

На правах рукописи



Иевлева Елена Сергеевна

**ПЕРЕРАБОТКА ШЛАМОВЫХ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА
ГОФРОТАРЫ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ВОДООЧИСТКЕ**

4.3.4. Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства
и переработки древесины

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Белгород – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования "Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова".

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Свергузова Светлана Васильевна

Официальные оппоненты: **Глушанкова Ирина Самуиловна**, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Пермский национальный исследовательский политехнический университет", профессор кафедры охраны окружающей среды;

Никифорова Татьяна Евгеньевна, доктор химических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Ивановский государственный химико-технологический университет", профессор кафедры технологии пищевых продуктов и биотехнологии.

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Уральский государственный лесотехнический университет", г. Екатеринбург.

Защита диссертации состоится «18» июня 2026 года в 13 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.2.312.10, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», по адресу: 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68, зал заседаний Ученого совета А-330.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписями, заверенными печатью, просим направлять по адресу: 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68, ауд. А-330, Ученый совет.

В отзыве указывается фамилия, имя, отчество лица, предоставившего отзыв, его почтовый адрес, телефон и адрес электронной почты (при наличии), наименование организации и должность с указанием структурного подразделения (п. 28 Положения о присуждении ученых степеней), специальность по защите диссертации, дата визирования отзыва, печать.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» и на сайте <https://www.kstu.ru/servlet/contentblob?id=584586>.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Екатерина Игоревна
Байгильдеева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Деревья и изделия из них сопровождают человека с древних времен. В нашей стране ежегодно заготавливается и перерабатывается огромное количество древесины. В соответствии с данными отраслевой формы отчетности объем заготовки древесины фактически составляет 225 млн м³/год. Важное место в продукции деревообработки занимают бумага и картон.

В России существует 93 предприятия, принимающих на утилизацию использованную бумагу и картон. Одним из таких предприятий является ООО "Гофротара" (г. Белгород).

Макулатура имеет все возрастающее значение в процессе изготовления бумаги, 1 т макулатуры заменяет 3 – 4 м³ стволовой древесины. При этом макулатура является дешевым сырьем, а строительство завода данной производительности на макулатуре обходится в 1,5 раза дешевле, чем на древесном сырье. Доля макулатуры в твердых коммунальных отходах (ТКО) составляет около 30 %.

Учитывая, что в настоящее время около 40 % перерабатываемой древесины поступает в отвал, создание новых способов перерабатывания отходов деревообработки является **актуальной задачей**.

К одним из не востребуемых в настоящее время отходов деревопереработки относится шламовый отход производства гофротары (ШОПГ), который в значительных количествах образуется на предприятиях, занимающихся переработкой макулатуры. Поскольку ШОПГ содержит большое количество целлюлозных волокон, в высушенном и модифицированном виде он может быть использован для получения сорбционных материалов (СМ), пригодных к применению в практике водоочистки.

Работа выполнялась при финансовой поддержке гранта в рамках Программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова на тему "Разработка многофункционального сорбционного материала на основе органосодержащих отходов для извлечения широкого спектра загрязнителей из сточных вод" по договору № А– 60/20 от 15.01.2020 г.

Степень разработанности темы. В процессе диссертационного исследования были проанализированы работы, посвященные переработке целлюлозосодержащих материалов, получаемых из отходов переработки древесины. Среди соотечественников, которые внесли значительный вклад в развитие теории и практики по переработке целлюлозосодержащих отходов, можно выделить работы Шайхиева И.Г., Никифоровой Т.Е., Ольшанской Л.Н., Политаевой Н.А. и др.

Целью исследования являлась разработка научных и технологических основ получения эффективного СМ на основе целлюлозосодержащего отхода производства гофротары.

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

1. Разработка способа получения СМ из шлама производства гофротары и выбор рациональных условий ведения процесса.
2. Исследование физико-химических и сорбционных свойств полученных СМ в растворах, содержащих ионы тяжелых металлов (ИТМ) и краситель марки "Метиленовый голубой" и выбор оптимальных параметров водоочистки.
3. Выявление механизма сорбционных процессов на полученных СМ по ионам Ni²⁺, Cu²⁺ и красителя "Метиленовый голубой".
4. Определение эффективности очистки модельных растворов с помощью

разработанных СМ при различных технологических условиях.

5. Разработка технологической схемы очистки, проведение расчетов основных аппаратов, оценка предотвращенного экологического ущерба от внедрения различных рекомендаций.

Предмет и объект исследований. Предметом исследования является технология переработки ШОПГ в СМ. Объектом исследований является ШОПГ.

Научная новизна результатов работы.

1. Впервые исследована возможность использования для очистки воды от ионов меди и никеля и красителя "Метиленовой голубой" нативного и термообработанного ШОПГ. Определено, что нативный СМ обладает максимальной сорбционной емкостью по отношению к ионам Cu^{2+} – 0,616 ммоль/г, Ni^{2+} – 0,78 ммоль/г и красителю "Метиленовому голубому" в пределах 1,17 ммоль/г.

2. Выявлено, что термообработка ШОПГ способствует увеличению сорбционной емкости по отношению к ионам Cu^{2+} в 2,53 раза, Ni^{2+} в 2,28 раз и красителю "Метиленовому голубому" в 1,33 раза.

3. Установлены оптимальные условия для проведения процессов адсорбции ионов Cu^{2+} , Ni^{2+} и красителя "Метиленовой голубой" термомодифицированным ШОПГ при использовании многофакторного планирования эксперимента с помощью ротatableльного плана второго порядка ЦКРП-2ⁿ полнофакторного эксперимента – длительность контакта СМ с водной средой 20 мин; доза сорбента – 4 г/дм³; температура водной среды – 40 °С.

