

УДК 544.723.212

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2026-16-1-175-190>

Исследование сорбционной способности нетрадиционных материалов по отношению к двухатомным фенолам (гидрохинону и пирокатехину) из водных растворов

К. В. Умарова¹, А. В. Лысенко¹ ✉, М. В. Дорошенко¹, Д. В. Колочева¹

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉e-mail: ginger313@mail.ru

Резюме

Цель. Сравнительная оценка сорбционной способности и кинетики процесса удаления изомерных двухатомных фенолов – гидрохинона и пирокатехина – из водных растворов с использованием трёх типов нетрадиционных сорбентов на основе отходов: лигноцеллюлозный (шелуха пшеницы), белковый (кожевенная стружка) и синтетический (полиэтилен).

Методы. Сорбцию изучали в статических условиях при комнатной температуре, варьируя время контакта от 5 до 30 минут. Концентрацию фенолов определяли спектрофотометрически по окрашенным комплексам с хлоридом железа (III). Кинетические данные обрабатывали в рамках моделей псевдопервого и псевдовторого порядка. Рассчитывали основные сорбционные характеристики: степень извлечения, статическую обменную ёмкость, коэффициент распределения и константу скорости.

Результаты. Все исследованные сорбенты продемонстрировали высокую и близкую эффективность, обеспечивая извлечение более 98,5% фенолов за первые 10 минут. Установлено систематическое небольшое преимущество пирокатехина над гидрохиноном (на 0,1–0,3%), обусловленное его большей кислотностью ($pK_{a1} = 9,45$) и гидрофобностью ($\log K_{ow} = 0,88$). Кинетика процесса во всех случаях удовлетворительно описывается моделью псевдопервого порядка. Наибольшие значения сорбционных параметров для обоих фенолов были получены для непищевых отходов пшеницы, что позволяет рекомендовать их в качестве наиболее эффективного материала. Для данного сорбента предложены доминирующие механизмы сорбции: водородные связи и π - π -взаимодействия с ароматическими фрагментами лигнина.

Заключение. Непищевые отходы переработки пшеницы являются высокоэффективным, доступным и перспективным сорбентом для удаления гидрохинона и пирокатехина из водных растворов, превосходящим по комплексу характеристик кожевенную стружку и полиэтилен. Процесс лимитируется диффузией сорбата к поверхности.

Ключевые слова: адсорбция; гидрохинон; пирокатехин, нетрадиционные сорбенты; отходы пшеницы; кожевенная стружка; полиэтилен; кинетика сорбции; изомеры.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Исследование сорбционной способности нетрадиционных материалов по отношению к двухатомным фенолам (гидрохинону и пирокатехину) из водных растворов / К. В. Умарова, А. В. Лысенко, М. В. Дорошенко, Д. В. Колочева // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2026. Т. 16, № 1. С. 175–190. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2026-16-1-175-190>.

Поступила в редакцию 09.02.2026

Подписана в печать 02.03.2026

Опубликована 25.03.2026

Investigation of the sorption capacity of non-traditional materials towards dihydric phenols (hydroquinone and pyrocatechol) from aqueous solutions

Kristina V. Umarova¹, Anna V. Lysenko^{1✉}, Maria V. Doroshenko¹,
Darya V. Kolocheva¹

¹Southwest State University
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉e-mail: ginger313@mail.ru

Abstract

Purpose. Comparative assessment of the sorption capacity and kinetics of the removal process of isomeric dihydric phenols – hydroquinone and pyrocatechol – from aqueous solutions using three types of non-traditional waste-based sorbents: lignocellulosic (wheat husk), protein (leather shavings), and synthetic (polyethylene).

Methods. Sorption was studied under static conditions at room temperature, varying the contact time from 5 to 30 minutes. The concentration of phenols was determined spectrophotometrically by colored complexes with iron (III) chloride. Kinetic data were processed within the framework of pseudo-first and pseudo-second order models. The main sorption characteristics were calculated: recovery degree, equilibrium sorption capacity, distribution coefficient, and rate constant.

