

УДК 544.723

UDC 544.723

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

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОНОПЛЯНОЙ КОСТРЫ
ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОДНЫХ СРЕД ОТ ИОНОВ
НИКЕЛЯ**

Хабибрахманова Евгения Николаевна
Аспирант

Исследована эффективность применения отхода переработки костры конопли посевной для сорбции ионов никеля из водных растворов. Показано, что химическая модификация 3%-ными растворами NaOH и H_2SO_4 повышает сорбционную емкость материала с 46,0 до 77,6 и 67,2 мг/г соответственно. Методами ИК-спектроскопии и РФА установлены структурные изменения сорбента после модификации. Процесс сорбции описывается моделью Ленгмюра, является физическим и наиболее эффективен в нейтральной и слабощелочной среде. Результаты демонстрируют перспективность использования костры в качестве экономичного сорбента для очистки водных сред и утилизации отходов АПК

Ключевые слова: КОНОПЛЯНАЯ КОСТРЯ,
МОДИФИКАЦИЯ, ИОНЫ НИКЕЛЯ, СОРБЦИЯ

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-215-043>

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

**HEMP SHIVES AS A SORBENT FOR NICKEL
ION REMOVAL FROM AQUEOUS SOLUTIONS**

Habibrakhmanova Evgeniya Nikolaevna
postgraduate student

The efficiency of using hemp shives, a waste product from industrial hemp processing, for nickel ion (Ni^{2+}) sorption from aqueous solutions was investigated. Chemical modification with 3% NaOH and H_2SO_4 solutions was shown to increase the material's sorption capacity from 46.0 to 77.6 and 67.2 mg/g, respectively. Structural changes in the sorbent after modification were confirmed by FTIR and XRD analysis. The sorption process follows the Langmuir model, is physical in nature, and is most effective in neutral and weakly alkaline environments. The results demonstrate the potential of using hemp shives as a cost-effective sorbent for water treatment and agricultural waste utilization

Keywords: HEMP FIBERS, MODIFICATION,
NICKEL IONS, SORPTION

Введение

В современном агропромышленном комплексе одной из ключевых задач является рациональное использование побочных продуктов и отходов переработки сельскохозяйственного сырья. Переход к экономике замкнутого цикла диктует необходимость поиска путей их эффективной утилизации и создания продукции с добавленной стоимостью.

Объем образования побочной продукции и отходов в агропромышленном комплексе России остается крайне значительным. Согласно данным Федеральной службы государственной статистики (Росстат), валовой сбор зерна, в частности, в 2023 году составил 147,6 млн. тонн [1]. Известно, что выход побочной продукции (соломы, половы, костры, плодовых оболочек и т.д.) при возделывании зерновых и

<http://ej.kubagro.ru/2026/01/pdf/43.pdf>

технических культур может составлять от 80% до 130% от массы основного продукта [2]. Таким образом, даже без учета отходов животноводства и перерабатывающей промышленности, ежегодно в стране образуется огромное количество растительных отходов, проблема утилизации или рационального использования которых является крайне актуальной задачей.

В России зафиксирован стабильный рост производства технической (промышленной) конопли (*Cannabis sativa*). Сельскохозяйственное возделывание этой культуры осуществляется по двум направлениям: для получения семян и для производства волокна [3]. Биомасса растения служит сырьем для изготовления широкого спектра продукции, насчитывающего, по некоторым данным, до 25 тысяч наименований.

Волокно (пенька), содержание которого в стеблях достигает 28–32%, отличается исключительной прочностью и устойчивостью к воздействию влаги. Благодаря этим свойствам, оно применяется в производстве морских канатов, сердечников для стальных тросов, веревок, рыболовных сетей, пожарных рукавов, брезентов, парусины, мешковины, а также обивочных и драпировочных тканей [3].

Конопляная костра является основным побочным продуктом при переработке (трепании) стеблей. Она представляет собой пористые фрагменты стебля, масса которых может достигать 70% от исходной биомассы [4]. По своему составу костра характеризуется низкой влажностью (менее 10%), а ее основными структурными компонентами выступают целлюлоза и лигнин [5].

Рост объемов производства технической конопли делает актуальным вопрос эффективного применения отходов ее переработки — костры. В настоящее время существует ряд практических направлений ее использования. Одним из наиболее распространенных является применение в качестве подстилочного материала в животноводстве, на

которое приходится до 70% всего европейского потребления костры. Высокая влагоёмкость (способность впитывать влагу в 4 раза больше собственного веса) и пригодность для последующего компостирования определяют её ценность для этой отрасли. Крупнофракционная костра используется для содержания крупного рогатого скота, лошадей и животных в зоопарках, а её природные антисептические свойства помогают предотвращать такие заболевания, как копытная гниль [5].

Также костра конопли используется в садоводстве как мульчирующий материал, который оптимизирует структуру почвы и служит хорошим органическим удобрением для разрыхления и оздоровления почв. Благодаря тому, что она надолго удерживает влагу в почве, питательные вещества не так быстро вымываются и могут дольше и равномернее поглощаться растениями [5, 6].

Наиболее широкое применение конопляная костра находит в строительной отрасли. Исследования подтверждают её эффективность в качестве сырья для создания разнообразных материалов. К ним относятся экологичные теплоизоляторы [7-10], композитные древесно-стружечные плиты [11, 12], а также легкий костробетон [13] и иные изделия для строительства [14].

Помимо этого, костра рассматривается как сырье для производства биотоплива, в частности, биоэтанола [15, 16]. Её также можно перерабатывать для выделения ценных химических компонентов — целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина [17] с последующим синтезом на их основе молочной кислоты [18] и других реагентов [19]. Перспективным направлением является изготовление из костры углеродных материалов, таких как карбонизаты и активированные угли [20-22], для использования в промышленности.

Одним из интенсивно развивающихся мировых трендов является применение вторичного сырья сельского хозяйства, богатого целлюлозой,

для создания сорбционных материалов (СМ). Целью их использования является очистка сточных и природных вод от разнообразных загрязнителей. Научные данные подтверждают сорбционную эффективность отходов, полученных при переработке широкого спектра культур: злаковых (ячмень [23], гречиха [24], овес [25], рожь [26], сорго [27], просо [28]), бахчевых [29], бобовых [30], луковичных [31, 32], а также жома сахарной свеклы [33]. Эти материалы успешно применяются для извлечения из водной среды ионов тяжелых металлов, углеводородов, синтетических красителей и пестицидов.

Как следует из наших более ранних обзоров [34-36], конопляная костра также демонстрирует хорошую эффективность в качестве сорбента для очистки водных сред от ионов металлов и органических загрязнителей. В частности, в наших исследованиях была установлена её высокая эффективность при извлечении ионов меди из модельных растворов, причем её сорбционная емкость оказалась сопоставима с аналогичными показателями для других видов агроотходов. Улучшения сорбционных характеристик костры по отношению к ионам меди удалось достичь путем её химической модификации 3%-ными растворами серной кислоты и гидроксида натрия.

Одной из серьезных экологических угроз, в том числе для агроценозов, является загрязнение водных объектов ионами тяжелых металлов, в частности никеля. Источниками никеля являются стоки металлургических, гальванических производств, а также использование осадков СВ в качестве удобрений. Избыток соединений и ионов никеля токсичен для живых организмов и растений.

