

УДК 544.723

UDC 544.723

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки, сельскохозяйственные науки)

4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences, agricultural sciences)

**ПЛАЗМОХИМИЧЕСКАЯ МОДИФИКАЦИЯ
КОНОПЛЯНОЙ КОСТРЫ ДЛЯ
ПОВЫШЕНИЯ СОРБЦИОННОЙ
АКТИВНОСТИ ПО ОТНОШЕНИЮ К ИОНАМ
НИКЕЛЯ**

**PLASMA-CHEMICAL MODIFICATION OF
HEMP FIBERS TO ENHANCE THEIR
SORPTION ACTIVITY TOWARDS NICKEL
IONS**

Хабибрахманова Евгения Николаевна
аспирант
*Казанский национальный исследовательский
технологический университет, Казань, Россия*

Khabibrakhmanova Evgeniya Nikolaevna
postgraduate student
*Kazan National Research Technological University,
Kazan, Russia*

В продолжение исследований по применению конопляной костры в качестве сорбента ионов тяжелых металлов, изучено влияние обработки низкотемпературной плазмой пониженного давления на структурные и сорбционные характеристики материала. Установлено, что плазмохимическая активация позволяет повысить максимальную сорбционную емкость по ионам Ni²⁺ на 40-90% по сравнению с нативным материалом и на 15-30% по сравнению с химически модифицированными аналогами (обработка NaOH, H₂SO₄). Процесс сорбции на плазмомодифицированных образцах описывается моделью Ленгмюра и имеет физическую природу. Результаты экспериментов демонстрируют высокую эффективность и технологическую перспективность использования плазмохимической обработки как быстрого, экологичного и безреагентного метода глубокой модификации сельскохозяйственных отходов для создания высокоэффективных сорбционных материалов

In continuation of research on the use of hemp fibers as a sorbent for heavy metal ions, the effect of low-pressure low-temperature plasma treatment on the structural and sorption characteristics of the material was studied. Plasma-chemical activation was found to increase the maximum sorption capacity for Ni²⁺ ions by 40–90% compared to the native material and by 15–30% compared to chemically modified counterparts (NaOH, H₂SO₄ treatment). The sorption process on plasma-modified samples is described by the Langmuir model and has a physical nature. The experimental results demonstrate the high efficiency and technological promise of using plasma-chemical treatment as a rapid, environmentally friendly, and reagent-free method for the deep modification of agricultural waste to produce highly effective sorbent materials

Ключевые слова: КОНОПЛЯНАЯ КОСТРА, ПЛАЗМОХИМИЧЕСКАЯ МОДИФИКАЦИЯ, НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ПЛАЗМА, ИОНЫ НИКЕЛЯ, СОРБЦИЯ, ОЧИСТКА ВОДЫ, УТИЛИЗАЦИЯ ОТХОДОВ АПК

Keywords: HEMP FIBERS, PLASMA-CHEMICAL MODIFICATION, LOW-TEMPERATURE PLASMA, NICKEL IONS, SORPTION, WATER PURIFICATION, AGRICULTURAL WASTE UTILIZATION

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-219-029>

Введение

Рациональное использование побочных продуктов и отходов агропромышленного комплекса (АПК) является одной из ключевых задач в контексте перехода к экономике замкнутого цикла. В качестве перспективного направления рассматривается разработка сорбционных

<http://ej.kubagro.ru/2026/05/pdf/29.pdf>

материалов (СМ) на основе растительного сырья для очистки водных сред от загрязняющих веществ, в частности, ионов тяжелых металлов [1–3].

В наших предыдущих исследованиях продемонстрирована высокая эффективность применения конопляной костры – отхода переработки стеблей технической конопли (*Cannabis sativa*) в качестве СМ для удаления ионов меди и никеля [4, 5] из модельных растворов. Установлено, что нативный материал обладает сорбционной емкостью по отношению к ионам Ni^{2+} , составляющей 46,0 мг/г [5]. Для повышения сорбционной емкости использовалась химическая модификация 3%-ными растворами NaOH и H_2SO_4 , которая увеличивала максимальную сорбционную емкость (A_{max}) до 77,6 и 67,2 мг/г, соответственно. Термодинамические расчеты и структурный анализ (ИК-спектроскопия, РФА) позволили установить, что процесс адсорбции является физическим, самопроизвольным и эффективно протекает в нейтральной и слабощелочной средах. Основным механизмом повышения емкости при химической обработке был гидролиз биополимеров (целлюлозы, лигнина) с образованием дополнительной пористости и изменением поверхности [5].

Таким образом, конопляная костра продемонстрировала высокий потенциал для создания недорогих и эффективных СМ. Однако традиционная химическая модификация имеет ряд технологических недостатков: необходимость использования реагентов, продолжительность процесса, образование промывных вод, требующих утилизации. Данное обстоятельство обуславливает актуальность поиска альтернативных, более эффективных и экологичных методов модификации.