Теоретическая и практическая значимость работы. Впервые определены сорбционные свойства ШОПГ как СМ, установлены механизмы сорбционного взаимодействия исследуемых ИТМ и красителя, получены значения эффективности очистки модельных растворов и промышленных сточных вод (СВ) от названных загрязнений.

Практическая значимость работы заключается в разработке технологии получения СМ на основе ШОПГ; доказана его эффективность в процессах водоочистки; разработана принципиальная технологическая схема процесса очистки СВ с использованием разработанного СМ, определен предотвращенный экологический ущерб при использовании разработанного сорбента.

Методы и методология исследования. В работе использованы рентгеноструктурный анализ, электронная микроскопия, энергодисперсионный анализ, метод низкотемпературной адсорбции азота, а также фотоэлектроколориметрический и весовой анализы.

Положения, выносимые на защиту:

1. Способ получения СМ на основе ШОПГ.
2. Сорбционные свойства полученного СМ и оптимальные параметры проведения процесса сорбции в зависимости от дозы сорбента, длительности контакта, состава модельных растворов.

3. Характер механизма процесса адсорбции ИТМ и красителя "Метиленового голубого" СМ.

4. Зависимость эффективности очистки вод от ИТМ и красителя "Метиленового голубого" СМ от дозы СМ, длительности контакта, температуры водной среды, температуры термообработки шламового отхода.

5. Способ утилизации обработанного СМ в производстве строительных

керамических изделий

6. Технологическая схема очистки СВ от ионов металлов и красителя метиленового голубого СМ на основе ШОПГ.

Достоверность результатов исследования обеспечивается использованием аттестованных методик измерения основных определяемых параметров, применением современного оборудования, прошедшего поверку и удовлетворяющего основным метрическим характеристикам.

Личный вклад автора заключался в проведении экспериментов, анализе полученных данных и интерпретации результатов, разработке плана экспериментальных испытаний результатов в производственных условиях, в подготовке основных публикаций по выполненной работе, включая статьи, доклады и презентации на конференциях и семинарах. Автору принадлежат основные идеи работ, опубликованных в соавторстве.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Результаты диссертации соответствуют паспорту научной специальности 4.3.4. Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины по п. 4 "Технология и продукция в производстве: лесохозяйственном, лесозаготовительном, лесопильном, деревообрабатывающем, целлюлозно-бумажном, механическом и сопутствующих им производствах".

Апробация работы. Основные материалы и результаты диссертационного исследования докладывались на международных и всероссийских конференциях: Международная научная конференция "Рациональное использование природных ресурсов и переработка техногенного сырья: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, химия и биотехнология" (Алушта, 2022, 2021); Всероссийская научная конференция с международным участием "Инновационные технологии защиты окружающей среды в современном мире" (Казань, 2021); Всероссийская научная конференция с международным участием "Современные технологии в области защиты окружающей среды и техносферной безопасности" (Казань, 2023).

Публикации. По теме диссертационного исследования автором опубликовано 12 печатных работ, в том числе 3 статьи в рецензируемых научных изданиях из Перечня ВАК и 2 статьи в изданиях, входящих в реферативную базу Scopus, 7 публикаций – в прочих изданиях.

Структура и объём диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 171 странице машинописного текста, включает 106 рисунков, 67 таблиц. Список литературы содержит 148 наименований работ отечественных и зарубежных авторов.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы исследования, определены цели и задачи, представлены научная новизна, практическая значимость диссертационной работы.

В первой главе рассмотрены направления переработки древесины, проблемы образования и использования отходов деревопереработки. Представлена оценка бумаги и картона как части продукции деревообработки. Отмечено, что макулатура является крупным резервом вторичных целлюлозных волокон, используемых в качестве полноценного заменителя сырья в производстве бумаги и картона. Использование макулатуры приводит к значительному сокращению расхода древесины

и, следовательно, к сохранению лесных богатств.

Особенно актуально стоит вопрос переработки невостребованных отходов деревообработки, таких как целлюлозосодержащий шлам от переработки макулатуры. Наличие в его составе целлюлозы и лигнина, обладающих множеством функциональных групп, позволит использовать ШОПГ в качестве СМ для удаления различных загрязняющих веществ из водных сред, внося существенный вклад в развитие технологий переработки древесины и решение задачи утилизации отходов.

В результате анализа современных литературных источников обнаружено, что исследования сорбционных свойств материала ШОПГ не проводились.

Во второй главе описаны объекты, методы и методики, а также аналитическое оборудование, используемые при проведении эксперимента. Для исследований химического состава, физико-химических и сорбционных свойств ШОПГ были использованы термический, рентгенофазовый, энергодисперсионный, электронно-микроскопический, колориметрический анализы, статистическая обработка данных.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований физико-химических свойств ШОПГ. На первом этапе определено, что основная масса частиц шлама имеет размеры менее 25 μm .

Изложены основные характеристики физико-химических свойств и состава ШОПГ: насыпная плотность материала ($\rho_{\text{нас}}$) составляет 0,1193 г/см³; потери при прокаливании (п.п.п.) – 16,16 %; влажность начальная (w) – 92,7 %; рН фильтрата – 5,19. Структуру материала составляют хаотично переплетенные волокна длиной до 3 мм, толщиной не более 0,25 мм (рисунок 1).