В этой связи разработка экологически безопасных и экономически выгодных методов очистки, основанных на использовании природных сорбентов, представляется крайне востребованной. Конопляная костра, как возобновляемый, легкодоступный и низкозатратный материал, является

перспективным для решения данной задачи. В продолжение исследовательских работ по исследованию конопляной костры и ее модификаторов в качестве сорбционного материала ионов тяжелых металлов [36], на основании вышеизложенного, в настоящей работе приведены данные по извлечению изучаемым отходом от переработки биомассы *Cannabis sativa* ионов никеля из модельных растворов.

Экспериментальная часть

Первоначально строились изотермы адсорбции ионов Ni^{2+} нативной и модифицированной конопляной кострой. Для этого были приготовлены растворы с концентрацией ионов Ni^{2+} от 5 до 2000 мг/дм³. В плоскодонные колбы объёмом 250 см³ помещались навески СМ массой 1 г. Далее в колбы приливалось по 100 см³ модельной СВ с различной концентрацией ионов Ni^{2+} . Колбы плотно закрывались пробками и устанавливались орбитальный лабораторный шейкер PSU-20 с платформой для колб 250-300 см³ 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 диметилглиоксисом ПНД Ф 14.1:2.46–96 на спектрофотометре В-1100 [37].

. Расчет количества ионов Ni^{2+} , сорбированных 1 г СМ (A) в мг/г, проводился по формуле 1:

$$A = \frac{(Cs - Ce) \cdot V}{m}, \quad (1)$$

где

Cs – исходная концентрация иона металла, мг/дм³;

Ce – конечная концентрация иона металла, мг/дм³;

V – объем раствора, дм^3 ;

m – масса СМ, г.

При различных равновесных концентрациях ионов Ni^{2+} по полученным значениям сорбционной емкости (A) строились изотермы адсорбции при температурах 15 °C, 25 °C и 35 °C.

Для активации сорбционной емкости и изучения влияния кислотной и щелочной обработки на структуру костры, исходный материал модифицировался 3 %-ными растворами серной кислоты (H_2SO_4) и гидроксида натрия (NaOH). Процесс проводился в режиме постоянного перемешивания в течение 5 часов при температуре 20 °C. Полученный модифицированный СМ тщательно промывался дистиллированной водой до достижения нейтрального значения pH и высушивался до постоянной массы.

Для установления оптимальных условий сорбции ионов никеля была изучена зависимость эффективности очистки от кислотности среды. Опыты проводили с модельной сточной водой, содержащей 150 $\text{мг}/\text{дм}^3$ ионов Ni^{2+} . В серии экспериментов pH раствора варьировался в диапазоне от 4,0 до 8,0. Навески СМ массой 1,0 г контактировали с 100 см^3 модельного раствора при постоянном перемешивании в течение 5 часов для достижения сорбционного равновесия. После фильтрации остаточную концентрацию ионов никеля в фильтрате определяли аналитическими методами. На основании полученных данных была установлена зависимость степени извлечения иона металла от значений pH среды.

Для идентификации функциональных групп и анализа изменений в химической структуре нативной и модифицированной костры были получены ИК-спектры поглощения на Фурье-ИК-спектрометре марки «Nicolet iS5» в диапазоне 400–4000 см^{-1} .

Кристаллическая структура костры и ее модификаторов исследовалась методом рентгеноструктурного анализа (РСА) на дифрактометре марки

«Rigaku Ultima IV». Целью анализа было выявление влияния химической модификации на степень кристалличности СМ.

Обсуждение результатов

Первоначально экспериментально установлено, что максимальная сорбционная емкость (A_{max}) нативной конопляной костры по отношению к ионам Ni^{2+} составляет 46,0 мг/г. Сравнение данного показателя с литературными данными для других целлюлозосодержащих отходов (таблица 1) демонстрирует его конкурентоспособность и позволяет отнести конопляную костру к числу эффективных природных СМ по ионам никеля.

Таблица 1 – Значения максимальной сорбционной емкости по ионам никеля некоторых нативных сельскохозяйственных отходов.

| Сорбционный материал | Значение A_{max} по ионам Ni^{2+} , мг/г | Литература |
|---------------------------------|--|------------|
| плодовые оболочки зерен пшеницы | 80,3 | [25] |
| плодовые оболочки зерен овса | 82,7 | [25] |
| плодовые оболочки зерен ячменя | 87,0 | [23] |
| цедра мандаринов | 81,3 | [38] |
| оболочки стручков гороха | 50,0 | [39] |
| кожура арбуза | 35,3 | [40] |
| початки кукурузы | 7,5 | [41] |
| оболочки орехов кешью | 18,9 | [42] |

Несмотря на высокий исходный потенциал, для дальнейшего расширения практического применения материала представляется целесообразным исследовать пути направленного повышения его сорбционной емкости. Как показывают данные литературы, для модификации структуры и увеличения функциональности природных сорбентов успешно применяются методы химической обработки, а также различные физико-химические способы активации.

Согласно данным предыдущим исследованиям [36, 39], одним из наиболее экономичных и эффективных способов повышения сорбционной емкости целлюлозосодержащих материалов по отношению к ионам

тяжелых металлов является их обработка слабоконцентрированными (1–3 %) растворами кислот и щелочей. Было установлено, что увеличение концентрации модифицирующего реагента способствует увеличению значений A_{max} , однако дальнейшее ее повышение приводит к обугливанию структуры СМ.

Исходя из этого, для модификации конопляной костры были выбраны 3 %-ные растворы H_2SO_4 и $NaOH$ в соответствии с ранее описанной методикой. Критерием выбора данных реагентов послужила их доступность и низкая стоимость. Полученные после химической обработки образцы СМ использовались для построения изотерм адсорбции, представленных на рисунке 1.

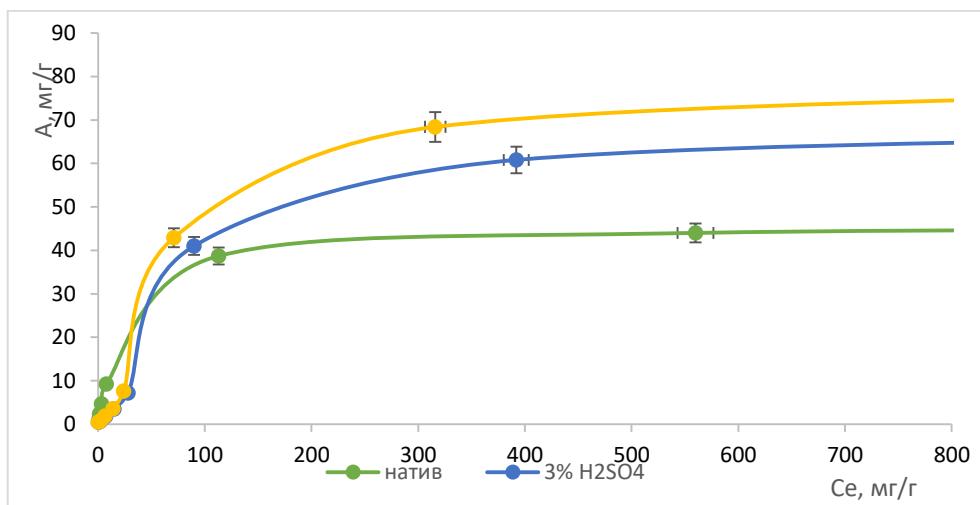


Рисунок 1 – Изотермы адсорбции ионов Ni^{2+} образцами костры конопли: 1 - нативной и модифицированной при температуре 25°C 3 %-ными растворами: 2 - серной кислоты, 3 - гидроксида натрия

Изотермы адсорбции, представленные на рисунке 1, относятся к изотермам I типа по классификации IUPAK или L-типу по классификации Гильса и описывают мономолекулярную адсорбцию ионов Ni^{2+} на нативных и модифицированных образцах конопляной костры [43].

