of internal structure in thin  $\text{SiO}_2$  films / T. De Los Arcos, H. Müller, F. Wang et al. // *Vibrational Spectroscopy*. – 2021. – Vol. 114. – P. 103256. DOI: 10.1016/j.vibspec.2021.103256.
189. Gui-Long, X. Preparation and Characterization of Raspberry-like  $\text{SiO}_2$  Particles by the Sol-Gel Method / X. Gui-Long, D. Changyun, L. Yun et al. // *Nanomaterials and Nanotechnology*. – 2011. – Vol. 1. – P. 21. DOI: 10.5772/45813.
190. Huang, X.B. Contact angle of water on iron ore fines: Measurement and analysis / X.B. Huang, X. X.W., J.J. Song et al. // *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*. – 2015. – Vol. 51. – Contact angle of water on iron ore fines. – № 1. – P. 33-40. DOI: 10.2298/JMMB140903010H.

191. Tang, K. Measurement for Contact Angle of Iron Ore Particles and Water / K. Tang, X. Lv, S. Wu et al. // *ISIJ International*. – 2018. – Vol. 58. – № 3. – P. 379-400. DOI: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-424.
192. Wang, D. Effects of Al(III) Ions at Magnetite Flotation from Quartz by Dodecylamine Al(III) / D. Wang, M. Tang, Y. Wu, X. Niu // *Minerals*. – 2022. – Vol. 12. – № 5. – P. 613. DOI: 10.3390/min12050613.
193. Illés, E. The role of variable surface charge and surface complexation in the adsorption of humic acid on magnetite / E. Illés, E. Tombácz // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2003. – Vol. 230. – № 1-3. – P. 99-109. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2003.09.017.
194. Konuk, M. Modeling Charge Redistribution at Magnetite Interfaces in Empirical Force Fields / M. Konuk, K. Sellschopp, G.B. Vonbun-Feldbauer, R.H. Meißner // *The Journal of Physical Chemistry C*. – 2021. – Vol. 125. – № 8. – P. 4794-4805. DOI: 10.1021/acs.jpcc.0c10338.
195. Прохоров, К. Структура тонкой пленки электрохимически активированной воды на поверхности пирита / К. Прохоров, М. Чибисова, А. Шривастава // *Горная Промышленность*. – 2025. – С. 63. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-4S-63-67.
196. Чылбак-оол, Е.Д. Применение флокулянтов для повышения эффективности фильтрования железорудных концентратов с низким содержанием SiO<sub>2</sub> / Е.Д. Чылбак-оол, Ю.В. Конюхов, У.В. Дмитракова и др. // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2025. – № 10. – С. 37-47. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2025\_10\_0\_37.
197. Красный Б. Л. Химический способ восстановления фильтрующей способности керамических фильтрующих элементов / Красный Б. Л., Зимбовский И. Г., Дмитракова У. В., Чылбак-Оол Е. Д. // *Черные металлы*. – 2021. – № 11. – С. 4-9. DOI: 10.17580/chm.2021.11.01.
198. Корнев, В. Комплексообразование железа (III) с комплексонами, производными иминодиуксусной кислоты, и дикарбоновыми кислотами в водных растворах / В. Корнев, Н. Пёревощикова // *Химическая физика и мезоскопия*. – 2000. – Т. 2. – № 1. – С. 29-37.
199. Патент № 2830008 С1 Российская Федерация, МПК В01D 33/44, В01D 33/21. Способ глубокой кислотной регенерации керамического фильтрующего элемента и композиция для его осуществления, содержащая ОЭДФ-кислоту : № 2024114748 : заявл. 30.05.2024 : опубл. 11.11.2024 / Б. Л. Красный, А. Б. Красный, И. Г. Зимбовский [и др.]; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "Научно-технический центр «Бакор». – EDN DNTRVG.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А – АКТ ИСПЫТАНИЙ

## АКТ

Промышленных испытаний по определению влияния полимеров на процесс фильтрации флотационного магнетитового концентрата

15.02.2025 г.

Настоящий Акт составлен о том, что согласно программе «Проведение заверочных промышленных испытаний на вакуум-фильтрах КДФ-90 в период производства офлюсованных железорудных окатышей из флотоконцентрата МГОК с м.д. железа не менее 70,3% при использовании безмембранных фильтрующих элементов, ПАВ-влагопонижителей и флокулянтов при использовании вакуумной системы ФОК и более производительного вакуум-насоса на фабрике окомкования АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева», были проведены промышленные испытания по определению влияния флокулянтов на процесс фильтрования.

**Место и время проведения испытаний:** АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева», период с 18.01.2025 г. по 31.01.2025 г.

**Испытуемый объект:** Полимерный коагулянт с высокой флокулирующей способностью, имеющий катионный характер с высокой плотностью заряда на основе полидиаллилдиметиламмония хлорида.

**Цель испытаний:** Определение эффективности образца полимера в целях повышения производительности керамических вакуум-фильтров при фильтровании флотационного железорудного концентрата.

**Применяемое оборудование и условия испытаний:** Испытания проводились на действующих промышленных керамических вакуум-фильтрах КДФ-90, установленных на участке СФ и СО ОМ № 3 АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева».

Дозирование реагента производилось в питающий трубопровод фильтра при помощи станции приготовления и дозирования СПФ-500.

Во время испытаний на участок фильтрации поступал магнетитовый флотационный концентрат, обогащенный в цехе КДО АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева», для производства окатышей с массовой долей железа не менее 70,3 %.

**Заключение по результатам испытаний:** Результаты испытаний показали, что применение испытуемого полимера позволяет повысить производительность фильтров КДФ-90 на 5-10 %, при влажности получаемого осадка до 10,2% и оптимальном расходе реагента в диапазоне от 25 до 30 г/т в зависимости от свойств исходного питания.

Управляющий директор  
АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева»



## ПРИЛОЖЕНИЕ Б – СВИДЕТЕЛЬСТВО О РЕГИСТРАЦИИ ПАТЕНТА

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

**№ 2830008**

**СПОСОБ ГЛУБОКОЙ КИСЛОТНОЙ РЕГЕНЕРАЦИИ  
КЕРАМИЧЕСКОГО ФИЛЬТРУЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА  
И КОМПОЗИЦИЯ ДЛЯ ЕГО ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ,  
СОДЕРЖАЩАЯ ОЭДФ-КИСЛОТУ**

Патентообладатель: *Общество с ограниченной ответственностью  
"Научно-технический центр "Бакор" (RU)*

Авторы: *Красный Борис Лазаревич (RU), Красный Александр  
Борисович (RU), Зимбовский Илья Геннадьевич (RU), Чылбак-  
оол Евгений Джамильевич (RU), Стрелецкий Виталий  
Викторович (RU)*

Заявка № 2024114748

Приоритет изобретения 30 мая 2024 г.

Дата государственной регистрации  
в Государственном реестре изобретений  
Российской Федерации 11 ноября 2024 г.

Срок действия исключительного права  
на изобретение истекает 30 мая 2044 г.

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

документ подписан электронной подписью  
Сертификат: 0092e70a0c30c5e42610700ca2006  
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**  
Действителен с 10.03.2024 по 03.10.2025

*Ю.С. Зубов*