В последние годы внимание исследователей привлекают методы плазмохимической обработки, в частности, воздействие низкотемпературной высокочастотной емкостной (ВЧЕ) плазмой

пониженного давления [6-9]. Данная технология обладает рядом преимуществ:

1. Безреагентность и экологичность: не требуется использования химических реагентов.
2. Скорость процесса: модификация поверхности происходит за короткие промежутки времени.
3. Локальность воздействия: плазма изменяет свойства лишь поверхностного слоя (нанометры–микрометры), не затрагивая объемные структуры материала.
4. Универсальность и управляемость: варьируя параметры плазмы (вид газа, мощность, время экспозиции), можно направленно изменять смачиваемость, морфологию, пористость и химический состав поверхности за счет процессов очистки, травления, активации и нанесения функциональных групп [10-14].

Плазмохимическая обработка успешно применяется для модификации полимеров, текстиля и целлюлозных материалов с целью улучшения их адгезионных, сорбционных и каталитических свойств [15-18]. В контексте использования сельскохозяйственных отходов данный подход представляется крайне перспективным для создания СМ.

Целью работы является исследование влияния плазмохимической обработки высокочастотной емкостной (ВЧЕ) плазмой пониженного давления на структурно-морфологические и сорбционные характеристики конопляной костры по отношению к ионам Ni^{2+} .

Экспериментальная часть

В качестве объекта исследования использовалась нативная конопляная костра, полученная в результате трепания стеблей технической конопли (*Cannabis sativa*). Методика подготовки образцов (сушка, измельчение, фракционирование) подробно описана в предыдущей работе [5]. Средний размер частиц СМ составлял 0,5–1,0 мм.

Модификация образцов проводилась на установке для генерации ВЧЕ плазмы пониженного давления в среде атмосферного воздуха.

Параметры плазменной обработки:

Общий расход газа поддерживался постоянным и составлял 1500 см³/мин. Давление в камере обработки плазмотрона составляло 26,6 Па. Сила тока на аноде плазмотрона составила 0,5 А. Плазмообработка проводилась с варьированием времени экспозиции и мощности, подведенной к электродам плазмотрона. Режимы плазмообработки и условные обозначения образцов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Режимы плазмообработки конопляной костры и условные обозначения образцов СМ

Изменяемые параметры	Обозначение образца конопляной костры			
	P-1	P-2	P-3	P-4
Мощность на электродах (W), Вт	1750	1750	2250	2250
Время плазмо- обработки (t), минут	5	10	5	10

После обработки образцы выдерживались в эксикаторе в течение 24 часов для стабилизации поверхностных свойств. Для сравнения использовались нативный образец костры (НК) и образцы, модифицированные 3 %-ными растворами NaOH и H₂SO₄ по методике [5] (NaOH-К и H₂SO₄-К).

Для установления характера изменений, вносимых плазменной обработкой, использовались следующие методы:

Инфракрасная спектроскопия с Фурье преобразованием: Спектры поглощения снимались на спектрометре марки «Nicolet iS5» в диапазоне 400–4000 см⁻¹ с разрешением 4 см⁻¹ методом нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) для анализа функциональных групп на поверхности СМ.

Рентгеноструктурный анализ (РСА): Исследование кристаллической структуры проводилось на дифрактометре марки «Rigaku Ultima IV»

(CuK α -излучение, $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) в диапазоне углов $2\theta = 5\text{--}60^\circ$. Степень кристалличности (СК) рассчитывалась по методу Сегре-Хармена.

В качестве модельного сорбата использовали водный раствор сульфата никеля ($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). 1 г. навески СМ добавлялось к 100 см^3 раствора с варьируемой начальной концентрацией ионов Ni^{2+} (5–2000 мг/дм 3). Колбы плотно закрывались пробками и устанавливались на орбитальный лабораторный шейкер марки «PSU–20» с платформой для колб 250-300 см 3 Р–12/250 для перемешивания в течение 5 часов. По истечении указанного промежутка времени, раствор отфильтровывался через бумажный фильтр и в нем определялась остаточная концентрация ионов Ni^{2+} согласно методике измерений массовой концентрации никеля, в природных и сточных водах фотометрическим методом с диметилглиоксимом ПНД Ф 14.1:2.46–96 на спектрофотометре марки «В-1100» [19].

Кинетика сорбции: Исследовали изменение степени извлечения ионов Ni^{2+} (начальная концентрация 150 мг/дм 3) во времени (от 5 до 180 мин).

Обработка данных изотерм проводилась с использованием линейных форм моделей Ленгмюра, Фрейндлиха, Темкина и Дубинина-Радушкевича. Кинетические данные обрабатывались в рамках моделей псевдо-первого и псевдо-второго порядка, а также модели внутренней диффузии Вейбера-Морриса. Все расчеты выполнялись с использованием программного обеспечения Microsoft Excel 2016.

Результаты и обсуждение

Для оценки структурных изменений, вызванных воздействием низкотемпературной плазмы, был проведен сравнительный анализ наиболее интенсивно обработанного образца (режим Р-4: $W = 2250 \text{ Вт}$, $t = 10 \text{ мин}$) методами ИК-Фурье спектроскопии и РФА. Полученные данные сопоставлялись с результатами для нативной (НК) и химически модифицированной (3%-ный раствор NaOH и 3%-ный раствор H_2SO_4)

костры, подробно описанными в работе [5] и представленными на рис. 1 и 2.

На рисунке 1 представлены дифрактограммы образцов полученных образцов СМ.