Проведенная модификация конопляной костры показала разнонаправленную эффективность применяемых реагентов. Обработка

3%-ным раствором серной кислоты привела к умеренному росту сорбционной емкости – с 46,0 до 67,2 мг/г. В то же время обработка 3%-ным раствором NaOH оказалась более эффективной, позволив достичь значения максимальной сорбционной емкости $A_{\max} = 77,6$ мг/г.

Увеличение сорбционных характеристик модификаторов конопляной костры обусловлено двумя процессами в ходе обработки: кислотным или щелочным гидролизом биополимеров, входящих в состав СМ и образованием на поверхности последних различных функциональных группировок, способствующих некоторому увеличению сорбционных характеристик по ионам Ni^{2+} . Подтверждением данного утверждения служит изменение картины ИК-спектров (рис. 2) образцов нативной костры и после обработки растворами химических реагентов.

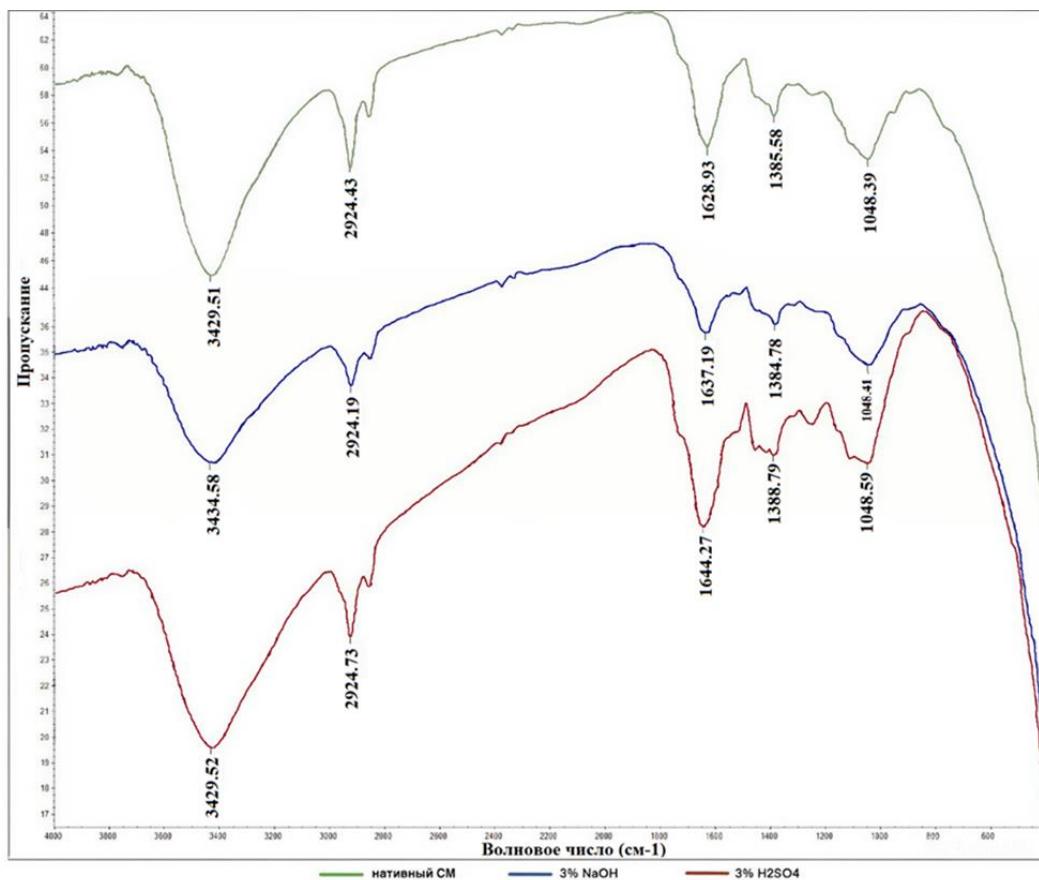


Рисунок 2 – ИК-спектры конопляной костры: а) – нативной, б) – модифицированной 3 %-ным раствором H_2SO_4 , в) – модифицированной 3 %-ным раствором NaOH

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. Подтверждается данное обстоятельство изменением картины дифрактограмм образцов СМ (рис. 3). и снижением степени кристалличности модифицированных образцов костры. Так, значение кристалличности для нативного образца костры составило 0,19, после обработки 3 %-ными растворами NaOH и H_2SO_4 – 0,15 и 0,13, соответственно.

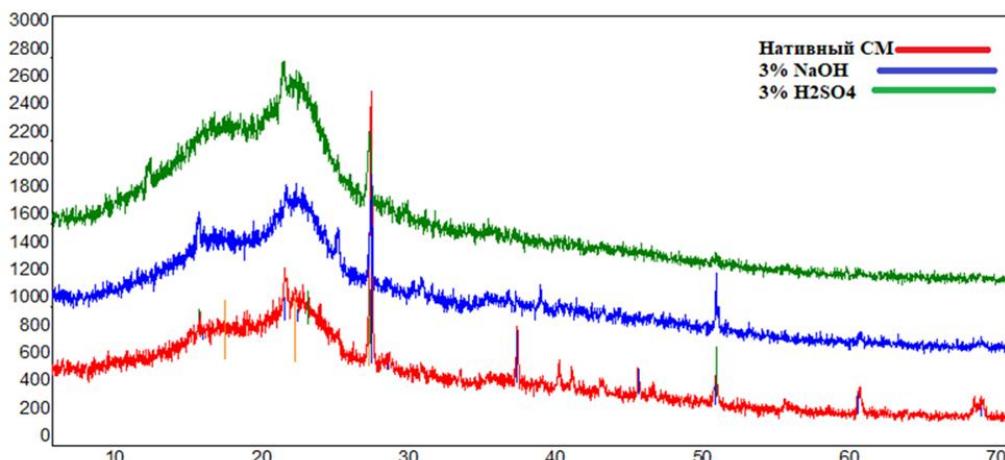


Рисунок 3 – Дифрактограммы образцов конопляной костры: а) – нативной, б) – модифицированной 3 %-ным раствором H_2SO_4 , в) – модифицированной 3 %-ным раствором NaOH

Для определения механизма процесса адсорбции, полученные изотермы обрабатывалась с помощью мономолекулярных моделей адсорбции Ленгмюра, Фрейндлиха, Дубинина-Радушкевича и Темкина.

Значения полученных уравнений регрессии и коэффициентов аппроксимации (R^2) приведены в таблице 2. Из данных, приведенных в табл. 2, видно, что во всех трех случаях наиболее точно процесс адсорбции ионов Ni^{2+} описывается моделью Ленгмюра. По адекватности соответствия модели адсорбции ионов Ni^{2+} биомассой конопли расположились в

следующий ряд: Ленгмюра > Фрейндлиха > Темкина > Дубинина-Радушкевича.