Results. All studied sorbents demonstrated high and comparable efficiency, providing >98.5% phenol recovery within the first 10 minutes. A systematic slight advantage of pyrocatechol over hydroquinone (by 0.1–0.3%) was established, due to its higher acidity ($pK_{a1} = 9.45$) and hydrophobicity ($\log K_{ow} = 0.88$). The process kinetics in all cases are satisfactorily described by a pseudo-first order model. The highest values of sorption parameters for both phenols were obtained for non-food wheat processing waste, which allows us to recommend it as the most effective material. For this sorbent, the dominant sorption mechanisms are proposed: hydrogen bonds and π - π interactions with aromatic fragments of lignin.

Conclusion. Non-food wheat processing waste is a highly effective, affordable and promising sorbent for the removal of hydroquinone and pyrocatechol from aqueous solutions, superior in a set of characteristics to leather shavings and polyethylene. The process is limited by the diffusion of the sorbate to the surface.

Keywords: adsorption; hydroquinone; pyrocatechol; non-traditional sorbents; wheat waste; leather shavings; polyethylene; sorption kinetics.

Conflict of interest: The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Umarova K.V., Lysenko A.V., Doroshenko M.V., Kolocheva D.V. Investigation of the sorption capacity of non-traditional materials towards dihydric phenols (hydroquinone and pyrocatechol) from aqueous solutions. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2026;16(1):175-190. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2026-16-1-175-190>.

Received 09.02.2026

Accepted 02.03.2026

Published 25.03.2026

Введение

Сорбция определяется как явление перераспределения компонента (собрата) между объёмом гомогенной среды и граничным слоем конденсированной фазы

другого вещества. Изучение закономерностей этого процесса сохраняет первостепенную научно-прикладную значимость, т. к. его результаты непосредственно используются при проектировании технологий водоочистки, газоразделения, синтеза

катализаторов и функциональных композиций [1].

В системе экологических и технологических задач особое место занимает разработка методов извлечения фенольных соединений из водных сред. Эти вещества, массово применяемые в производстве полимеров, лакокрасочных материалов, лекарств и агрохимикатов, являются типичными и опасными компонентами промышленных стоков¹. Приоритетность исследований в этой области обусловлена комплексом факторов.

Первичный аспект связан с выраженной токсичностью и экоопасностью фенолов, которые даже в низких концентрациях оказывают мутагенное и угнетающее действие на биоту, нарушая функционирование водных экосистем и представляя риск для здоровья человека.

Вторичный аспект заключается в ограниченной эффективности многих существующих методов очистки, таких как био- или окислительная деструкция, которые не всегда обеспечивают необходимую глубину удаления этих стойких загрязнителей, способствуя их персистенции в окружающей среде [2].

Таким образом, совершенствование сорбционных технологий представляется ключевым направлением для решения задач ремедиации загрязнённых объектов и обеспечения экологической безопасности².

В связи с глобальной проблемой загрязнения водных объектов в данной работе исследован процесс сорбции одного из классов опасных веществ – двухатомных фенолов, значительные концентрации которых, в частности, обнаруживаются в сточных водах промышленных предприятий.

Для их удаления был выбран один из доступных и эффективных методов – статическая сорбция. С целью сравнения эффективности и выявления наиболее перспективного материала использовали нетрадиционные сорбенты; всего было изучено три типа сорбентов [3].

Нетрадиционные сорбенты также применяются для очистки от токсичных соединений. Несмотря на меньшую распространённость некоторые из них по своим характеристикам не уступают, а по ряду параметров превосходят традиционные аналоги.

Экспериментальная часть работы посвящена оценке сорбционного потенциала трёх видов нетрадиционных материалов: отходов переработки зерна пшеницы (непищевого назначения) [4], измельчённой кожевенной стружки [5] и гранулированного полиэтилена [6].

Для изучения в рамках данной работы были выбраны два двухатомных фенола – пирокатехин и гидрохинон в качестве целевых загрязнителей. Основное внимание было сосредоточено на исследовании сорбционной способности указанных материалов по отношению к этим соединениям.

Материалы и методы

В работе исследованы три типа нетрадиционных сорбентов на основе промышленных и сельскохозяйственных отходов, представляющих разные классы материалов: лигноцеллюлозный (шелуха пшеницы), белковый (кожевенная стружка) и синтетический полимер (полиэтилен). Их ключевые характеристики, определяющие сорбционный потенциал, обобщены в таблице 1.