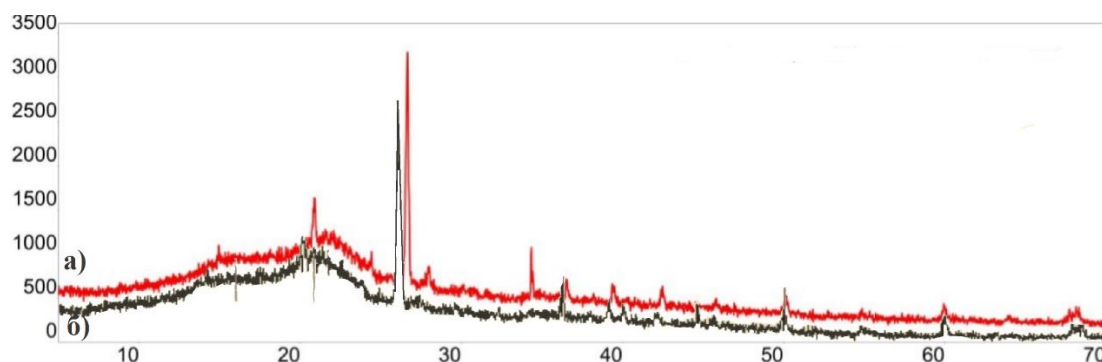


Рисунок 1 – Дифрактограммы образцов конопляной костры:

а) после плазмообработки, мощность разряда – 2250 Вт, время обработки – 10 мин, давление – 25.2 ± 0.5 Па, б) нативной конопляной костры.

Дифрактограмма плазмообработанного образца (Р-4) практически идентична дифрактограмме нативной костры (НК). В то же время, химическая обработка (особенно 3%-ным раствором NaOH) приводила к заметному снижению интенсивности и уширению рефлексов, что свидетельствовало о снижении степени кристалличности (таблица 2) и уменьшении размера кристаллитов вследствие гидролитического расщепления аморфных областей и частично упорядоченных цепей [5]. Плазмохимическая обработка в использованном режиме не оказывает столь разрушительного воздействия на кристаллическую решетку целлюлозы. Энергия плазмы достаточна для модификации поверхностных слоев и функциональных групп, но недостаточна для глубокого разрушения упорядоченной целлюлозной структуры.

Таблица 2 – Степень кристалличности образцов конопляной костры

Образец	Условия обработки	Степень кристалличности
Нативная костра (НК)	-	0,19
NaOH-К	3% NaOH, 5 ч, 20°C	0,15
H ₂ SO ₄ -К	3% H ₂ SO ₄ , 5 ч, 20°C	0,13
Плазма Р-4	2250 Вт, 10 мин, воздух	0,34

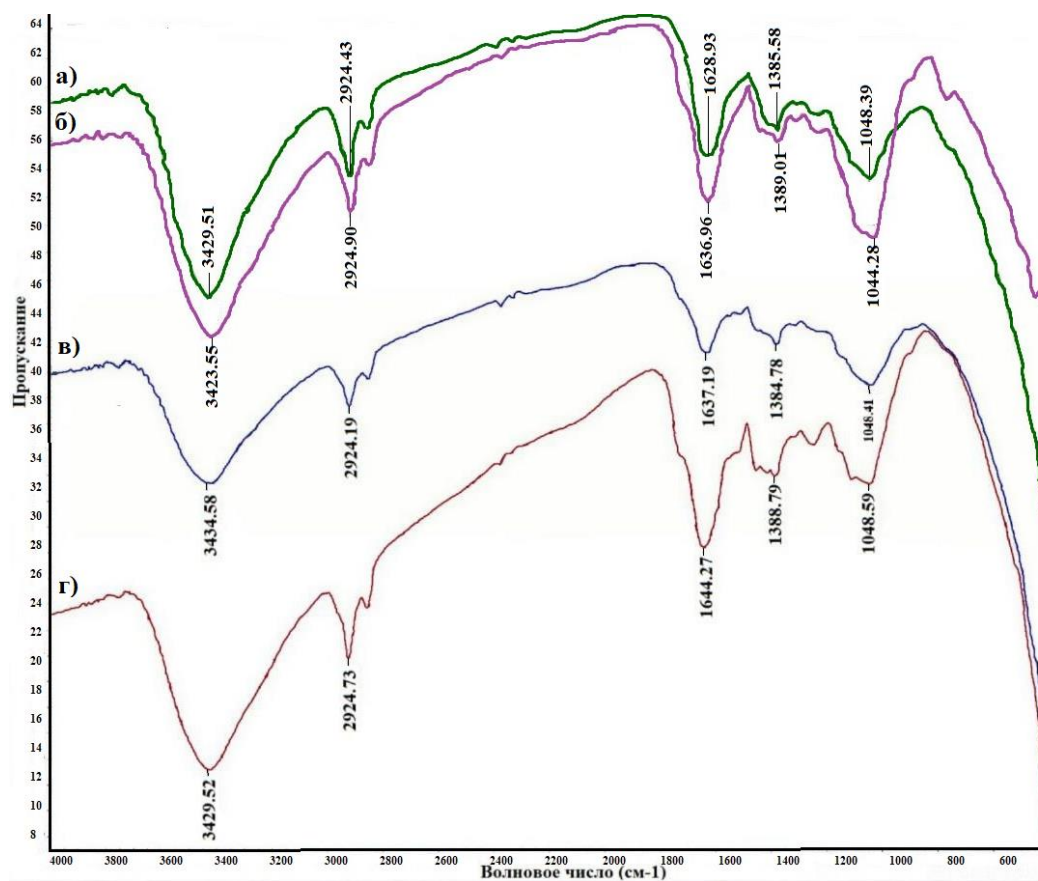


Рисунок 2 – ИК-спектры образцов конопляной костры:

