

ОТЗЫВ

официального оппонента

**кандидата технических наук Рябкова Егора Даниловича
на диссертационную работу Гафарова Решата Решатовича на тему:
«Ионообменно-сорбционная очистка сточных вод от ионов никеля и
меди отходом отбелной глины»,**
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по научной специальности 1.4.10. Коллоидная химия

Актуальность темы диссертационной работы

Вопросы рационального природопользования и снижения антропогенной нагрузки на окружающую среду в настоящее время являются одними из наиболее приоритетных. В этом контексте проблема очистки многокомпонентных сточных вод, содержащих ионы тяжелых металлов и органические красители, занимает ключевое место. Традиционные реагентные методы часто связаны с образованием большого объема осадков, а применение высокоэффективных сорбентов, таких как активированные угли, ограничено их высокой стоимостью.

В связи с этим, разработка новых, экономически доступных и экологически безопасных сорбционных материалов на основе промышленных отходов является крайне актуальной задачей. Особый интерес представляет использование отхода маслоэкстракционной промышленности – отработанной отбелной глины, которая образуется в значительных количествах и на данный момент не находит широкого применения. Диссертационная работа Гафарова Р.Р., направленная на изучение коллоидно-химических основ модификации отработанной отбелной глины и применение полученного сорбционного материала для очистки сточных вод, несомненно, является **актуальной как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения.**

Общая характеристика работы

Диссертация построена традиционным образом и состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 163 наименований и 6 приложений. Работа изложена на 187 страницах, содержит 91 рисунок и 66 таблиц.

Во введении автор обосновывает актуальность исследования, формулирует цель и задачи работы, представляет научную новизну, теоретическую и практическую значимость, а также положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор литературы, в котором рассмотрены современные методы очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов и красителей, с акцентом на адсорбционные процессы. Особое внимание

уделено использованию глинистых минералов и отходов на их основе в качестве сорбентов. Автором проанализированы факторы, влияющие на эффективность сорбции, и обоснована перспективность использования термически модифицированной отработанной отбелной глины.

Во второй главе подробно описаны объекты и методы исследования. Приведена информация об исходных материалах. Описаны современные физико-химические методы анализа: рентгенофазовый анализ, инфракрасная спектроскопия, термогравиметрический анализ, сканирующая электронная микроскопия с энергодисперсионным анализом, метод БЭТ для определения удельной поверхности, лазерная гранулометрия, а также методы анализа жидких фаз (фотоколориметрия, атомно-абсорбционная спектроскопия). Широкий спектр использованных методов обеспечивает высокую достоверность полученных результатов.

Третья глава посвящена исследованию физико-химических свойств исходной и термически модифицированной ООГ. Автором детально изучено влияние температуры термообработки (250, 350, 450°C) на структурные, фазовые и текстурные характеристики материала. Установлено, что термообработка при 350°C приводит к формированию развитой мезопористой структуры с сохранением углеродного слоя, образующегося в результате карбонизации органических остатков. С помощью РФА и элементного анализа доказано, что в образце ООГ350 содержится около 33,6 % аморфной углеродной фазы, что подтверждает формирование композитного материала «глинистая матрица – аморфный углерод».

В четвертой главе рассмотрены коллоидно-химические особенности взаимодействия сорбента с загрязнителями. Особый интерес представляют результаты исследования электроповерхностных свойств. Показано, что исходный ζ -потенциал ООГ350 в нейтральной среде составляет -29,2 мВ, что обусловлено диссоциацией поверхностных гидроксильных групп.

Пятая глава посвящена сорбционным исследованиям. Автором проведена серия экспериментов по извлечению ионов Ni^{2+} , Cu^{2+} и красителя метиленового голубого из модельных растворов. Доказано, что образец ООГ350 обладает наивысшей сорбционной емкостью: для Ni^{2+} – 0,43 ммоль/г, для Cu^{2+} – 0,41 ммоль/г, для МГ – 0,28 ммоль/г. Проведен детальный анализ изотерм адсорбции с использованием моделей Ленгмюра, Фрейндлиха и Дубинина-Радужкевича. Анализ термодинамических параметров подтверждает самопроизвольность процесса и его смешанный диффузионно-кинетический контроль. Кинетические исследования, включая расчет критерия Био позволили установить, что лимитирующей стадией является смешанная диффузия с преобладанием внутренней диффузии, особенно для ионов Cu^{2+} .