Таблица 2. Уравнения регрессии и коэффициенты аппроксимации моделей адсорбции ионов Ni^{2+} нативной и модифицированной конопляной кострой

| Костра конопли посевной нативная | Модель адсорбции | | | |
|-----------------------------------|--|--|---|---|
| | Ленгмюра $y = 0,77x - 0,02$ $R^2 = 0,99$ | Фрейндлиха $y = 0,25x - 0,24$ $R^2 = 0,68$ | Дубинина-Радушкевича $y = -0,37x + 3,52$ $R^2 = 0,39$ | Темкина $y = 6,95x + 0,78$ $R^2 = 0,95$ |
| Модиф. 3% H_2SO_4 | $y = 0,82x + 0,24$ $R^2 = 0,99$ | $y = 0,84x - 0,73$ $R^2 = 0,98$ | $y = -0,61x + 3,14$ $R^2 = 0,39$ | $y = 9,78x - 8,57$ $R^2 = 0,81$ |
| Модиф. 3% NaOH | $y = 0,59x + 0,25$ $R^2 = 0,96$ | $y = 0,73x - 0,14$ $R^2 = 0,92$ | $y = -0,47x + 3,14$ $R^2 = 0,30$ | $y = 10,89x - 7,88$ $R^2 = 0,79$ |

Используя полученные уравнения Ленгмюра и Дубинина-

Радушкевича по уравнению 2

$$\Delta G^0 = -R \cdot T \cdot \ln K_L \quad (2)$$

где

ΔG – энергия Гиббса, Дж/моль;

R – универсальная газовая постоянная;

T – температура, К;

K_L – константа Ленгмюра.

Рассчитанные значения энергии Гиббса (ΔG^0) и энергии сорбции (E_a) исследуемых процессов, приведенные в таблице 3.

Таблица 3. Значения термодинамических параметров (энергии Гиббса и энергии сорбции) процессов адсорбции ионов Ni^{2+} нативными и модифицированными образцами костры конопли

| модификат костры | ΔG^0 , кДж/моль | E , кДж/моль |
|---|-------------------------|----------------|
| нативная | - 5,682 | 2,741 |
| 3 %-ным раствором H_2SO_4 | -5,964 | 3,214 |
| 3 %-ным раствором NaOH | -6,337 | 3,482 |

Значения энергии Гиббса находятся в пределах от -7 кДж/моль до -5 кДж/моль, а энергия сорбции в пределах от 2,9 кДж/моль до 3,3 кДж/моль, что свидетельствует о протекании самопроизвольной физической адсорбции. При этом увеличение значений энергии Гиббса по модулю и

энергии сорбции при модификации конопляной костры растворами серной кислотой и гидроксидом натрия говорит о том, что процесс протекает наиболее предпочтительно [43].

Обработкой полученных изотерм адсорбции ионов Ni^{2+} исследуемыми сорбционными материалами при трёх температурах в рамках модели Ленгмюра определены значения констант Ленгмюра (K_L) данных процессов и используя уравнения 3 и 4 определены значения энталпии (ΔH) и энтропии (ΔS) процессов адсорбции, приведенные в таблице 4.

$$\Delta H^\circ = R \cdot \frac{T_2 \cdot T_1}{T_2 - T_1} \cdot \ln \frac{K_{1.2}}{K_{1.1}} \quad (3)$$

$$\Delta S^\circ = \frac{\Delta H^\circ - \Delta G^\circ}{T} \quad (4)$$

Таблица 4. Значения констант Ленгмюра, а также термодинамических параметров (энталпии и энтропии) процессов адсорбции ионов никеля (II) нативными и модифицированными образцами костры конопли.

| Сорбционный материал | T, °C | K_L | ΔG° , кДж/моль | ΔH° , кДж/моль | ΔS , Дж/(моль·К) |
|---|-------|-------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| Нативная костра конопли | 15 | 3,48 | -2,83 | 6,84 | 262,57 |
| | 25 | 8,32 | -5,68 | | |
| | 35 | 29,27 | -9,42 | | |
| Костра конопли (+ H_2SO_4) | 15 | 8,36 | -5,19 | 10,48 | 53,28 |
| | 25 | 8,86 | -5,96 | | |
| | 35 | 10,99 | -6,77 | | |
| Костра конопли (+ NaOH) | 15 | 11,21 | -5,99 | 8,87 | 50,47 |
| | 25 | 12,34 | -6,33 | | |
| | 35 | 14,64 | -7,45 | | |

При этом, за окончательные значения энталпий и энтропий процессов сорбции принимались средние арифметические значения трёх интервалов температур: 15 – 25 °C, 25 – 35 °C и 15 – 35 °C. Определенные значения энталпий для исследуемых процессов адсорбции менее 100 кДж/моль также подтверждают протекание физической адсорбции.

В дальнейшем исследовалось влияние температуры и значений pH водной среды на эффективность очистки по ионам Ni^{2+} исследуемыми

образцами СМ. Результаты исследования влияния температуры на протекание процесса адсорбции ионов никеля (II) нативными и модифицированными образцами костры конопли представлены на рисунке 4.

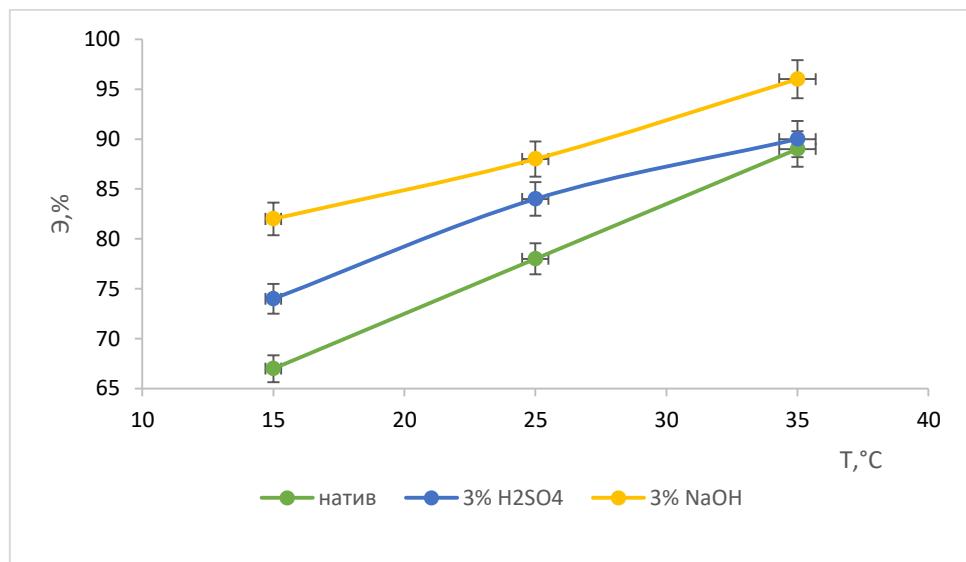


Рисунок 4 – Влияние температуры на эффективность протекания процесса адсорбции ионов Ni^{2+} образцами костры конопли: 1 – нативной и модифицированной 3 %-ными растворами: 2 – серной кислотой, 3 – гидроксидом натрия

Из графических зависимостей, приведенных на рисунке 4, видно, что при увеличении температуры эффективность очистки по отношению к ионам никеля (II) всех трех исследованных СМ возрастает.

Влияние значение pH среды на эффективность (\mathcal{E}) протекания процесса адсорбции представлены на рисунке 5.