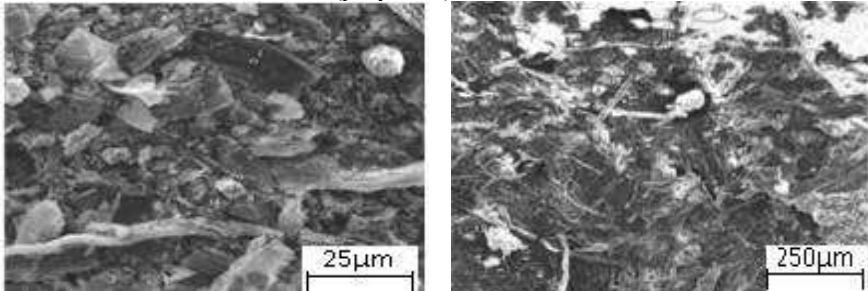


Рисунок 1 – Внешний вид ШОПГ

Наличие у целлюлозы, составляющей основную часть ШОПГ, многочисленных ОН-групп, делает возможным ее взаимодействие со многими химическими веществами как по месту разрыва О–Н связей, так и за счет возникновения водородных связей между атомами водорода, входящими в молекулу целлюлозы и атомами кислорода соединений.

Четвертая глава посвящена оценке влияния различных факторов на эффективность очистки и сорбционным исследованиям.

Первоначально проверку возможности использования ШОПГ для очистки загрязненных вод осуществляли на примере красителя "Метиленовый голубой" (МГ). Данный краситель был выбран, как хорошо изученное вещество, часто используемое при исследованиях сорбционных свойств материалов. Установлено, что на эффективность очистки влияют доза ШОПГ, температура раствора и длительность

перемешивания (рисунки 2 – 4).

В дальнейшем осуществлялось термическое воздействие на ШОПГ в интервале температур от 100 до 800 °С с шагом 50 °С. Термообработанные образцы СМ также исследовались на изменение эффективности очистки от МГ. Выявлено, что наибольшее повышение эффективности удаления красителя (24 %) наблюдалось для образца ШОПГ, термообработанного при 250 °С (ШОПГ₂₅₀); в этой связи все последующие эксперименты проводились с названным образцом СМ.

Следующий этап экспериментальной работы заключался в построении изотерм адсорбции МГ нативным и термообработанным при 250 °С образцами ШОПГ (рисунок 5).

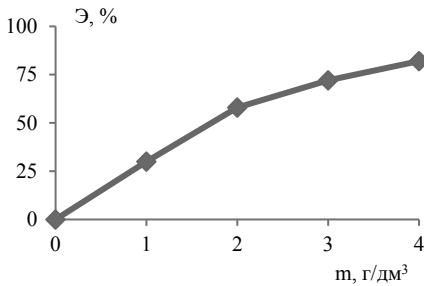


Рисунок 2 – Влияние дозы ШОПГ на эффективность очистки от МГ; ($C_{исх} = 10 \text{ мг/дм}^3$; $\tau = 20 \text{ мин}$)

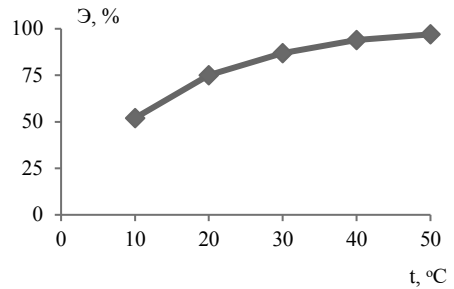


Рисунок 3 – Влияние температуры раствора на эффективность очистки от МГ; ($C_{исх} = 10 \text{ мг/дм}^3$; $m = 4 \text{ г/дм}^3$; $\tau = 20 \text{ мин}$)

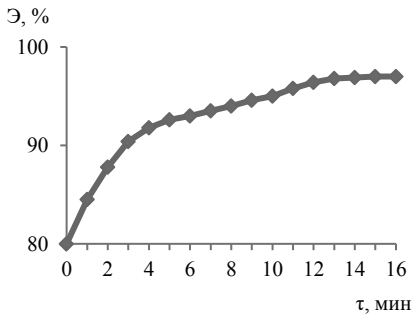


Рисунок 4 – Влияние длительности перемешивания на эффективность очистки от МГ

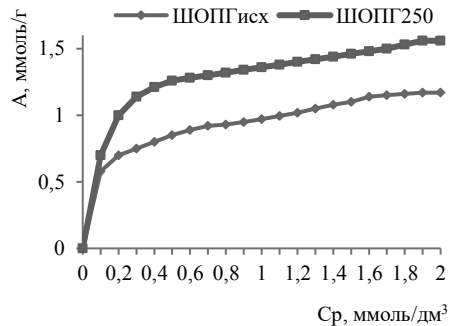


Рисунок 5 – Изотерма адсорбции МГ ШОПГ_{исх} и ШОПГ₂₅₀

Площадь удельных поверхностей ($S_{уд}$) ШОПГ и ШОПГ₂₅₀ определялись по формуле:

$$S_{уд} = \frac{A_{\infty} \cdot N_A \cdot Q}{M} \quad (1)$$

Расчеты показали, что $S_{уд}$ для ШОПГ составляет 401,5 м²/г, а для ШОПГ₂₅₀ –

535,33 м²/г.