¹ Сазонова А.В. Термодинамика и кинетика сорбции поллютантов сточных вод нетрадиционными материалами: дис. ... канд. хим. наук. Курск, 2013. 155 с.

² Способ сорбционной очистки сточных вод от фенолов: патент 2424193 Российская Федерация / Мальцева В. С., Будыкина Т. А., Сазонова А. В. № 2009143280/05; заявл. 23.11.2009; опубл. 20.07.2011, Бюл. № 20. 5 с.

Таблица 1. Основные характеристики исследуемых сорбентов**Table 1.** Main characteristics of the studied sorbents

Сорбент	Химическая природа и состав	Ключевые функциональные группы	Ожидаемые механизмы сорбции фенолов
Отходы пшеницы (шелуха)	Лигноцеллюлозный комплекс: целлюлоза (~35–45%), лигнин (~15–25%), гемицеллюлозы (~20–30%), зольные элементы [7]	–ОН (спиртовые, фенольные), С=О, –О–, ароматические структуры лигнина. Гидрофильная, пористая поверхность	Водородные связи, π - π -взаимодействия, диполь-дипольные взаимодействия
Кожевенная стружка	Белковый материал на основе коллагена типа [8]	–NH ₂ , –COOH (глутаминовая, аспарагиновая кислоты), –CONH– (пептидная связь), –ОН (серин, треонин). Амфотерная поверхность	Водородные связи, электростатические (ион-дипольные) взаимодействия, хелатообразование
Полиэтилен (ПЭНП, отходы упаковки)	Углеводородный полимер –(CH ₂ –CH ₂)– линейной или разветвленной структуры [9]	Практически отсутствуют (следы карбонильных групп при деструкции). Гидрофобная, химически инертная поверхность	Гидрофобные взаимодействия, силы Ван-дер-Ваальса (дисперсионные)

Все сорбенты перед использованием подвергали подготовке: измельчение в лабораторной мельнице, просеивание для получения фракции 0,5–1,0 мм, отмывка деионизированной водой до нейтрального значения pH промывных вод и сушка в сушильном шкафу при 60°C до постоянной массы.

В качестве модельных загрязнителей выбраны двухатомные фенолы – струк-

турные изомеры гидрохинон (1,4-дигидроксибензол) и пирокатехин (1,2-дигидроксибензол) квалификации ч.д.а. (ООО «Вектон», Россия). Строение молекул двухатомных фенолов представлено на рисунке 1.

Их ключевые физико-химические параметры, определяющие поведение при сорбции, приведены в таблице 2.

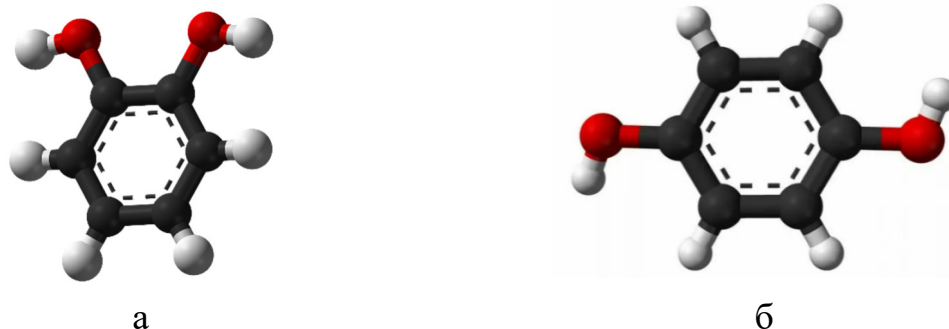
**Рис. 1.** Строение молекул двухатомных фенолов: а – пирокатехин; б – гидрохинон**Fig. 1.** Structure of dihydric phenol molecules: а – pyrocatechol; б – hydroquinone

Таблица 2. Физико-химические характеристики исследуемых двухатомных фенолов**Table 2.** Physicochemical characteristics of the studied dihydric phenols