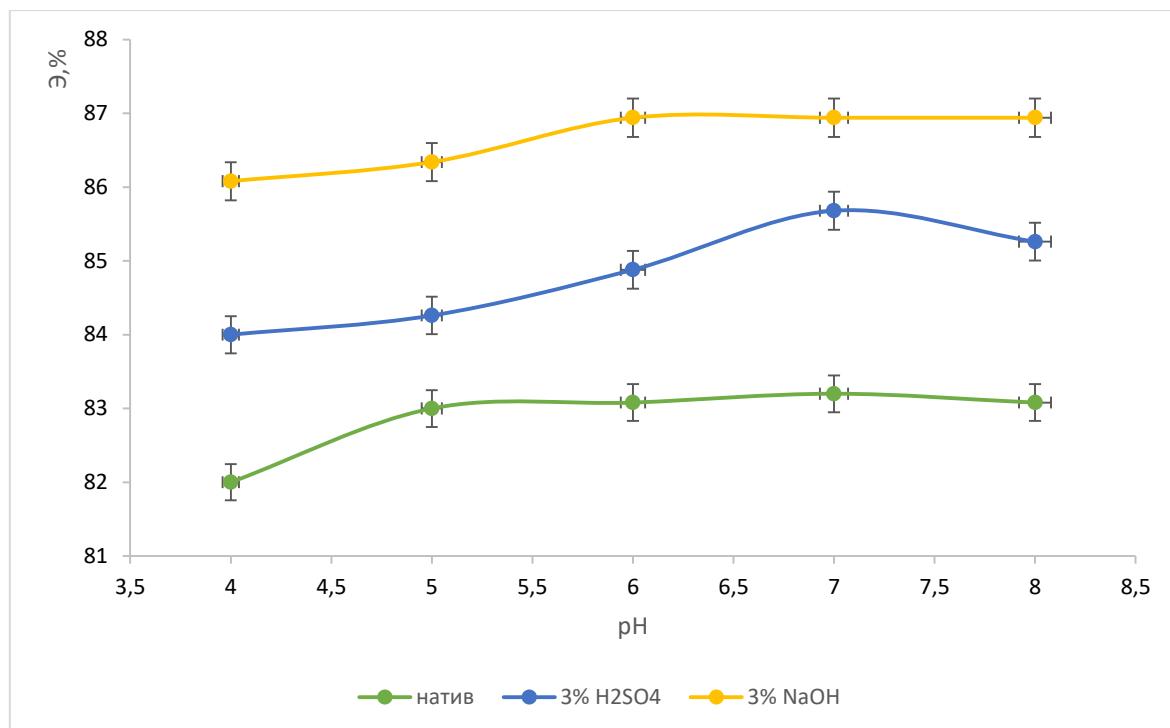


Рисунок 5 – Влияние pH среды на эффективность протекания процесса адсорбции ионов Ni^{2+} образцами костры конопли: 1 - нативными и модифицированными: 2 – 3 % раствором серной кислотой, 3 – 3 % раствором гидроксида натрия

Из графических зависимостей, приведенных на рисунке 5, видно, что процесс адсорбции ионов никеля (II) как нативными, так и модифицированными образцами костры конопли наиболее эффективно протекает в нейтральной и щелочной среде.

Заключение

Проведенными исследованиями показано, что конопляная костра, являясь отходом переработки сельскохозяйственного сырья, обладает высокой и конкурентоспособной сорбционной емкостью по отношению к ионам никеля (II), достигающей для нативного материала 46,0 мг/г.

Установлено, что химическая модификация костры 3% растворами NaOH и H_2SO_4 является экономически эффективным способом значительного повышения ее сорбционной емкости — с 46,0 до 77,6 и 67,2

мг/г, соответственно. Данное обстоятельство позволяет рассматривать костру конопли как перспективный материал для создания на ее основе недорогих СМ для извлечения ионов никеля из водных сред.

Методами ИК-спектроскопии и РФА показано, что увеличение сорбционной емкости после модификации связано с процессами кислотного и щелочного гидролиза биополимеров, приводящими к изменению пористой структуры и химического состава поверхности материала.

Термодинамический анализ показал, что процесс сорбции является самопроизвольным (отрицательные значения ΔG^0) и физическим по своей природе (значения $E \sim 2.7\text{--}3.5$ кДж/моль, $\Delta H^0 < 100$ кДж/моль). Наибольшая эффективность процесса наблюдается в нейтральной и слабощелочной среде ($\text{pH} = 7\text{--}8$) и повышается с ростом температуры.

С точки зрения технологий и оборудования для агропромышленного комплекса, результаты работы позволяют сформулировать следующие рекомендации по внедрению:

Технологическая интеграция: Процесс модификации костры может быть органично встроен в действующие технологические линии предприятий по переработке технической конопли. Химическая обработка может выполняться после этапа трепания и сепарации волокна, с использованием имеющегося оборудования для мойки, отжима и сушки сельхозсырья (например, барабанные или шнековые моечные машины, центрифуги, ленточные или барабанные сушилки).

Оборудование для модификации: Для проведения химической активации не требуется сложного или уникального оборудования. Достаточно емкостного реактора (металлического или полимерного, стойкого к слабым кислотам и щелочам) с системой перемешивания (мешалкой лопастного или якорного типа) и контроля температуры. Стандартные линии приготовления и дозирования рабочих растворов

(емкости, насосы) также относятся к типовому оснащению многих агроперерабатывающих цехов.

Решение проблемы отходов и создание новой продукции: Внедрение данной технологии прямо на месте образования отхода позволяет предприятию трансформировать костру из статьи затрат на утилизацию (транспортировка, захоронение) в товарный продукт. Полученный сорбент может быть использован:

Для внутренних нужд — очистка ливневых или промывных вод самого предприятия.

Как коммерческий продукт для локальных промышленных предприятий (гальванические цеха, небольшие металлообрабатывающие производства), фермерских хозяйств или муниципальных очистных сооружений, формируя новое направление доходов.

Соответствие принципам экономики замкнутого цикла: реализация данной технологии позволяет создать замкнутый, безотходный цикл переработки конопли на отдельном предприятии или в рамках кластера (коноплеводческое хозяйство — перерабатывающий завод). Это напрямую способствует выполнению задач по ресурсосбережению и экологизации АПК.

Таким образом, разработанный метод не только решает фундаментальную задачу создания эффективного сорбента, но и предлагает конкретную, технически реализуемую и экономически обоснованную схему утилизации отходов переработки конопли с получением востребованного продукта.

Список литературы

1. Росстат. Валовой сбор сельскохозяйственных культур в России в 2023 году [Электронный ресурс] // Федеральная служба государственной статистики. – URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13233> (дата обращения: 15.10.2025).
2. Аксенов, В. В. Ресурсосберегающая технология переработки отходов АПК / В. В. Аксенов, А. И. Резепин // Ползуновский вестник. – 2011. – № 2-1. – С. 76–80.