Особого внимания заслуживают исследования ионообменного механизма. Экспериментально доказано, что термоактивация при 350°C приводит к выходу структурных катионов (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) из межслоевого пространства глины в раствор, что подтверждается

увеличением их концентрации в фильтрате. Это создает дефектные участки и активные центры для последующего поглощения ионов Ni^{2+} и Cu^{2+} , что объясняет высокую эффективность ионообменной составляющей сорбционного процесса.

В шестой главе обобщены результаты практической реализации работы. Приведены данные о промышленной апробации сорбента ООГ350 для очистки реальных сточных вод лакокрасочного производства ООО «Белрегионцентр». Показано, что применение разработанного материала позволяет достичь остаточных концентраций ионов тяжелых металлов ниже установленных ПДК. Разработана принципиальная технологическая схема процесса очистки. Важным результатом является предложенный способ утилизации отработанного сорбционного материала в качестве пигмента-наполнителя в производстве лакокрасочных материалов, что подтверждено испытаниями на предприятии ООО «ГЭКОР+». Рассчитанный предотвращенный эколого-экономический ущерб для водного объекта составляет около 1 млн руб./год.

В заключении представлены обобщенные выводы диссертационного исследования, сформулированы рекомендации и перспективы дальнейших исследований.

Автореферат полностью отражает содержание диссертационной работы.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, обладают достаточной степенью обоснованности. Они основываются на данных, полученных с использованием современных физико-химических методов исследования, опираются на общепризнанные труды Зубехина Алексея Павловича, Бутта Юрия Михайловича, Торопова Никиты Александровича и других ученых и согласуются с ними. Отсутствуют логические ошибки при формулировке положений, выводов и рекомендаций.

Новизна научных положений, выводов и рекомендаций выражается в следующем:

Автором установлены закономерности модифицирования сорбционного материала на основе отработанной отбеленной глины путем его термоактивации при температурах до 350 °С, заключающиеся в контролируемом термическом разложении гидроксильных групп и частичной деструкции межатомных связей кристаллической решетки монтмориллонита. Это инициирует направленное выщелачивание катионов (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) с образованием дополнительных дефектных участков и координационно-ненасыщенных центров, что обеспечивает повышение сорбционной емкости до 1,7 раза для ионов Ni^{2+} и Cu^{2+} и до 1,3 раза для метиленового голубого. Установлена корреляция между

степенью термической деструкции решетки и селективностью образующихся центров к целевым ионам.

Соискателем установлены коллоидно-химические закономерности изменения параметров двойного электрического слоя при сорбции ионов Cu^{2+} и Ni^{2+} на термически модифицированной отбеленной глине. Показано, что специфическая адсорбция катионов с образованием поверхностных комплексов типа $\equiv\text{Si}-\text{OCu}^+$ инициирует перераспределение заряда в системе «твердая фаза – раствор». Процесс включает последовательные стадии: хемосорбцию в плоскости Штерна, компенсацию объемного заряда и перезарядку поверхности, что приводит к смене знака ζ -потенциала на границе скольжения. Диапазон изменения ζ -потенциала составляет от $-29,2$ мВ (при pH 6,5–7,5) до $+11,6$ мВ в результате перезарядки поверхности при сорбции ионов Cu^{2+} и Ni^{2+} .

Автор выявил, что для всех исследованных сорбционных систем значения критерия Био (B_i) находятся в диапазоне 1,7–2,3, что соответствует области смешанного диффузионного контроля. При этом для Cu^{2+} ($B_i = 2,3$) вклад внутренней диффузии возрастает, тогда как для метиленового голубого ($B_i = 1,7$) и Ni^{2+} ($B_i = 1,9$) существенную роль сохраняет внешняя диффузия.

Теоретическая и практическая значимость работы

Автором предложены теоретические положения, описывающие механизм модификации отработанной отбеленной глины в процессе её термоактивации при температуре до 350 °С. Данный механизм включает контролируемое термическое разложение гидроксильных групп и частичное разрушение межзатомных связей в кристаллической структуре монтмориллонита, что приводит к выщелачиванию межслоевых катионов и формированию дополнительных дефектных участков, а также координационно-ненасыщенных центров на поверхности материала.

Соискателем разработан эффективный сорбционный материал на основе отхода отбеленной глины, обожженный при 350 °С. Обоснованы рациональные условия очистки сточных вод от ионов Ni^{2+} , Cu^{2+} и красителя метиленового голубого: доза сорбента – $1,5$ г/дм³, температура процесса – 30 °С. Разработана принципиальная технологическая схема очистки, успешно прошедшая полупромышленные испытания на базе ООО «Белрегионцентр». Дополнительно предложен способ утилизации отработанного сорбционного материала в качестве пигмента-наполнителя при производстве лакокрасочной продукции.