Параметр	Гидрохинон	Пирокатехин
Растворимость в воде (25°C), S, г/100 мл	6,0	43,0
Первая константа кислотности, pKa ₁	10,00	9,45
Константа кислотности, pKa ₂	11,56	12,80
Логарифм коэффициента распределения октанол-вода log K _{ow}	0,59	0,88
Дипольный момент μ , D	2,20	2,65
Энергия водородной связи с водой ΔH , кДж/моль	—	Наличие внутримолекулярной Н-связи в орто-положении

Различия в положении гидроксильных групп обуславливают существенную разницу в свойствах изомеров, что критически важно для прогнозирования механизма сорбции:

– более низкое значение pKa₁ пирокатехина указывает на его повышенную кислотность. В нейтральной или слабощелочной среде это приводит к большей степени его диссоциации с образованием фенолят-аниона по сравнению с гидрохиноном. Следовательно, для пирокатехина можно ожидать усиления роли электростатических взаимодействий (ион-дипольных, ионообменных) с положительно заряженными центрами на поверхности сорбентов, особенно для кожевенной стружки и биомассы [10];

– более высокое значение логарифма коэффициента распределения октанол-вода (log K_{ow}) для пирокатехина свидетельствует о его большей гидрофобности [11]. Это предопределяет усиленный вклад гидрофобных и дисперсионных взаимодействий при сорбции на любых материалах, включая неполярные участки лигнина и, особенно, поверхность полиэтилена [9];

– наличие возможности образования внутримолекулярной водородной связи в орто-положении у пирокатехина снижает энергию его гидратации, потенциально об-

легчая процесс десольватации при переходе на поверхность сорбента. Кроме того, такое расположение донорных групп делает пирокатехин эффективным хелатирующим лигандом для катионов металлов (Fe³⁺, Cu²⁺, Al³⁺), что может приводить к образованию прочных поверхностных комплексов при наличии соответствующих ионов в составе сорбента (например, минеральных примесей в биомассе или остатков дубителей в кожевенной стружке) [8].

Таким образом, сравнительное изучение сорбции данных изомеров, различающихся кислотностью, гидрофобностью и координационной способностью, позволяет не только оценить эффективность сорбентов, но и получить косвенную информацию о преобладающих механизмах адсорбционного взаимодействия на их поверхности.

Количественное определение фенолов в растворах проводили спектрофотометрическим методом (спектрофотометр Shimadzu UV-1800, Япония), основанным на образовании окрашенных комплексов с хлоридом железа (III) в кислой среде [12]. Для этого аликвоту анализируемого раствора (2,0 см³) смешивали с 0,5 см³ 0,1 М раствора FeCl₃ в 0,1 М HCl. Схемы уравнений реакции двухатомных фенолов с FeCl₃ представлены на рисунке 2.

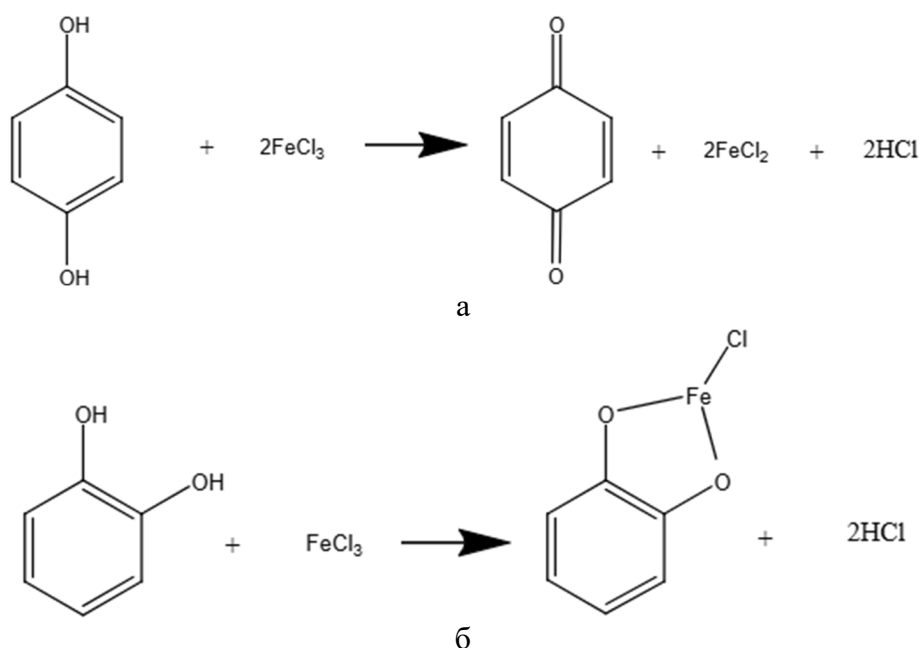


Рис. 2. Схемы уравнений реакции двухатомных фенолов с FeCl_3 : а – пирокатехин; б – гидрохинон