3. Исламгулов, Д. Р. Состояние и перспективы развития коноплеводства / Д. Р. Исламгулов, Г. Г. Бикбаева // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. – 2020. – № 4 (56). – С. 36–40.
4. Дубровин, М. С. Применение технической конопли в производстве широкого спектра продукции различного назначения / М. С. Дубровин // International Agricultural Journal. – 2022. – № 2. – С. 925–942.
5. Жарких, О. А. О перспективах глубокой переработки конопледорудции / О. А. Жарких // Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства. – 2021. – № 23. – С. 184–187.
6. Kołodziej, J. Utilization of hemp shives for various purposes – a review / J. Kołodziej, A. Kicińska-Jakubowska // Journal of Natural Fibers. – 2025. – Vol. 22, No. 1. – Art. 2448016. – P. 1–17.
7. Zampori, L. Life cycle assessment of hemp cultivation and use of hemp-based thermal insulator materials in buildings / L. Zampori, G. Dotelli, V. Vernelli // Environmental Science & Technology. – 2013. – Vol. 47, No. 13. – P. 7413–7420.
8. Kosiński, P. Thermal properties of hemp shives used as insulation material in construction industry / P. Kosiński, P. Brzyski, M. Tunkiewicz, Z. Suchorab, D. Wiśniewski, P. Palczyński // Energies. – 2022. – Vol. 15, No. 7. – Art. 2461. – P. 1–18.
9. Brzyski, P. Composite materials based on hemp and flax for low-energy buildings / P. Brzyski, D. Barnat-Hunek, Z. Suchorab, G. Łagód // Materials. – 2017. – Vol. 10, No. 5. – Art. 510. – P. 1–23.
10. Колосова, А. С. Современные эффективные теплоизоляционные материалы на органической основе / А. С. Колосова, Е. С. Пикалов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2021. – № 4. – С. 74–85.
11. Zvīrgzds, K. Production of particleboard using various particle size hemp shives as filler / K. Zvīrgzds, E. Kirilovs, S. Kukle, U. Gross // Materials. – 2022. – Vol. 15, No. 3. – Art. 886. – P. 1–19.
12. Manzi, S. New composite panels with hemp hurds for sustainable buildings Extended abstract / S. Manzi, E. Sassoni, A. Motori, M. Montecchi, M. Canti // Environmental Engineering and Management Journal. – 2013. – Vol. 12, S11. – P. 31–34.
13. Sinka, M. Enhancement of lime-hemp concrete properties using different manufacturing technologies / M. Sinka, L. Radina, G. Sahmenko, A. Korjakins, D. Bajare // Academic Journal of Civil Engineering. – 2015. – Vol. 33, No. 2. – P. 301–308.
14. Kidalova, L. Application of hemp in preparation of building materials / L. Kidalova, E. Terpakova, N. Stevulova, A. Sicakova // Czasopismo Techniczne Chemia. – 2011. – Vol. 108. – P. 107–112.
15. González-García, S. Life cycle assessment of hemp hurds use in second generation ethanol production / S. González-García, L. Luo, M. T. Moreira, G. Feijoo, G. Huppes // Biomass and Bioenergy. – 2012. – Vol. 36. – P. 268–279.
16. Abraham, R. E. Bioprocessing of hemp hurd (*Cannabis sativa*) for biofuel production : дис. ... докт. философии / R. E. Abraham ; Deakin University. – Australia, 2014. – 210 p.
17. Gandolfi, S. Hemp hurds biorefining for chemicals productions. Chemical characterization, organosolv fractionation and enzymatic depredation for sugars exploitation : дис. ... докт. биотехнологии / S. Gandolfi ; Milan. – 2015. – 88 p.
18. Gandolfi, S. Hemp hurds biorefining: A path to green 1-(+)-lactic acid production / S. Gandolfi, L. Pistone, G. Ottolina, P. Xu, S. Riva // Bioresource Technology. – 2015. – Vol. 191. – P. 59–65.22. Sert S., Gültekin Ş.S., Kaya D.D., Körlü A. Development of activated carbon from hemp hurd for EMI shielding and supercapacitors via one-step microwave

pyrolysis without inert gas // Biomass Conversion and Biorefinery. 2025. Vol. 15. No 10. P. 16087-16106.

19. Sarker, M. Biorefinery of industrial hemp for value-added products / M. Sarker, C. Wan // Advances in Bioenergy. – 2022. – Vol. 7. – P. 343–366.

20. Liu, S. Activated carbon derived from bio-waste hemp hurd and retted hemp hurd for CO₂ adsorption / S. Liu, L. Ge, S. Gao, L. Zhuang, Z. Zhu, H. Wang // Composites Communications. – 2017. – Vol. 5. – P. 27–30.

21. Sun, W. Hemp-derived activated carbons for supercapacitors / W. Sun, S. M. Lipka, C. Swartz, D. Williams, F. Yang // Carbon. – 2016. – Vol. 103. – P. 181–192.

22. Sert, S. Development of activated carbon from hemp hurd for EMI shielding and supercapacitors via one-step microwave pyrolysis without inert gas / S. Sert, S. S. Gultekin, D. D. Kaya, A. Körülü // Biomass Conversion and Biorefinery. – 2025. – Vol. 15, No. 10. – P. 16087–16106.

23. Abdić Š., Memić M., Šabanović E., Sulejmanović J. and Begić S. International Journal of Environmental Science and Technology. 2018. 15(12). P. 2511–2518.24.

24. Mongioví, C.; Crini, G. Copper Recovery from Aqueous Solutions by Hemp Shives: Adsorption Studies and Modeling. Processes 2023, 11, 191. <https://doi.org/10.3390/pr11010191>.

25. Свергузова, С. В. Использование отходов от переработки биомассы овса в качестве сорбционных материалов для удаления поллютантов из водных сред (обзор литературы) / С. В. Свергузова, И. Г. Шайхиев, А. С. Гречина, К. И. Шайхиева // Экономика строительства и природопользования. – 2018. – № 2 (67). – С. 51–60.

26. Shaikhiev, I. G. Using rye (Secale cereale) processing wastes as sorption materials for removing pollutants from aquatic environments / I. G. Shaikhiev, S. V. Sverguzova, K. I. Shaikhieva, T. R. Deberdeev // Polymer Science, Series D. – 2023. – Vol. 16, No. 3. – P. 651–656.

27. Chergui, S.; Yeddou, A.R.; Chergui, A.; Halet, F.; Nadjemi, B.; Ould-Dris, A. Removal of cyanide from aqueous solutions by biosorption onto sorghum items: kinetic, equilibrium, and thermodynamic studies. J. Hazard. Toxic Radioact. Waste 2022, 26, 04021037, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HZ.2153-5515.0000647](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000647)

28. Shaikhiev, I. G. Components of millet biomass as sorption materials to remove various pollutants from aqueous media (a brief literature review) / I. G. Shaikhiev, N. V. Kraysman, S. V. Sverguzova // Materials International. – 2024. – Vol. 6, No. 4. – Art. 37. – P. 1–13.

29. Shaikhiev, I. G. Using cucurbits by-products as reagents for disposal of pollutants from water environments (a literature review) / I. G. Shaikhiev, N. V. Kraysman, S. V. Sverguzova // Biointerface Research in Applied Chemistry. – 2021. – Vol. 11, No. 5. – P. 12689–12705.

30. Шайхиева, К. И. Использование биомассы и отходов от переработки фасоли (*Phaseolus vulgaris*) и гороха (*Pisum sativum*) в качестве сорбционных материалов для удаления поллютантов из водных сред (обзор литературы) / К. И. Шайхиева, С. В. Фридланд, С. В. Свергузова // Химия растительного сырья. – 2021. – № 4. – С. 47–64.

31. Repo E. EDTA-and DTPA-functionalized silica gel and chitosan adsorbents for the removal of heavy metals from aqueous solutions. Lappeenranta University of Technology Laboratory of Green Chemistry, 2021.

32. Shaikhiev, I. G. Use of garlic processing by-products to remove pollutants from aqueous media / I. G. Shaikhiev, N. V. Kraysman, S. V. Sverguzova // Biointerface Research in Applied Chemistry. – 2022. – Vol. 12, No. 4. – P. 4518–4528.

33. Шайхиева, К. И. Использование нативного и модифицированных образцов жома сахарной свеклы (*Beta vulgaris*) в качестве сорбционных материалов для удаления

загрязняющих веществ из водных сред / К. И. Шайхиева, С. В. Степанова, И. Г. Шайхиев, С. В. Свергузова // Химия растительного сырья. – 2024. – № 3. – С. 49–70.

34. 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.

35. Шайхиев, И. Г. Использование компонентов биомассы конопли (*Cannabis sativa*) и активированных углей из них для удаления загрязняющих веществ из водных сред. 2. – 2025. – № 6. – С. 16–24.

36. 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.

37. Степанова, С. В. Отходы переработки зерновых культур в качестве сорбционных материалов ионов никеля / С. В. Степанова, И. Г. Шайхиев // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – С. 181–183.