С целью определения механизма адсорбции МГ ШОПГ₂₅₀, полученная изотерма была обработана в рамках моделей Ленгмюра, Фрейндлиха и Дубинина-Радушкевича с помощью программного обеспечения MATLAB. Характеристика моделей приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристика моделей адсорбции

№	Модель	Уравнение модели
1	Ленгмюра	$1/A = 1/A_{\infty} + 1/(K_L \cdot A_{\infty} \cdot C_p)$
2	Фрейндлиха	$\log A = \log K_F + n \cdot \log C_p$
3	Дубинина-Радушкевича	$\ln A = \ln A_{\infty} - (RT/E)^2 \cdot (\ln(C_{исх}/C_p))^2$

Из результатов обработки изотермы следует, что процесс адсорбции более точно описывается моделью Ленгмюра ($R^2 = 0,79$), что соответствует протеканию процесса адсорбции на поверхности участков, каждый из которых может адсорбировать только одну молекулу адсорбата, т.е. мономолекулярной адсорбции.

С помощью константы Ленгмюра ($K_L = 10,36$), полученной при вычислениях, определялось значение энергии Гиббса (ΔG°) адсорбции МГ по уравнению: $\Delta G^{\circ} = -R \cdot T \cdot \ln K_L = -5,79$ кДж/моль.

Отрицательный знак ΔG° свидетельствует о самопроизвольном протекании процесса. В ходе обработки изотермы адсорбции в рамках модели Дубинина-Радушкевича рассчитана энергия адсорбции, которая составила 10,22 кДж/моль, из чего следует, что процесс имеет физическую природу.

Последующий этап экспериментальной работы заключался в исследовании эффективности извлечения из модельных растворов ионов Cu^{2+} и Ni^{2+} нативным и термообработанным образцами ШОПГ.

Изотермы адсорбции ионов Cu^{2+} и Ni^{2+} ШОПГ и ШОПГ₂₅₀ (рисунки 6 и 7 соответственно) строились в статическом режиме аналогично предыдущему случаю.

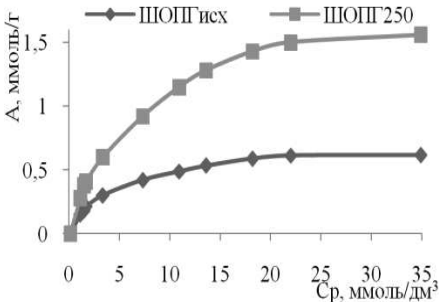


Рисунок 6 – Изотерма адсорбции ионов Cu^{2+} на поверхности ШОПГ_{исх} и ШОПГ₂₅₀

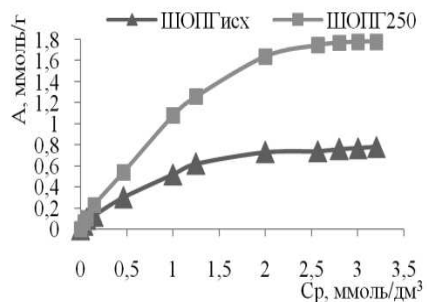


Рисунок 7 – Изотерма адсорбции ионов Ni^{2+} на поверхности ШОПГ_{исх} и ШОПГ₂₅₀

Графики линеаризации изотермы адсорбции для ионов Ni^{2+} в рамках моделей Ленгмюра (а), Фрейндлиха (б), Дубинина-Радушкевича (в) представлены на рисунке 8.

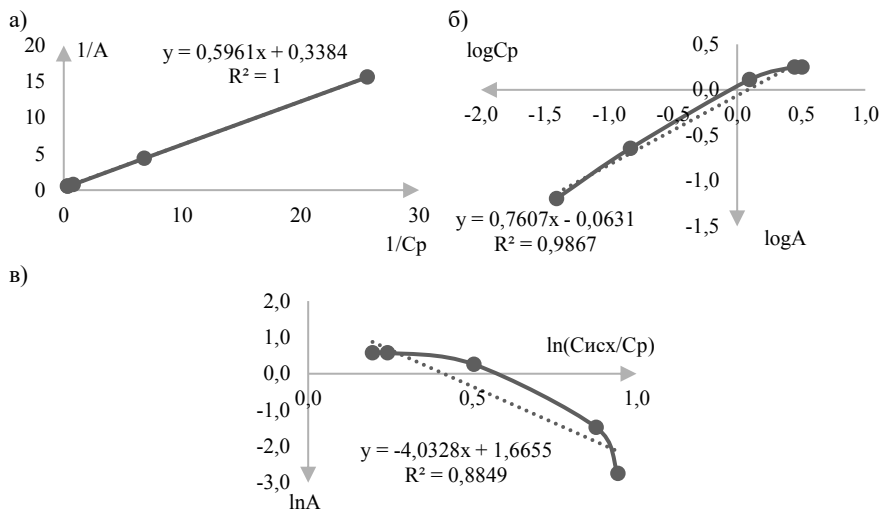


Рисунок 8 – Графики линейзации изотермы адсорбции Ni^{2+} в рамках моделей Ленгмюра (а); Фрейндлиха (б); Дубинина-Радушкевича (в)

Вычисленные значения, константы Ленгмюра K_L из уравнения и константы Фрейндлиха K_F из уравнения Фрейндлиха, описывающие механизм адсорбции, указаны в таблице 2.