Fig. 2. Schemes of the reactions of dihydric phenols with FeCl_3 : а – pyrocatechin; б – hydroquinone

Аналитическую длину волны (λ_{max}) определяли по максимумам поглощения в спектрах образующихся комплексов: для пирокатехина $\lambda_{\text{max}} = 425$ нм, для гидрохинона $\lambda_{\text{max}} = 410$ нм.

Спектры поглощения окрашенных комплексов пирокатехина (а) и гидрохинона (б) с FeCl_3 регистрировали в видимой области спектра.

Различие в положении максимумов согласуется с литературными данными о различном характере образующихся комплексов: для гидрохинона окрашивание изменяется от зеленого к желтому, в то время как для пирокатехина образуется устойчивое зеленое окрашивание [13].

Калибровочные графики, представленные на рисунке 3, строили в диапазоне концентраций $2 \cdot 10^{-3} \dots 1 \cdot 10^{-2}$ М.

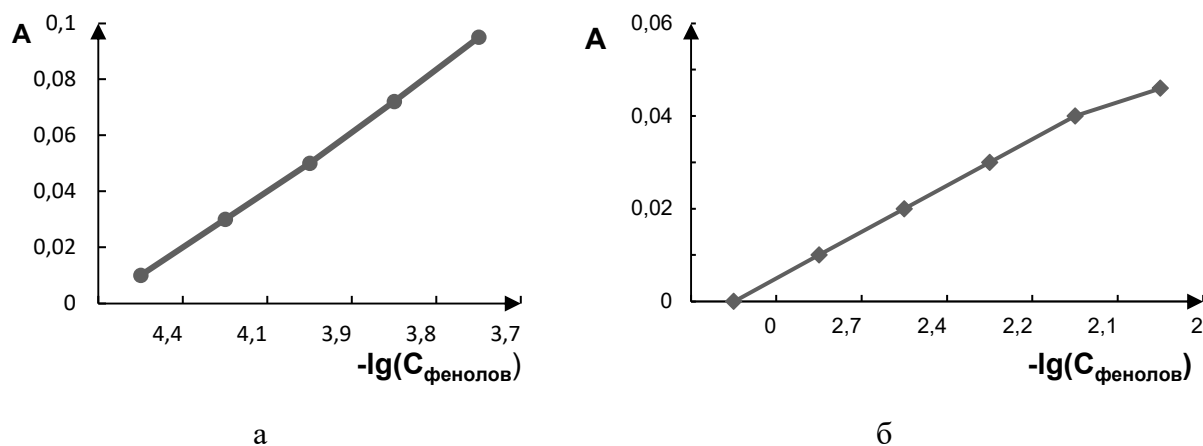


Рис. 3. Калибровочные графики двухатомных фенолов: а – пирокатехин; б – гидрохинон

Fig. 3. Calibration plots of dihydric phenols: а – pyrocatechol; б – hydroquinone

Линейность калибровочных зависимостей ($A = \varepsilon Cl$) сохранялась во всем диапазоне с коэффициентом корреляции $R^2 > 0,99$ для обоих аналитов.

Кинетические опыты проводили в статических условиях при постоянной температуре ($22 \pm 1^\circ\text{C}$) и перемешивании (250 об/мин). В конические колбы на 100 см^3 вносили $50,0\text{ см}^3$ рабочего раствора фенола с начальной концентрацией $C_0 = 0,100\text{ моль/дм}^3$ и точно взвешенную навеску сорбента ($1,000 \pm 0,005\text{ г}$). Через заданные промежутки времени (5, 10, 15, 20, 25, 30 мин) отбирали аликвоты (3 см^3), немедленно фильтровали через мембранный фильтр $0,45\text{ мкм}$ (Millipore, США) и анализировали остаточную концентрацию фенола спектрофотометрически. Каждый эксперимент выполняли в трех параллельных повторностях. Результаты представлены как среднее арифметическое и его стандартное отклонение.