38. Abdolali, A. A breakthrough biosorbent in removing heavy metals: Equilibrium, kinetic, thermodynamic and mechanism analyses in a lab-scale study / A. Abdolali, H. H. Ngo, W. Guo, S. Lu, S.-S. Chen, N. C. Nguyen, X. Zhang, J. Wang, Y. Wu // Science of the Total Environment. – 2016. – Vol. 542. – P. 603–611.

39. Зиганшин, Б. Г. Влияние реагентной модификации оболочек стручков гороха (*Pisum sativum*) на сорбционные характеристики по ионам тяжелых металлов / Б. Г. Зиганшин, К. И. Шайхиева, С. В. Степанова, Р. З. Галимова, Е. И. Байгильдеева // Вестник Курганской ГСХА. – 2023. – № 3 (47). – С. 52–61.

40. Vijayaraghavan, J. Removal of Ni (II) Ions from wastewater by raw and modified plant wastes as adsorbents: a review / J. Vijayaraghavan, J. Thivya // Iranian Journal of Chemistry and Chemistry Engineering. – 2022. – Vol. 41, No. 1. – P. 1–33.

41. Saeed, A. A. H. Effect of adsorption parameter on the removal of nickel (II) by low-cost adsorbent extracted from corn cob / A. A. H. Saeed, N. Y. Harun, S. Sufian, M. F. B. Aznan // International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology. – 2020. – Vol. 11, No. 9. – P. 1–9.

42. Bello, O. S. Sequestering nickel (II) ions from aqueous solutions using various adsorbents: A Review / O. S. Bello, K. A. Adegoke, O. U. Bello, I. O. Lateef // Pakistan Journal of Analytical & Environmental Chemistry. – 2014. – Vol. 15, No. 1. – P. 1–17.

43. Галимова, Р. З. Обработка результатов исследования процессов адсорбции с использованием программного обеспечения Microsoft Excel / Р. З. Галимова, И. Г. Шайхиев, С. В. Свергузова. – Казань ; Белгород, 2017. – 60 с.

References

1. Rosstat. Valovoi sbor sel'skokhozyaistvennykh kul'tur v Rossii v 2023 godu [Electronic resource] // Federal'naya sluzhba gosudarstvennoi statistiki. – URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13233> (data obrashcheniya: 15.10.2024).
2. Aksenov, V. V. Resursosberegayushchaya tekhnologiya pererabotki otkhodov APK / V. V. Aksenov, A. I. Rezepin // Polzunovskii vestnik. – 2011. – № 2-1. – S. 76–80.
3. Islamgulov, D. R. Sostoyanie i perspektivy razvitiya konoplevodstva / D. R. Islamgulov, G. G. Bikbaeva // Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2020. – № 4 (56). – S. 36–40.
4. Dubrovin, M. S. Primenenie tekhnicheskoi konopli v proizvodstve shirokogo spektra produktsii razlichnogo naznacheniya / M. S. Dubrovin // International Agricultural Journal. – 2022. – № 2. – S. 925–942.

5. Zharkikh, O. A. O perspektivakh glubokoi pererabotki konopleproduktsii / O. A. Zharkikh // Aktual'nye voprosy sovershenstvovaniya tekhnologii proizvodstva i pererabotki produktsii sel'skogo khozyaistva. – 2021. – № 23. – S. 184–187.
6. Kołodziej, J. Utilization of hemp shives for various purposes – a review / J. Kołodziej, A. Kicińska-Jakubowska // Journal of Natural Fibers. – 2025. – Vol. 22, No. 1. – Art. 2448016. – P. 1–17.
7. Zampori, L. Life cycle assessment of hemp cultivation and use of hemp-based thermal insulator materials in buildings / L. Zampori, G. Dotelli, V. Vernelli // Environmental Science & Technology. – 2013. – Vol. 47, No. 13. – P. 7413–7420.
8. Kosiński, P. Thermal properties of hemp shives used as insulation material in construction industry / P. Kosiński, P. Brzyski, M. Tunkiewicz, Z. Suchorab, D. Wiśniewski, P. Palczyński // Energies. – 2022. – Vol. 15, No. 7. – Art. 2461. – P. 1–18.
9. Brzyski, P. Composite materials based on hemp and flax for low-energy buildings / P. Brzyski, D. Barnat-Hunek, Z. Suchorab, G. Łagód // Materials. – 2017. – Vol. 10, No. 5. – Art. 510. – P. 1–23.
10. Kolosova, A. S. Sovremennye effektivnye teploizolyatsionnye materialy na organiceskoi osnove / A. S. Kolosova, E. S. Pikalov // Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovanii. – 2021. – № 4. – S. 74–85.
11. Zvirgzds, K. Production of particleboard using various particle size hemp shives as filler / K. Zvirgzds, E. Kirilovs, S. Kukle, U. Gross // Materials. – 2022. – Vol. 15, No. 3. – Art. 886. – P. 1–19.
12. Manzi, S. New composite panels with hemp hurds for sustainable buildings Extended abstract / S. Manzi, E. Sassoni, A. Motori, M. Montecchi, M. Canti // Environmental Engineering and Management Journal. – 2013. – Vol. 12, S11. – P. 31–34.
13. Sinka, M. Enhancement of lime-hemp concrete properties using different manufacturing technologies / M. Sinka, L. Radina, G. Sahmenko, A. Korjakins, D. Bajare // Academic Journal of Civil Engineering. – 2015. – Vol. 33, No. 2. – P. 301–308.
14. Kidalova, L. Application of hemp in preparation of building materials / L. Kidalova, E. Terpakova, N. Stevulova, A. Sicakova // Czasopismo Techniczne Chemia. – 2011. – Vol. 108. – P. 107–112.
15. González-García, S. Life cycle assessment of hemp hurds use in second generation ethanol production / S. González-García, L. Luo, M. T. Moreira, G. Feijoo, G. Huppes // Biomass and Bioenergy. – 2012. – Vol. 36. – P. 268–279.
16. Abraham, R. E. Bioprocessing of hemp hurd (*Cannabis sativa*) for biofuel production : dis. ... dokt. filosofii / R. E. Abraham ; Deakin University. – Australia, 2014. – 210 p.
17. Gandolfi, S. Hemp hurds biorefining for chemicals productions. Chemical characterization, organosolv fractionation and enzymatic depredation for sugars exploitation : dis. ... dokt. biotekhnologii / S. Gandolfi ; Milan. – 2015. – 88 p.
18. Gandolfi, S. Hemp hurds biorefining: A path to green 1-(+)-lactic acid production / S. Gandolfi, L. Pistone, G. Ottolina, P. Xu, S. Riva // Bioresource Technology. – 2015. – Vol. 191. – P. 59–65.
19. Sarker, M. Biorefinery of industrial hemp for value-added products / M. Sarker, C. Wan // Advances in Bioenergy. – 2022. – Vol. 7. – P. 343–366.
20. Liu, S. Activated carbon derived from bio-waste hemp hurd and retted hemp hurd for CO₂ adsorption / S. Liu, L. Ge, S. Gao, L. Zhuang, Z. Zhu, H. Wang // Composites Communications. – 2017. – Vol. 5. – P. 27–30.
21. Sun, W. Hemp-derived activated carbons for supercapacitors / W. Sun, S. M. Lipka, C. Swartz, D. Williams, F. Yang // Carbon. – 2016. – Vol. 103. – P. 181–192.