Таблица 2 – Константы K_L и K_F при температуре 298 K

Ион	Модель Ленгмюра			Модель Фрейндлиха			E, кДж/моль	ΔG° , кДж/моль
	Amax, моль/г	K_L	R^2	K_F	n	R^2		
Cu^{2+}	0,616	1,268	0,850	0,133	2,038	0,933	1,233	-3,141
* Cu^{2+}	1,56	2,1608	0,996	0,401	2,4304	0,980	0,533	-1,865
Ni^{2+}	0,78	3,5264	0,946	0,443	1,8419	0,829	1,119	-3,053
* Ni^{2+}	1,782	5,677	0,999	0,864	1,314	0,986	1,233	-0,356

* материал ШОПГ, термообработанный при 250 °С.

Найдено, что значения максимальной сорбционной емкости ШОПГ₂₅₀ по ионам Cu^{2+} и Ni^{2+} составили 1,56 ммоль/г и 1,78 ммоль/г, соответственно.

Выявлено, что во всех случаях процесс адсорбции ионов металлов протекает самопроизвольно, т.к. значение ΔG° (-1,865 кДж/моль и -0,356 кДж/моль, соответственно) во всех случаях ниже нуля; энергия адсорбции E составляет 0,533 и 1,233 кДж/моль, соответственно, что свидетельствует о физической природе адсорбции.

Было отмечено, что максимальная эффективность очистки для всех исследуемых веществ наблюдается для ШОПГ₂₅₀. По-видимому, это связано с увеличением $S_{уд}$, а также с появлением на ШОПГ углеродного слоя, который является эффективным сорбционным материалом.

В результате проведенных исследований по адсорбции ионов Cu^{2+} , Ni^{2+} и МГ образцами ШОПГ и ШОПГ₂₅₀ выявлено следующее: с увеличением концентрации

исходного раствора, сорбционная емкость для всех исследуемых поллютантов возрастает до достижения предельного значения A_{\max} . При термообработке ШОПГ на примере МГ установлено, что эффективность очистки возрастает при повышении температуры термообработки и достигает 84,3 % при 250 °С.

Уравнения процессов адсорбции ионов Cu^{2+} и Ni^{2+} их коэффициенты аппроксимации представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Уравнения процессов адсорбции ионов Cu^{2+} и Ni^{2+} и их коэффициенты аппроксимации

Сорбируемый ион	Модели изотерм		
	Ленгмюра	Фрейндлиха	Дубинина-Радужкевича
Cu^{2+} (ШОПГ)	$y = 3,085 + 2,4316x$ $R^2 = 0,850$	$y = -0,8748 + 0,4906x$ $R^2 = \mathbf{0,933}$	$y = -0,8457 - 1,0126x$ $R^2 = 0,638$
Cu^{2+} (ШОПГ ₂₅₀)	$y = 0,5993 + 2,7734x$ $R^2 = 0,996$	$y = -0,3962 + 0,4115x$ $R^2 = \mathbf{0,980}$	$y = 0,4036 - 21,6084x$ $R^2 = 0,899$
Ni^{2+} (ШОПГ)	$y = 0,3384 + 0,5961x$ $R^2 = \mathbf{0,946}$	$y = -0,0631 + 0,7607x$ $R^2 = 0,829$	$y = -1,6655 + 4,0328x$ $R^2 = 0,405$
Ni^{2+} (ШОПГ ₂₅₀)	$y = 0,3384 + 0,5961x$ $R^2 = \mathbf{0,999}$	$y = -0,0631 + 0,7607x$ $R^2 = 0,986$	$y = -1,6655 - 4,0328x$ $R^2 = 0,884$

Выявлено, что процессы адсорбции ионов Ni^{2+} и Cu^{2+} наиболее точно описываются моделью Ленгмюра.

Для определения лимитирующей стадии процесса исследована кинетика адсорбции ионов Ni^{2+} и Cu^{2+} в статических условиях обоими образцами ШОПГ. Кинетические кривые $A = f(\tau)$ для ионов Cu^{2+} и Ni^{2+} представлены на рисунке 9.

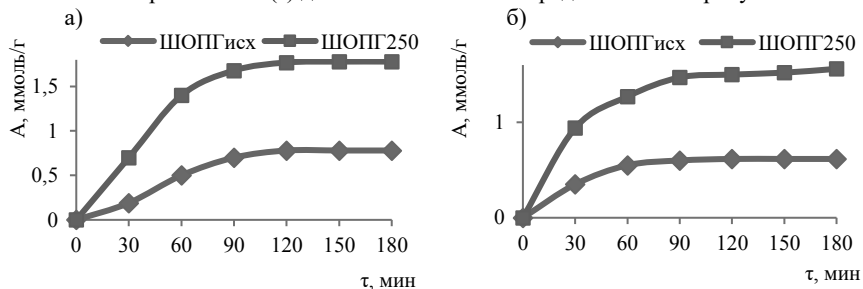


Рисунок 9 – Кинетические кривые процесса адсорбции ионов Ni^{2+} (а) и Cu^{2+} (б)

Обработка кинетических зависимостей процессов адсорбции ионов Ni^{2+} и Cu^{2+} материалом ШОПГ осуществлялась в рамках внешне- и внутридиффузионной моделей адсорбции, строились кинетические графические зависимости моделей псевдопервого и псевдвторого порядков, рассчитывался коэффициент B_i (Био).

Определено, что коэффициенты Био (таблица 4), рассчитанные в рамках диффузионной модели Бойда, находятся в интервале 1,7 – 2,3, что указывает на смешанно-диффузионный характер протекания процессов адсорбции исследуемых загрязняющих веществ.