На основе полученных кинетических данных рассчитывали основные сорбционные характеристики по следующим формулам [14]:

– степень извлечения, %:

$$\Gamma = \frac{(C_0 - C_{\text{равн}})}{C_0} \cdot 100\%; \quad (1)$$

– статическая обменная ёмкость, ммоль/г:

$$\text{COE} = \frac{(C_0 - C_{\text{равн}}) \cdot V}{m}; \quad (2)$$

– коэффициент распределения:

$$D = \frac{\text{COE}}{C_{\text{равн}}}, \quad (3)$$

где C_0 – исходная концентрация раствора, моль/дм³; $C_{\text{равн}}$ – равновесная концентрация раствора, моль/дм³; V – объём раствора, дм³; m – масса сорбента, г.

Для установления лимитирующей стадии процесса кинетические данные обрабатывали в рамках двух наиболее распространённых моделей: псевдопервого (ППП) и псевдовторого (ПВП) порядка [15].

Линейные формы уравнений данных моделей имеют следующий вид:

– модель псевдопервого порядка (уравнение Лагергрена):

$$\ln\left(\frac{C^0}{C}\right) = k_1 t; \quad (4)$$

– модель псевдовторого порядка:

$$1/C - 1/C_0 = k_2 t, \quad (5)$$

где k_1 (мин⁻¹) и k_2 (дм³·ммоль⁻¹·мин⁻¹) – константы скорости для моделей ППП и ПВП соответственно; C – концентрация адсорбата в момент времени t , моль/дм³; C_0 – исходная концентрация адсорбата, моль/дм³; t – время, мин.

Порядок реакции устанавливали с использованием интегрального метода. Адекватность модели оценивали по двум критериям: величине коэффициента корреляции (R^2) линейной регрессии при построении графиков в координатах уравнений (4) и (5) и постоянству рассчитанных констант скорости (k_1 или k_2) в течение всего исследуемого временного интервала. Реакцию считали соответствующей той модели, для которой выполнялись оба критерия. Модель нулевого порядка не рассматривали, т. к. она предполагает независимость скорости от концентрации сорбата, что не соответствует механизму сорбции на поверхности с ограниченным числом центров.

Результаты и их обсуждение

Концентрацию пирокатехина и гидрохинона в растворах после сорбции определяли спектрофотометрически по предварительно построенным калибровочным графикам.

Кинетические кривые сорбции, представленные на рисунке 4, демонстрируют плавное увеличение степени извлечения (Γ , %) и снижение равновесной концентрации (C , моль/дм³) в течение 30 минут для всех исследуемых систем, что характерно для процесса установления адсорбционного равновесия [16].