- а) после плазмообработки, мощность разряда – 2250 Вт, время обработки – 10 мин, давление – 26,6 Па, б) нативной конопляной костры, в) модифицированной 3 %-ным раствором NaOH, г) модифицированной 3 %-ным раствором H₂SO₄

ИК-спектры образцов представлены на рисунке 2. Изменение картины ИК-спектров, смещение частоты пиков полос поглощения во всех случаях свидетельствует об изменении строения внешней и внутренней структуры СМ. Частичный гидролиз и биополимеров в составе костры с последующей экстракцией низкомолекулярных фрагментов в модифицирующий раствор приводят к образованию дополнительных пор и трещин в составе СМ, что способствует увеличению сорбционной емкости модифицированных образцов костры.

На основании построения изотерм сорбции и их обработки в рамках модели Ленгмюра были определены значения максимальной сорбционной емкости (A_{max}) для всех исследуемых образцов. Результаты представлены в Таблице 3.

Таблица 3. – Максимальная сорбционная емкость (A_{max}) конопляной костры по ионам Ni^{2+} при различной модификации

Модификат костры	A_{max} , мг/г	A_{max} , ммоль/г
Нативная (НК)	46,0	0,784
NaOH-К	77,6	1,322
H ₂ SO ₄ -К	67,2	1,145
Плазма P-1	85,1	1,450
Плазма P-2	89,7	1,528
Плазма P-3	92,4	1,575
Плазма P-4	96,8	1,650

Плазмохимическая обработка превышает эффективность химической модификации. Наиболее интенсивный режим (P-4: $W = 2250$ Вт, $t = 10$ мин) позволяет более чем вдвое увеличить сорбционную емкость по сравнению с нативным материалом и на $\sim 25\%$ превосходит образец, обработанный 3 %-ным раствором NaOH (77,6 мг/г).

На рисунке 3 представлены изотермы сорбции ионов Ni^{2+} на конопляной костре, обработанной в четырех различных плазменных режимах. Все изотермы имеют форму, характерную для L-типа (тип I по классификации IUPAC), что свидетельствует о мономолекулярной адсорбции на поверхности с однородными активными центрами.

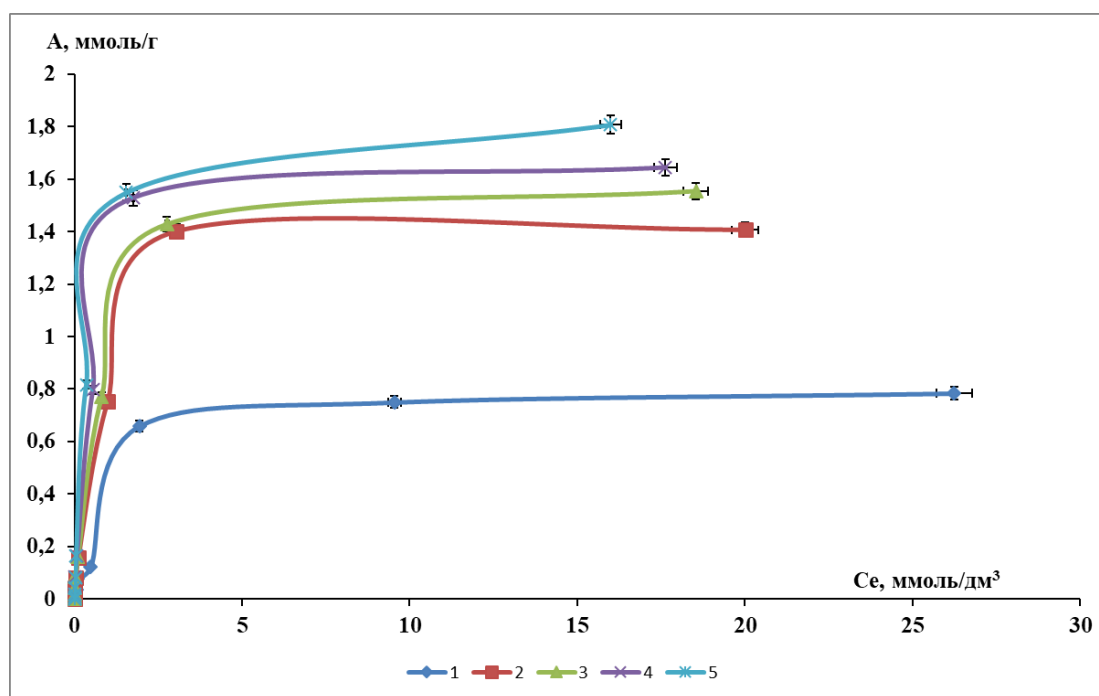


Рисунок 3 – Изотермы адсорбции ионов Ni^{2+} образцами костры конопли: 1 – нативная конопляная костра, 2 - Плазма P-1, 3 - Плазма P-2, 4 - Плазма P-3, 5 - Плазма P-4