Таблица 4 – Результаты обработки кинетических зависимостей адсорбции ионов никеля, меди и красителя "Метиленового голубого"

Характеристика процесса	Vi	Лимитирующая стадия
Ионы Ni ²⁺ (ШОПГисх)	1,956	Смешанная диффузия
Ионы Ni ²⁺ (ШОПГ250)	2,193	
Ионы Cu ²⁺ (ШОПГисх)	2,283	
Ионы Cu ²⁺ (ШОПГ250)	1,757	
Краситель "Метиленовый голубой"	2,193	

С целью оптимизации результатов исследований данные экспериментов были обработаны в рамках полного факторного эксперимента в соответствии с ротатбельным планом второго порядка ЦКПР-2ⁿ, где n – число независимых переменных, что позволяет получить математическую модель процесса – функцию отклика – эффективности очистки в виде алгебраического уравнения:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_1x_2 + a_5x_1x_3 + a_6x_2x_3 + a_7x_1^2 + a_8x_2^2 + a_9x_3^2. \quad (2)$$

Для ионов Cu²⁺:

$$y = 159,415 + 3,4466x_1 - 0,8136x_2 - 8,9061x_3 - 0,4618x_1x_3 + 0,1119x_2x_3 - 0,0309x_1^2 - 8,8669x_3^2.$$

Для ионов Ni²⁺:

$$y = 195,706 + 3,4403x_1 - 1,0583x_2 - 12,9772x_3 - 0,4607x_1x_3 + 0,1269x_2x_3 - 0,426x_1^2 - 11,7386x_3^2.$$

Результаты анализа моделей представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Результаты анализа

Модель	Параметр	Обозначение	Значение
Для ионов Cu ²⁺	Коэффициент детерминации		≈1
	Критерий Стьюдента	t _{st}	5,088 · 10 ⁻⁸ t _{st} < t _{крит}
	Критерий Фишера	F	1,0357 F < F _{крит}
Вывод: построенная модель обладает высоким уровнем адекватности			
Для ионов Ni ²⁺	Коэффициент детерминации		≈1
	Критерий Стьюдента	t _{st}	1,82 · 10 ⁻⁸ t _{st} < t _{крит}
	Критерий Фишера	F	1,0198 F < F _{крит}
Вывод: построенная модель обладает высоким уровнем адекватности			

Графическая зависимость полученных математических моделей от технологических факторов дана на рисунках 10, 11.

В пятой главе представлена разработанная на основе проведенных исследований принципиальная технологическая схема очистки СВ (рисунок 12) и подобрано основное оборудование.

С целью утилизации шлама и предотвращения изъятия сельскохозяйственных земель из посевного оборота под полигон для хранения отходов, исследовали возможность использования шлама в качестве упрочняющей добавки в шихту для производства керамических изделий.

Исследования зависимости прочности образцов от массовой доли осадка в смеси показали, что при добавлении осадка к сырьевой смеси в количестве до 15 % прочность образцов незначительно повышается с 19,2 до 19,98 МПа, а затем несколько понижается.

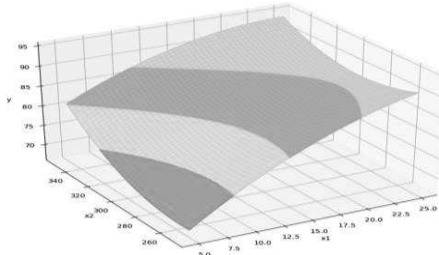
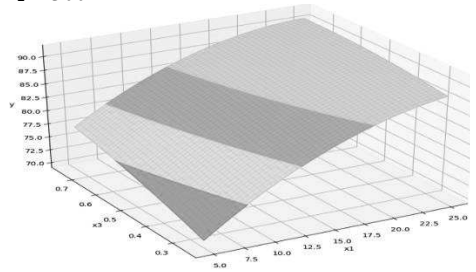
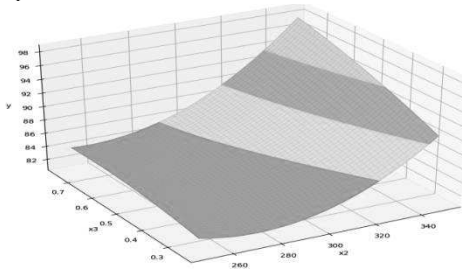
$x_3 = 0,25$  $x_2 = 300$  $x_1 = 15$ 

Рисунок 10 – Поверхности отклика регрессионной модели при фиксированных переменных для ионов Cu^{2+}

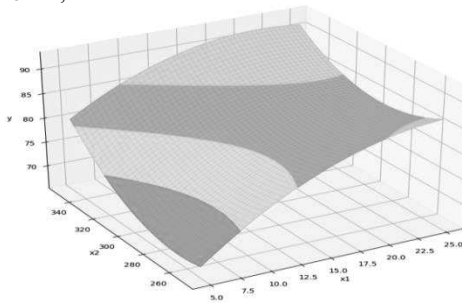
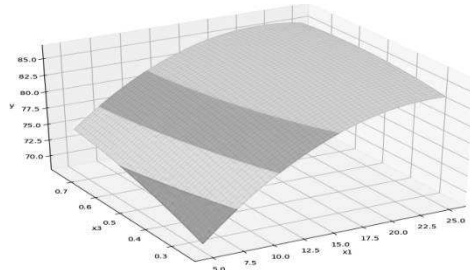
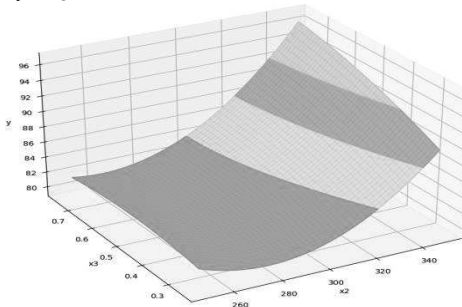
 $x_3 = 0,25$  $x_2 = 300$  $x_1 = 15$ 