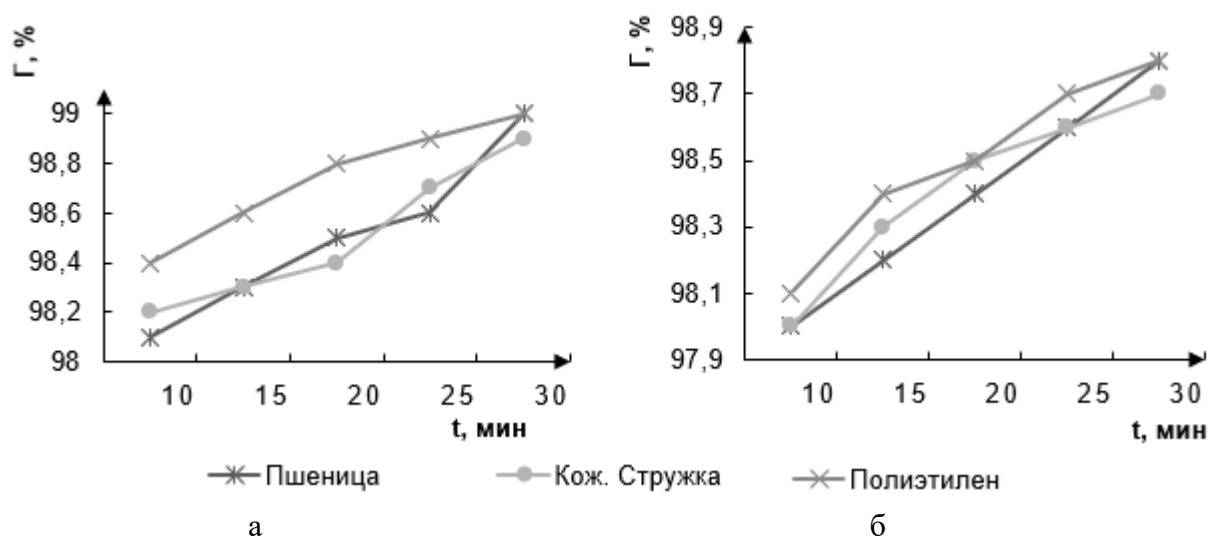


Рис. 4. Кинетические кривые сорбции двухатомных фенолов сорбентами: а – пирокатехин; б – гидрохинон

Fig. 4. Sorption kinetics of dihydric phenols: а – pyrocatechol; б – hydroquinone

Все три нетрадиционных сорбента показали исключительно высокую и сопоставимую эффективность. Различия в значениях Γ между материалами в одинаковые моменты времени не превышали десятых долей процента, что указывает на их близкую удельную поверхность и доступность активных центров в данных экспериментальных условиях.

Наиболее высокая степень извлечения через 30 мин для пирокатехина (99,0%) была достигнута на полиэтилене и отходах пшеницы, а для гидрохинона (98,8%) – на отходах пшеницы.

Было отмечено систематическое, хотя и незначительное (0,1–0,3%), преимущество в степени извлечения пирокатехина (*орто*-изомер) перед гидрохиноном (*пара*-изомер). Пирокатехин извлекался эффективнее на всех типах сорбентов. Данное различие коррелирует с особенностями физико-химических свойств изомеров, обусловленных положением гидроксильных групп [17]. Пирокатехин является более сильной кислотой ($pK_{a1} \sim 9,45$) по сравнению с гидрохиноном ($pK_{a1} \sim 10,0$), что при одинаковом pH раствора

приводит к большей степени его диссоциации и, как следствие, к усилению вклада электростатических взаимодействий с положительно заряженными центрами поверхности сорбентов. Кроме того, для пирокатехина характерна более высокая гидрофобность ($\log K_{ow} \sim 0,88$ против $\sim 0,59$ у гидрохинона) [11] и способность к образованию внутримолекулярных водородных связей в *орто*-положении. Совокупность этих факторов (повышенная кислотность, гидрофобность и поляризуемость) может обуславливать его большее сродство к поверхности всех исследуемых сорбентов.

Основной природой извлечения (более 98%) наблюдался в первые 10 минут опыта. Последующие 20 минут вносили вклад менее 1%, что свидетельствует о быстром заполнении наиболее доступных центров и переходе процесса в замедленную стадию. Такая двухстадийная кинетика характерна для сорбционных процессов и может быть объяснена последовательной адсорбцией: сначала на внешней поверхности и в крупных порах (быстрая стадия) [15], а затем – в микропорах или

на труднодоступных участках поверхности (медленная стадия, лимитируемая внутридиффузионным переносом) [18].

На основе анализа химической природы использованных сорбентов и физико-химических характеристик сорбатов (см. табл. 2) можно предложить следующие доминирующие механизмы сорбции, комбинация которых обеспечивает высокую эффективность процесса.

Механизм сорбции фенолов на пищевых отходах переработки пшеницы, основу которых составляют целлюлоза, лигнин и гемицеллюлозы [7], определяется комплексом специфических и неспецифических взаимодействий:

- водородные связи между гидроксильными группами сорбатов и многочисленными донорно-акцепторными центрами сорбента ($-\text{OH}$, $\text{C}=\text{O}$, $-\text{COOH}$ -групп биополимеров). Этот механизм является ключевым для адсорбции полярных органических соединений на подобных материалах [19];

- π - π -взаимодействия (стэкинг) между ароматическими фрагментами полифенольного лигнина и бензольными кольцами фенолов. Данный тип дисперсионного взаимодействия вносит существенный вклад в сорбцию ароматических соединений [20];

- диполь-дипольные и донорно-акцепторные взаимодействия полярных участков макромолекул сорбента (эфирные, карбонильные группы) с молекулами сорбата.