Обработка экспериментальных данных в рамках модели Ленгмюра показала ее высокую адекватность для описания процесса ($R^2 > 0.98$ для всех образцов). Параметры модели, рассчитанные по линейной форме уравнения Ленгмюра, приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Параметры модели Ленгмюра для сорбции Ni^{2+} на плазмомодифицированной конопляной костре

Режим обработки	Уравнение	Константа Ленгмюра, K_L (л/ммоль)	Коэффициент детерминации, R^2
Плазма P-1	$y = 0,3401x + 2,1004$	2,292	0,996
Плазма P-2	$y = 0,1476x + 3,5962$	3,903	0,992
Плазма P-3	$y = 0,0759x + 3,1852$	7,022	0,992
Плазма P-4	$y = 0,2857x + 1,5031$	1,989	0,995

Значения константы Ленгмюра (K_L) варьируются от 1,989 до 7,022 л/ммоль, при этом максимальное значение наблюдается для образца P-3 ($W = 2250$ Вт, $t = 5$ мин). Высокие величины $K_L (>1)$ свидетельствуют о сильном средстве модифицированной поверхности к ионам Ni^{2+} . Стоит

отметить, что, хотя образец Р-4 демонстрирует наибольшую сорбционную емкость, его константа K_L не является максимальной. Данное обстоятельство указывает, что при наиболее интенсивной плазменной обработке ($W = 2250$ Вт, $t = 10$ мин) увеличивается не столько энергия связи ион-сорбент, сколько общее количество доступных сорбционных центров на поверхности материала.

Кинетические исследования проводились при начальной концентрации ионов Ni^{2+} 150 мг/дм³ (2.56 ммоль/дм³). На рисунке 4 представлены кинетические зависимости для всех четырех плазмомодифицированных образцов конопляной костры.

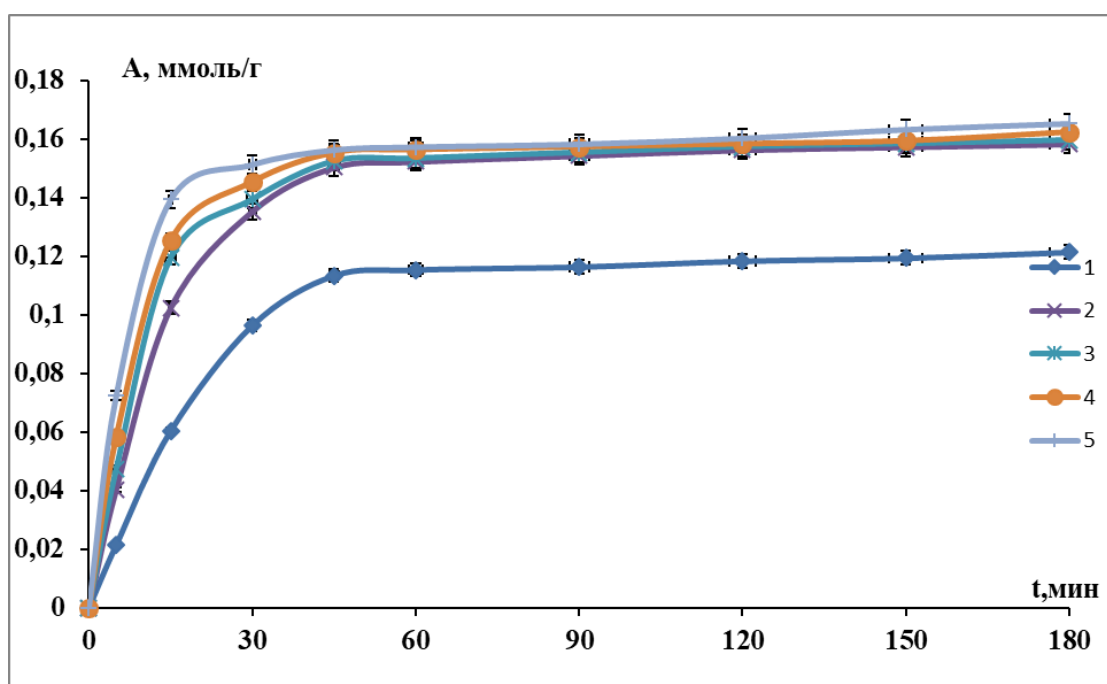


Рисунок 4 – Кинетические кривые удаления ионов Ni^{2+} образцами конопляной костры: 1 – нативной; плазмобработанной в режимах: 2 - P-1, 3 - P-2, 4 - P-3, 5 - P-4

Кинетические экспериментальные данные обрабатывались в рамках трех вышеназванных кинетических моделей (Таблица 4).