Рисунок 11 – Поверхности отклика регрессионной модели при фиксированных переменных для ионов Ni^{2+}

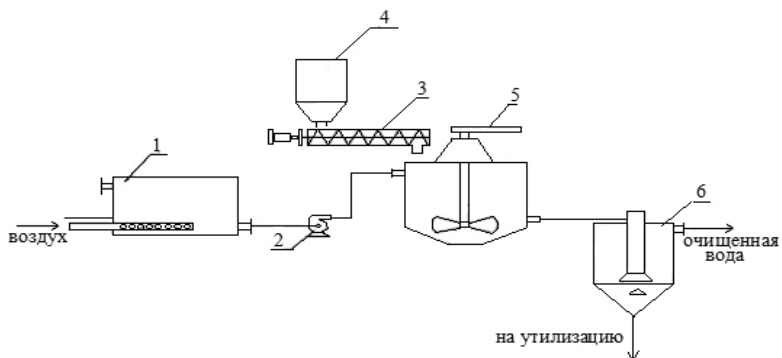


Рисунок 12 – Технологическая схема очистки сточных вод: 1 – усреднитель; 2 – центробежный насос; 3 – винтовой питатель; 4 – бункер; 5 – смеситель; 6 – вертикальный отстойник

На рисунке 13 представлена предполагаемая схема производства керамических изделий с использованием ШОПГ.

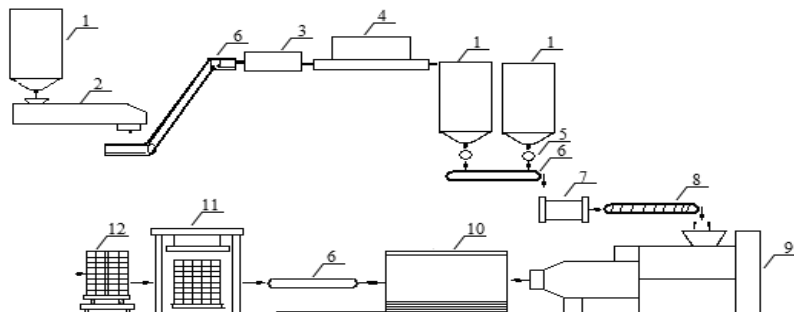


Рисунок 13 – Предполагаемая схема производства керамических изделий:
1 – бункер; 2 – грохот; 3 – бегуны; 4 – сита; 5 – дозаторы; 6 – ленточный конвейер;
7 – смеситель; 8 – шнековый конвейер; 9 – пресс; 10 – сушилка; 11 – обжиговая печь;
12 – готовая продукция

В шестой главе рассчитана величина предотвращенного экологического ущерба с использованием современных методик, на расход сточных вод 4380 м³/год, которая составила около 4 млн руб./год.

В приложении представлены протокол производственных испытаний и акт о принятии к внедрению.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан способ получения СМ из шлама производства гофротары, пригодных к использованию в водоочистке, определены условия тепловой модификации реагента, при которых достигаются наилучшие сорбционные показатели:

температура термообработки шлама – 250 °С, длительность – 30 мин.

2. Исследованы физико-химические свойства нативного и термомодифицированного образцов ШОПГ. Установлено, что ШОПГ обладает развитой структурой поверхности, содержит множество волокон целлюлозы, характеризующихся большим количеством функциональных групп ОН⁻, способных к образованию химических связей с различными поллютантами (ионы металлов, красители).

3. Выявлен механизм сорбционных процессов на ШОПГ по ионам Ni²⁺, Cu²⁺, красителю марки "Метиленовый голубой". Установлено, что максимальная сорбционная емкость ШОПГ, термообработанного при температуре 250 °С, составляет 1,174 ммоль/г по МГ; 1,56 ммоль/г – по ионам Cu²⁺ и 1,782 ммоль/г – по ионам Ni²⁺. Выявлено, что процесс адсорбции ионов Ni²⁺, Cu²⁺ и МГ носит смешанно-диффузионный характер, т.к. коэффициент Био (Bi) для исследуемых загрязнителей лежит в интервале 1,7 – 2,3. Рассчитаны термодинамические параметры (E, ΔG°) процессов адсорбции ионов Ni²⁺, Cu²⁺ и красителя МГ термообработанным ШОПГ. Определено, что преобладающей природой процесса является физическая адсорбция, процесс протекает спонтанно. Доказано, что термообработка нативного материала ШОПГ приводит к возрастанию эффективности очистки с помощью ШОПГ₂₅₀ в 1,4 раза по МГ, в 2,5 раз по ионам Ni²⁺ и в 2,3 раза по ионам Cu²⁺.

4. Методом многофакторного планирования эксперимента определена эффективность очистки модельных растворов с помощью разработанного СМ – ШОПГ₂₅₀ в зависимости от различных технологических условий – температуры обжига ШОПГ; добавки ШОПГ₂₅₀; длительности контакта ШОПГ с водной средой. Подобраны условия проведения процесса адсорбции: доза ШОПГ – 4 г/дм³, длительность контакта – 20 мин; температура водной среды – 40 °С, при которых достигается наибольшая эффективности извлечения исследуемых загрязняющих веществ.