Достоверность и обоснованность результатов и выводов не вызывает сомнений. Они базируются на большом объеме экспериментальных данных, полученных с использованием современных сертифицированных приборов и методик. Результаты **апробированы** в полупромышленных условиях и согласуются с данными других авторов. Материалы диссертации прошли широкую апробацию на российских и международных конференциях, опубликованы в 14 научных работах, включая 5 статей в журналах из перечня ВАК РФ, получено 1 свидетельство о регистрации ноу-хау.

При ознакомлении с материалами диссертационной работы Гафарова Р.Р. возникли следующие вопросы и замечания:

1. В работе установлена перезарядка поверхности сорбента при сорбции ионов Cu^{2+} и Ni^{2+} , что проявляется в смене знака ζ -потенциала с отрицательного на положительный. Могли бы Вы пояснить, почему для достижения изоэлектрического состояния требуются разные концентрации ионов меди и никеля? Какие особенности строения гидратных оболочек этих катионов и их способности к специфической адсорбции с образованием поверхностных комплексов типа $\equiv\text{Si}-\text{OCu}^+$ обуславливают различия в их влиянии на электрокинетический потенциал?

2. Термоактивация при 350°C приводит к вымыванию межслоевых катионов из кристаллической решётки монтмориллонита. Каким образом этот процесс сказывается на структурно-механических свойствах дисперсной системы и на формировании двойного электрического слоя на межфазной границе? Учитывалось ли влияние ионной силы раствора на агрегативную устойчивость суспензий сорбента в ходе кинетических экспериментов?

3. При исследовании кинетики сорбции использована модель Бойда для расчёта критерия Био. Принятая толщина диффузионной плёнки $\delta = 50$ мкм оценивалась исходя из типичных гидродинамических условий. Как изменение интенсивности перемешивания, размера частиц и формы агрегатов может повлиять на соотношение внешне- и внутридиффузионного сопротивления? Каким образом эти факторы следует учитывать при масштабировании процесса?

4. В работе предложен комплексный механизм очистки, включающий ионный обмен, сорбцию и реагентное осаждение. Для метиленового голубого – катионного красителя – показана высокая эффективность удаления. Доминирует ли в этом случае электростатическое взаимодействие с отрицательно заряженной поверхностью сорбента или существенную роль играют также π - π -взаимодействия с ароматическими фрагментами углеродной фазы и водородные связи с функциональными группами глинистой матрицы? Имеются ли экспериментальные подтверждения в пользу того или иного механизма?

Отмеченные замечания не носят принципиального характера и не снижают общую положительную оценку диссертационной работы.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней

Диссертация Гафарова Решата Решатовича является завершённой научно-квалификационной работой, в которой содержится **решение актуальной научной задачи**, заключающейся в установлении коллоидно-химических закономерностей ионообменно-сорбционной очистки сточных вод от ионов никеля, меди и красителя метиленового голубого с использованием термически модифицированного отхода отбелной глины. Полученные результаты имеют значение для **развития соответствующей**

отрасли науки коллоидной химии (технические науки), в частности для понимания механизмов сорбции на гетерогенных композитных материалах.

Диссертационная работа **Гафарова Решата Решатовича «Ионообменно-сорбционная очистка сточных вод от ионов никеля и меди отходом отбелочной глины»** по актуальности исследуемых проблем, научной новизне, теоретической и практической значимости, степени обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, числу публикаций полностью соответствует критериям (пп. 9-14) «Положения о присуждении ученых степеней» (Постановление Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 в действующей редакции), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, **Гафаров Решат Решатович**, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 1.4.10. Коллоидная химия.

Официальный оппонент:

Кандидат технических наук (специальность 2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий, доцент кафедры наноразмерных систем и поверхностных явлений имени С. С. Воюцкого ФГБОУ ВО «МИРЭА-Российский технологический университет», ИТХТ им. М.В. Ломоносова

Рябков Егор Данилович
«09» апреля 2026 г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования ФГБОУ ВО «МИРЭА - Российский технологический университет», ИТХТ им. М.В. Ломоносова

Адрес: 119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78, стр. 4

Телефон: +79857285737

E-mail: yegordryabkov@gmail.com

Личную подпись официального оппонента Е.Д. Рябкова заверяю:

Подпись руки

УДОСТОВЕРЯЮ

Начальник Управления кадр