Таблица 4 – Кинетические параметры адсорбции ионов никеля на плазмомодифицированных образцах конопляной костре

Режим	Псевдо-первый порядок		Псевдо-второй порядок		Модель Вейбера–Морриса		Коэффициент Био (Bi)
	k ₁ (мин ⁻¹)	R ²	k ₂ (г/(ммоль·мин))	R ²	k _{id} (ммоль/(г·мин ^{1/2}))	R ²	
P-1	0,0303	0,91	0,6511	0,99	0,0083	0,65	1,9719
P-2	0,0277	0,89	0,8524	0,99	0,0074	0,59	1,9719
P-3	0,0207	0,75	1,082	0,99	0,0067	0,58	1,3146
P-4	0,0201	0,81	1,312	0,99	0,0057	0,56	1,3146

Сравнение коэффициентов детерминации R² для трех моделей показывает, что модель псевдо-второго порядка лучше всего описывает экспериментальные данные для всех образцов (R² = 0.99). Лимитирующей стадией сорбции ионов Ni²⁺ является химическое взаимодействие или обмен электронами между ионами металла и активными центрами на поверхности сорбента. Низкие значения R² для модели Вейбера–Морриса свидетельствуют о том, что диффузия ионов в порах не является основным лимитирующим фактором на исследованном временном интервале.

Коэффициент диффузии (k_{id}) постепенно снижается от 0.0083 до 0.0057 ммоль/(г·мин^{1/2}). Данное обстоятельство указывает на изменение морфологии пор или увеличение длины диффузионного пути вследствие более глубокой очистки поверхности.

Однако, низкие значения R² для модели Вейбера–Морриса, указывают, что основной лимитирующей стадией является именно поверхностная химическая адсорбция, описываемая моделью псевдо-второго порядка.

Заключение

Проведенные исследования продемонстрировали высокую эффективность плазмохимической обработки ВЧЕ плазмой пониженного давления как метода направленной модификации конопляной костры – побочного продукта переработки технической конопли.

Установлено, что плазменная обработка приводит к селективному изменению поверхности материала: удаляются аморфные компоненты (лигнин, экстрактивные вещества), о чем свидетельствует изменение ИК-спектров, при этом кристаллическая структура целлюлозного каркаса сохраняется (данные РФА).

Показано, что плазмообработанные образцы конопляной костры имеют более высокие сорбционные характеристики по сравнению с химически модифицированными СМ. Максимальная сорбционная емкость по ионам Ni^{2+} наблюдается для образца костры, обработанного ВЧЕ плазмой пониженного давления, при $W = 2250$ Вт и $e = 10$ мин и составила 96,8 мг/г, что более чем в 2 раза превышает таковой показатель для нативного материала (46,0 мг/г) и на 25 % значение для щелочномодифицированного образца СМ (3%-ный раствор NaOH, 77,6 мг/г).

Процесс сорбции на всех плазмообработанных образцах адекватно описывается моделью Ленгмюра ($R^2 > 0.99$), что указывает на протекание мономолекулярной адсорбции на однородных центрах.

Кинетические исследования показали, что процесс лучше всего описывается моделью псевдо-второго порядка. Константа скорости k_2 последовательно возрастала с интенсификацией плазменного воздействия, достигая значения 1.312 г/(ммоль·мин) для режима Р-4, что свидетельствует не только об увеличении емкости, но и о значительном ускорении процесса сорбции после плазменной активации.

Реализованный подход позволяет решить комплекс задач, актуальных для современного АПК, и открывает возможности для создания новых ресурсосберегающих технологий утилизации отходов с добавленной стоимостью. Разработан метод перевода низколиквидного отхода коноплепереработки (костры) в высокоэффективный СМ, что соответствует принципам экономики замкнутого цикла и

ресурсосбережения, заложенным в основу технологического развития АПК.

Рекомендации по внедрению плазменной установки в технологическую линию:

Плазмохимическая обработка является быстрым, безреагентным и экологичным процессом, что отличает ее от традиционной химической модификации, требующей реагентов, времени и утилизации промывных вод. Для интеграции в действующие предприятия по переработке конопли рекомендуется использование модульных установок плазменной активации с производительностью, согласованной с объемом образования костры.

На основании полученных данных оптимальным с точки зрения баланса эффективности и энергозатрат рекомендуется режим Р-3 ($W = 2250$ Вт, $t = 5$ мин).

Создание технологии локальной очистки сточных вод АПК: полученный сорбент может быть использован для создания очистных барьерных систем на предприятиях АПК, где существует риск загрязнения водных сред ионами тяжелых металлов (например, на предприятиях по производству минеральных удобрений, металлообработке сельхозтехники, в зооветеринарных комплексах).

Оборудование и аппаратное оформление: Для масштабирования процесса необходима разработка промышленного плазмохимического реактора, обеспечивающего равномерную обработку сыпучего материала (костры). Данное оборудование может быть интегрировано в линии переработки сельскохозяйственного сырья.

Таким образом, результаты работы демонстрируют научно-техническую возможность и экономическую целесообразность использования плазмохимической технологии для глубокой переработки отходов коноплеводства. Внедрение разработанного подхода позволит

предприятиям АПК не только решить проблему утилизации отходов, но и организовать производство востребованного СМ для нужд собственной водоочистки или реализации на рынке, что соответствует стратегии развития высокотехнологичного, ресурсосберегательного и экологически безопасного АПК.