5. Разработана принципиальная технологическая схема очистки сточных вод с помощью ШОПГ₂₅₀; проведен расчет основных аппаратов. В качестве способа утилизации отработанного ШОПГ предложено добавлять его в глиняные смеси при производстве керамического кирпича в количестве 15 мас.%, что увеличивает пористость кирпича и уменьшает его удельную плотность при высокой прочности. Дан расчет предотвращенного экологического ущерба, составляющего около 4 млн. руб./год.

Перспективы дальнейшей разработки темы состоят в исследовании и внедрении полученного материала ШОПГ₂₅₀ на основании модифицированного шлама ООО «Гофротара» (г. Белгород) в технологиях очистки сточных вод от различных органических и неорганических загрязняющих веществ.

Основные обозначения: N_A – число Авогадро (6,02·10²³ моль⁻¹); Q – площадь поперечного сечения молекулы красителя "Метиленового голубого" (0,57·10⁻¹⁸ м²); M – молекулярная масса метиленового голубого (319,86 г/моль); A_∞ – максимальная сорбционная емкость (ШОПГ_{исх} по метиленовому голубому 1,17 ммоль/г; для ШОПГ₂₅₀ – 1,56 ммоль/г); A – сорбционная ёмкость (ммоль/г); K_L – константа сорбционного равновесия (дм³/ммоль); C_{исх}, C_p – начальная концентрация и равновесная концентрация после сорбции МГ (ммоль/дм³); E – энергия сорбции (Дж/(моль)); T – абсолютная температура в Кельвинах; R – универсальная газовая постоянная, 8,314·10⁻³ кДж/(моль·К); a₀ – независимый коэффициент; a₁, a₂, a₃ – коэффициенты линейного влияния исходных факторов x₁, x₂, x₃; a₄, a₅, a₆ – коэффициенты, показывающие влияние взаимосвязи между факторами x₁ и x₂, x₁ и x₃, x₂ и x₃ соответственно; a₇, a₈, a₉ – коэффициенты,

показывающие нелинейную квадратичную зависимость от факторов x_1 , x_2 , x_3 соответственно; x_1 – длительность контакта, мин; x_2 – температура обжига, °С; x_3 – доза СМ.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах, включенных в Перечень ВАК Минобрнауки России:

1. **Иевлева Е.С.** Использование волокнистых отходов ООО "Гофротара" / Е.С. Иевлева, С.В. Свергузова, Ж.А. Сапронова, А.В. Святченко // Деревообрабатывающая промышленность. – 2025. – № 1. – С. 94–101.

2. Свергузова С.В. Целлюлозосодержащий отход производства гофротары как сорбционный материал для водоочистки / С.В. Свергузова, **Е.С. Иевлева**, И.Г. Шайхиев, Ю.С. Воронина // Деревообрабатывающая промышленность. – 2024. – № 2. – С. 66–76.

3. **Иевлева Е.С.** Отходы переработки бумаги в практике водоочистки / Е.С. Иевлева, С.В. Свергузова, Ж.А. Сапронова, Ю.С. Воронина // Деревообрабатывающая промышленность. – 2024. – № 4. – С. 93–100.

Статьи в научных изданиях, сборниках научных трудов и материалов конференций, индексируемые в базах данных Scopus:

4. Sverguzova S.V. Use of waste paper recycling as a sorption material for Methylene blue dye removal from model solutions / S.V. Sverguzova, Zh.A. Sapronova, I.G. Shaikhiev, Y.S. Voronina, **E.S. Ievleva** // Russian Journal of General Chemistry. – 2023. – Т. 93. – N 12. – С. 3258–3263.

5. Сапронова Ж.А. Использование отхода производства гофротары для очистки сточных вод от красителя "Метиленовый голубой" / Ж.А. Сапронова, С.В. Свергузова, А.В. Святченко, **Е.С. Иевлева** // Известия Тульского государственного университета. Серия «Науки о Земле». – 2024. – № 3. – С. 78–87.

Труды в прочих изданиях:

6. Свергузова С.В. Использование отхода переработки макулатуры в качестве сорбционного материала для удаления красителя "Метиленовый голубой" из модельных растворов / С.В. Свергузова, Ж.А. Сапронова, И.Г. Шайхиев, Ю.С. Воронина, **Е.С. Иевлева** // Российский химический журнал. – 2023 – Т. LXVII, № 2. – С. 67–73.

7. Свергузова С.В. Термические превращения при температурной модификации целлюлозосодержащего отхода ООО "Гофротара" / С.В. Свергузова, **Е.С. Иевлева**, Ю.С. Воронина // Современные технологии в области защиты окружающей среды и техносферной безопасности: сб. всероссийской науч. конф. с международ. участием (Казань, 2023). – Казань: изд-во КНИТУ, 2023. – С. 751–754.

8. **Иевлева Е.С.** Образование волокнистых отходов при производстве гофрированной бумаги / Е.С. Иевлева, Ю.С. Воронина, С.В. Свергузова // Рациональное использование природных ресурсов и переработка техногенного сырья: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, химия и биотехнология: сб. докл. Междунар. науч. конф. (Алушта-Белгород, 30 мая–3 июня, 2022 г.) – Белгород: Изд-во БГТУ, 2022. – С.21–26.

9. **Иевлева Е.С.** Использование шлама производства гофротары для очистки растворов от красителя метиленовый голубой / Е.С. Иевлева, Р.Р. Гафаров, В.В. Жабский // Инновационные технологии защиты окружающей среды в современном мире: сб. докл. Всероссийской науч. конф. с междунар. участием (Казань,