22. Sert, S. Development of activated carbon from hemp hurd for EMI shielding and supercapacitors via one-step microwave pyrolysis without inert gas / S. Sert, S. S. Gultekin, D. D. Kaya, A. Körülü // Biomass Conversion and Biorefinery. – 2025. – Vol. 15, No. 10. – P. 16087–16106.
23. Shaikhiev, I. G. Ispol'zovanie otkhodov ot pererabotki yachmenya v kachestve sorbtsionnykh materialov dlya udaleniya pollutantov iz vodnykh sred (obzor literatury) / I. G. Shaikhiev, O. A. Gal'blaub, A. S. Grechina // Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta. – 2017. – T. 20, № 23. – S. 110–117.
24. Shaikhiev, I. G. Using wastes of buckwheat processing as sorption materials for the removal of pollutants from aqueous media: a review / I. G. Shaikhiev, S. V. Sverguzova, R. Z. Galimova, A. S. Grechina // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 945. – Art. 012044. – P. 1–11.
25. Sverguzova, S. V. Ispol'zovanie otkhodov ot pererabotki biomassy ovsy v kachestve sorbtsionnykh materialov dlya udaleniya polluyutantov iz vodnykh sred (obzor literatury) / S. V. Sverguzova, I. G. Shaikhiev, A. S. Grechina, K. I. Shaikhieva // Ekonomika stroitel'stva i prirodopol'zovaniya. – 2018. – № 2 (67). – S. 51–60.
26. Shaikhiev, I. G. Using rye (Secale cereale) processing wastes as sorption materials for removing pollutants from aquatic environments / I. G. Shaikhiev, S. V. Sverguzova, K. I. Shaikhieva, T. R. Deberdeev // Polymer Science, Series D. – 2023. – Vol. 16, No. 3. – P. 651–656.
27. Shaikhiev, I. G. Using sorghum waste and biomass components to remove pollutants from aquatic environments (a literature review) / I. G. Shaikhiev, N. V. Kraysman, S. V. Sverguzova // Materials International. – 2024. – Vol. 6, No. 4. – Art. 33. – P. 1–20.
28. Shaikhiev, I. G. Components of millet biomass as sorption materials to remove various pollutants from aqueous media (a brief literature review) / I. G. Shaikhiev, N. V. Kraysman, S. V. Sverguzova // Materials International. – 2024. – Vol. 6, No. 4. – Art. 37. – P. 1–13.
29. Shaikhiev, I. G. Using cucurbits by-products as reagents for disposal of pollutants from water environments (a literature review) / I. G. Shaikhiev, N. V. Kraysman, S. V. Sverguzova // Biointerface Research in Applied Chemistry. – 2021. – Vol. 11, No. 5. – P. 12689–12705.
30. Shaikhieva, K. I. Ispol'zovanie biomassy i otkhodov ot pererabotki fasoli (*Phaseolus vulgaris*) i gorokha (*Pisum sativum*) v kachestve sorbtsionnykh materialov dlya udaleniya pollutantov iz vodnykh sred (obzor literatury) / K. I. Shaikhieva, S. V. Fridland, S. V. Sverguzova // Khimiya rastitel'nogo syr'ya. – 2021. – № 4. – S. 47–64.
31. Shaikhiev, I. G. Onion (*Allium cepa*) processing waste as a sorption material for removing pollutants from aqueous media / I. G. Shaikhiev, N. V. Kraysman, S. V. Sverguzova // Biointerface Research in Applied Chemistry. – 2022. – Vol. 12, No. 3. – P. 3173–3185.
32. Shaikhiev, I. G. Use of garlic processing by-products to remove pollutants from aqueous media / I. G. Shaikhiev, N. V. Kraysman, S. V. Sverguzova // Biointerface Research in Applied Chemistry. – 2022. – Vol. 12, No. 4. – P. 4518–4528.
33. Shaikhieva, K. I. Ispol'zovanie nativnogo i modifitsirovannykh obraztsov zhoma sakharnoi svekly (*Beta vulgaris*) v kachestve sorbtsionnykh materialov dlya udaleniya zagryaznyayushchikh veshchestv iz vodnykh sred / K. I. Shaikhieva, S. V. Stepanova, I. G. Shaikhiev, S. V. Sverguzova // Khimiya rastitel'nogo syr'ya. – 2024. – № 3. – S. 49–70.
34. Shaikhiev, I. G. Ispol'zovanie komponentov biomassy konopli (*Cannabis sativa*) i aktivirovannykh uglei iz nikh dlya udaleniya zagryaznyayushchikh veshchestv iz vodnykh sred. 1. Iony metallov / I. G. Shaikhiev, E. N. Khabibrakhmanova, K. I. Shaikhieva, T. R. Deberdeev // Vse materialy. Entsiklopedicheskii spravochnik. – 2025. – № 4. – S. 2–11.

35. Shaikhiev, I. G. Ispol'zovanie komponentov biomassy konopli (*Cannabis sativa*) i aktivirovannykh uglei iz nikh dlya udaleniya zagryaznyayushchikh veshchestv iz vodnykh sred. 2. Organicheskie soedineniya i iony metallov / I. G. Shaikhiev, E. N. Khabibrakhmanova, K. I. Shaikhieva, T. R. Deberdeev // Vse materialy. Entsiklopedicheskii spravochnik. – 2025. – № 6. – S. 16–24.
36. Khabibrakhmanova, E. N. Adsorbsiya ionov medi nativnoi i modifitsirovannoii konoplyanoi kostroi / E. N. Khabibrakhmanova, I. G. Shaikhiev, R. Z. Galimova, Z. T. Sanatullova // Rossiiskii khimicheskii zhurnal. – 2024. – T. LXVIII, № 2. – S. 31–37.
37. 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.
38. Abdolali, A. A breakthrough biosorbent in removing heavy metals: Equilibrium, kinetic, thermodynamic and mechanism analyses in a lab-scale study / A. Abdolali, H. H. Ngo, W. Guo, S. Lu, S.-S. Chen, N. C. Nguyen, X. Zhang, J. Wang, Y. Wu // Science of the Total Environment. – 2016. – Vol. 542. – P. 603–611.
39. Ziganshin, B. G. Vliyanie reagention modifikatsii obolochek struchkov gorokha (*Pisum sativum*) na sorbsionnye kharakteristiki po ionam tyazhelykh metallov / B. G. Ziganshin, K. I. Shaikhieva, S. V. Stepanova, R. Z. Galimova, E. I. Baigil'deeva // Vestnik Kurganskoi GSKhA. – 2023. – № 3 (47). – S. 52–61.
40. Vijayaraghavan, J. Removal of Ni (II) Ions from wastewater by raw and modified plant wastes as adsorbents: a review / J. Vijayaraghavan, J. Thivya // Iranian Journal of Chemistry and Chemistry Engineering. – 2022. – Vol. 41, No. 1. – P. 1–33.
41. Saeed, A. A. H. Effect of adsorption parameter on the removal of nickel (II) by low-cost adsorbent extracted from corn cob / A. A. H. Saeed, N. Y. Harun, S. Sufian, M. F. B. Aznan // International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology. – 2020. – Vol. 11, No. 9. – P. 1–9.
42. Bello, O. S. Sequestering nickel (II) ions from aqueous solutions using various adsorbents: A Review / O. S. Bello, K. A. Adegoke, O. U. Bello, I. O. Lateef // Pakistan Journal of Analytical & Environmental Chemistry. – 2014. – Vol. 15, No. 1. – P. 1–17.
43. Galimova, R. Z. Obrabotka rezul'tatov issledovaniya protsessov adsorbsii s ispol'zovaniem programmnogo obespecheniya Microsoft Excel / R. Z. Galimova, I. G. Shaikhiev, S. V. Sverguzova. – Kazan'; Belgorod, 2017. – 60 s.