Список литературы

1. Осокин В. М., Сомин В. А. Исследования по получению новых сорбентов из растительного сырья для очистки воды // Ползуновский вестник. 2013. №1.
2. Шайхиев, И. Г. Использование компонентов биомассы конопли (*Cannabis sativa*) и активированных углей из них для удаления загрязняющих веществ из водных сред. 1. Ионы металлов / И. Г. Шайхиев, Е. Н. Хабибрахманова, К. И. Шайхиева, Т. Р. Дебердеев // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2025. – № 4. – С. 2-11. – ISSN 1994-6260.
3. Petukhova Yu.N., Plyina S.I., Fursenko A.V., Nosyrev M.A. ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ОТ ИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ С ПОМОЩЬЮ СОРБЕНТОВ (51-54) // Евразийский Союз Ученых — публикация научных статей в ежемесячном научном журнале. PDF архив:-. 10.31618/ESU.2413-9335.2019.6.64.254
4. Хабибрахманова, Е. Н. Адсорбция ионов меди нативной и модифицированной конопляной кострой / Е. Н. Хабибрахманова, И. Г. Шайхиев, Р. З. Галимова, З. Т. Санатуллова // Российский химический журнал. – 2024. – Т. LXVIII, № 2. – С. 31–37.
5. Хабибрахманова Е.Н. Использование конопляной костры для очистки водных сред от ионов никеля / Е. Н. Хабибрахманова // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ). [Электронный ресурс]. - Краснодар: КубГАУ, 2026. - №01(215). - IDA [article ID]: 2152601043. - Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/01/pdf/43.pdf>, 1.438 у.п.л. <http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-215-043>
6. Shaikhiev I.G., Stepanova S.V., Sanatullova Z.T., Politaeva N.A., Kraisman N.V., Chusov A.N., Velmozhina K.A., Shinkevich P.S. Theoretical background of agricultural waste treatment by low pressure radio frequency discharge plasma flow to obtain oil sorbent // International Journal of Hydrogen Energy, 2026, Vol. 200, Article 153070. DOI 10.1016/j.ijhydene.2025.153070
8. Шайхиев И.Г., Низамов Р.Х., Абдуллин И.Ш., Фридланд С.В. Модификация альтернативного сорбента плазменной обработкой для увеличения нефтеемкости и гидрофобности // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2010. № 4. С. 24-27.
9. Шайхиев И.Г. Эколого-технологические основы модификации и применения отходов переработки шерсти и льна для очистки загрязненных вод; диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / КГТУ. Казань, 2011. 357 с.
10. Сабирзянова Р. Н., Красина И. В. Модификация текстильных материалов низкотемпературной плазмой пониженного давления //Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – Т. 15. – №. 17. – С. 56-57.
11. Христолюбова В. И., Хубатхузин А. А., Абдуллин И. Ш. Применение высокочастотной плазмы пониженного давления для модификации внутренних поверхностей изделий //Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – Т. 18. – №. 12. – С. 110-113.

12. Ejtemaei M. et al. Investigating the cold plasma surface modification of kaolin-and attapulgite-bound zeolite A //Journal of Industrial and Engineering Chemistry. – 2022. – Т. 106. – С. 113-127.
13. Huang Y. et al. Surface modification of activated carbon fiber by low-temperature oxygen plasma: Textural property, surface chemistry, and the effect of water vapor adsorption //Chemical engineering journal. – 2021. – Т. 418. – С. 129474.
14. Ye Z. et al. Synergistic effects of acid-plasma treatment on CO₂ capture towards carbon materials //Chemical Engineering Journal. – 2025. – Т. 507. – С. 160530.
15. Liyanage S. et al. Production and surface modification of cellulose bioproducts // Polymers. – 2021. – Т. 13. – №. 19. – С. 3433.
16. Peran J., Ercegović Ražić S. Application of atmospheric pressure plasma technology for textile surface modification //Textile Research Journal. – 2020. – Т. 90. – №. 9-10. – С. 1174-1197.
17. Vajpayee M., Singh M., Ledwani L. Non-thermal plasma treatment of cellulosic biopolymer to enhance its surface property for various applications: A review //Materials Today: Proceedings. – 2021. – Т. 43. – С. 3250-3255.
18. Chipera A. S., Borcia G. Stable surface modification by cold atmospheric-pressure plasma: Comparative study on cellulose-based and synthetic polymers //Polymers. – 2023. – Т. 15. – №. 20. – С. 4172.
19. ПНД Ф 14.1:2.46–96 Методика измерений массовой концентрации никеля в природных и сточных водах фотометрическим методом с диметилглиоксимом. – М.: Изд-во стандартов, 2013 – С. 1–22.

References

1. Osokin V. M., Somin V. A. Issledovaniya po polucheniyu novykh sorbentov iz rastitel'nogo syr'ya dlya ochistki vody // Polzunovskiy vestnik. 2013. №1.
2. Shaykhiev, I. G. Ispol'zovaniye komponentov biomassy konopli (*Cannabis sativa*) i aktivirovannykh ugley iz nikh dlya udaleniya zagryaznyayushchikh veshchestv iz vodnykh sred. 1. Iony metallov / I. G. Shaykhiev, E. N. Khabibrakhmanova, K. I. Shaykhieva, T. R. Deberdeev // Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik. – 2025. – № 4. – S. 2-11. – ISSN 1994-6260.
3. Petukhova Yu.N., Ilyina S.I., Fursenko A.V., Nosyrev M.A. OCHISTKA STOCHNYKH VOD OT IONOV TYAZHELYKH METALLOV S POMOSHCHYU SORBENTOV (51-54) // Evraziyskiy Soyuz Uchenykh — publikatsiya nauchnykh statey v ezhemesyachnom nauchnom zhurnale. PDF arkhiv:-. 10.31618/ESU.2413-9335.2019.6.64.254
4. Khabibrakhmanova, E. N. Adsorbtsiya ionov medi nativnoy i modifitsirovannoy konoplyanoy kostroy / E. N. Khabibrakhmanova, I. G. Shaykhiev, R. Z. Galimova, Z. T. Sanatullova // Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal. – 2024. – Т. LXVIII, № 2. – S. 31–37.
5. Khabibrakhmanova E.N. Ispol'zovaniye konoplyanoy kostry dlya ochistki vodnykh sred ot ionov nikelya / E. N. Khabibrakhmanova // Politematicheskiy setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta (Nauchnyy zhurnal KubGAU). [Elektronnyy resurs]. - Krasnodar: KubGAU, 2026. - №01(215). - IDA [article ID]: 2152601043. - Rezhim dostupa: <http://ej.kubagro.ru/01/pdf/43.pdf>, 1.438 u.p.l. <http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-215-043>
6. Shaikhiev I.G., Stepanova S.V., Sanatullova Z.T., Politaeva N.A., Kraisman N.V., Chusov A.N., Velmozhina K.A., Shinkevich P.S. Theoretical background of agricultural waste treatment by low pressure radio frequency discharge plasma flow to obtain oil sorbent // International Journal of Hydrogen Energy, 2026, Vol. 200, Article 153070. DOI 10.1016/j.ijhydene.2025.153070

7. Shaykhiev I.G., Stepanova S.V., Abdullin I.Sh. Vliyaniye obrabotki vysokochastotnoy plazmoy ponizhennogo davleniya na strukturnye i fiziko-khimicheskiye kharakteristiki otkhodov pererabotki l'na // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2011. № 8. S. 165-171.

8. Shaykhiev I.G., Nizamov R.Kh., Abdullin I.Sh., Fridland S.V. Modifikatsiya al'ternativnogo sorbenta plazmennoy obrabotkoy dlya uvelicheniya nefteyemkosti i gidrofobnosti // Zashchita okruzhayushchey sredy v neftegazovom komplekse. 2010. № 4. S. 24-27.

9. Shaykhiev I.G. Ekologo-tekhnologicheskiye osnovy modifikatsii i primeneniya otkhodov pererabotki shersti i l'na dlya ochistki zagryaznennykh vod; dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk / KGTU. Kazan', 2011. 357 s.

10. Sabirzyanova R. N., Krasina I. V. Modifikatsiya tekstil'nykh materialov nizkotemperaturnoy plazmoy ponizhennogo davleniya // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. – 2012. – T. 15. – №. 17. – S. 56-57.

11. Khristolyubova V. I., Khubatkuzin A. A., Abdullin I. Sh. Primneniye vysokochastotnoy plazmy ponizhennogo davleniya dlya modifikatsii vnutrennikh poverkhnostey izdeliy // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. – 2015. – T. 18. – №. 12. – S. 110-113.

12. Ejtemaei M. et al. Investigating the cold plasma surface modification of kaolin-and attapulgite-bound zeolite A // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. – 2022. – T. 106. – S. 113-127.

13. Huang Y. et al. Surface modification of activated carbon fiber by low-temperature oxygen plasma: Textural property, surface chemistry, and the effect of water vapor adsorption // Chemical engineering journal. – 2021. – T. 418. – S. 129474.

14. Ye Z. et al. Synergistic effects of acid-plasma treatment on CO₂ capture towards carbon materials // Chemical Engineering Journal. – 2025. – T. 507. – S. 160530.

15. Liyanage S. et al. Production and surface modification of cellulose bioproducts // Polymers. – 2021. – T. 13. – №. 19. – S. 3433.

16. Peran J., Ercegović Ražić S. Application of atmospheric pressure plasma technology for textile surface modification // Textile Research Journal. – 2020. – T. 90. – №. 9-10. – S. 1174-1197.

17. Vajpayee M., Singh M., Ledwani L. Non-thermal plasma treatment of cellulosic biopolymer to enhance its surface property for various applications: A review // Materials Today: Proceedings. – 2021. – T. 43. – S. 3250-3255.

18. Chiper A. S., Borcia G. Stable surface modification by cold atmospheric-pressure plasma: Comparative study on cellulose-based and synthetic polymers // Polymers. – 2023. – T. 15. – №. 20. – S. 4172.

19. PND F 14.1:2.46–96 Metodika izmereniy massovoy kontsentratsii nikelya v prirodnykh i stochnykh vodakh fotometricheskim metodom s dimetilglioksimom. – M.: Izdvo standartov, 2013 – S. 1–22.