Кожевенная стружка, представляющая собой в основном коллагеновый материал, обеспечивает сорбцию за счет функциональных групп белковой матрицы:

- ион-дипольные и электростатические взаимодействия. В водной среде при определенных значениях pH аминокислотные группы коллагена ($-\text{NH}_2$) могут находиться в протонированной форме ($-\text{NH}_3^+$), что способствует электростатическому

притяжению фенолят-анионов, образующихся при диссоциации сорбатов ($\text{pH} > \text{pK}_{\text{a1}}$) [8];

- водородные связи с участием пептидных связей ($-\text{CONH}-$), карбоксильных ($-\text{COOH}$) и гидроксильных групп аминокислотных остатков [21];

- гидрофобные взаимодействия между неполярными алифатическими фрагментами белковых цепей и ароматическими ядрами фенолов.

Для гидрофобного полиэтилена, не имеющего реакционноспособных функциональных групп, механизм сорбции является чисто физическим и неспецифическим:

- гидрофобные взаимодействия (эффект вытеснения воды). Основной движущей силой является стремление гидрофобных молекул фенолов минимизировать контакт с водой, что приводит к их адсорбции на гидрофобной поверхности полимера [9]. Эффективность этого механизма напрямую коррелирует с гидрофобностью сорбата (значением $\log K_{\text{ow}}$);

- ван-дер-ваальсовы (дисперсионные) силы между электронными облаками углеводородных цепей полиэтилена и π -электронной системой ароматических колец.

Для установления лимитирующей стадии процесса был проведен кинетический анализ. Определение кинетического порядка реакции позволяет оценить, зависит ли скорость процесса от концентрации сорбата в растворе, а также выявить потенциальный вклад стадии химического взаимодействия на поверхности сорбента [15].

Кинетические данные были обработаны в рамках моделей псевдопервого (ППП) и псевдовторого (ПВП) порядка (рис. 5, 6). Коэффициенты корреляции (R^2) линейных аппроксимаций для обеих моделей представлены в таблице 3.

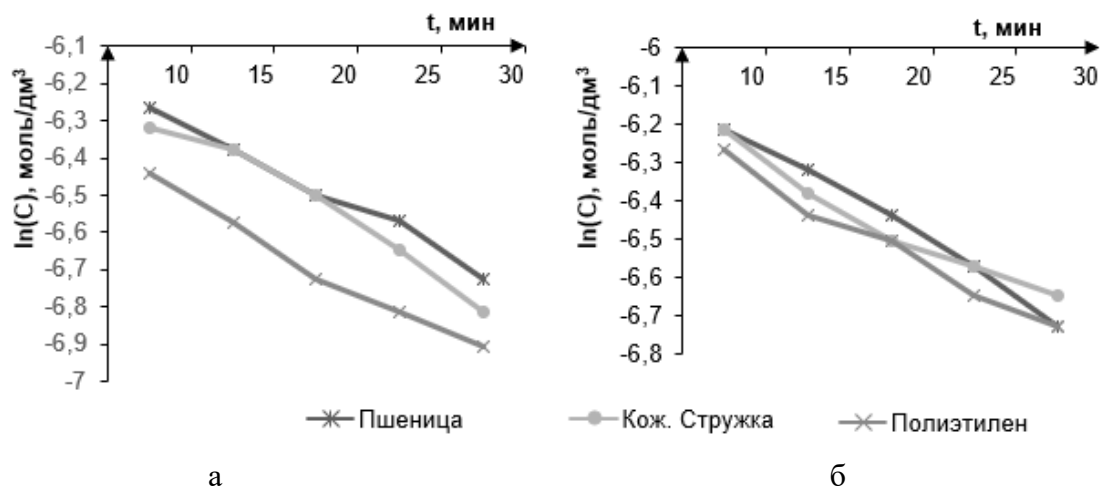


Рис. 5. Графики в координатах модели псевдопервого порядка для двухатомных фенолов: а – пирокатехин; б – гидрохинон

Fig. 5. Plots in the coordinates of the pseudo-first order model for: а – pyrocatechol; б – hydroquinone

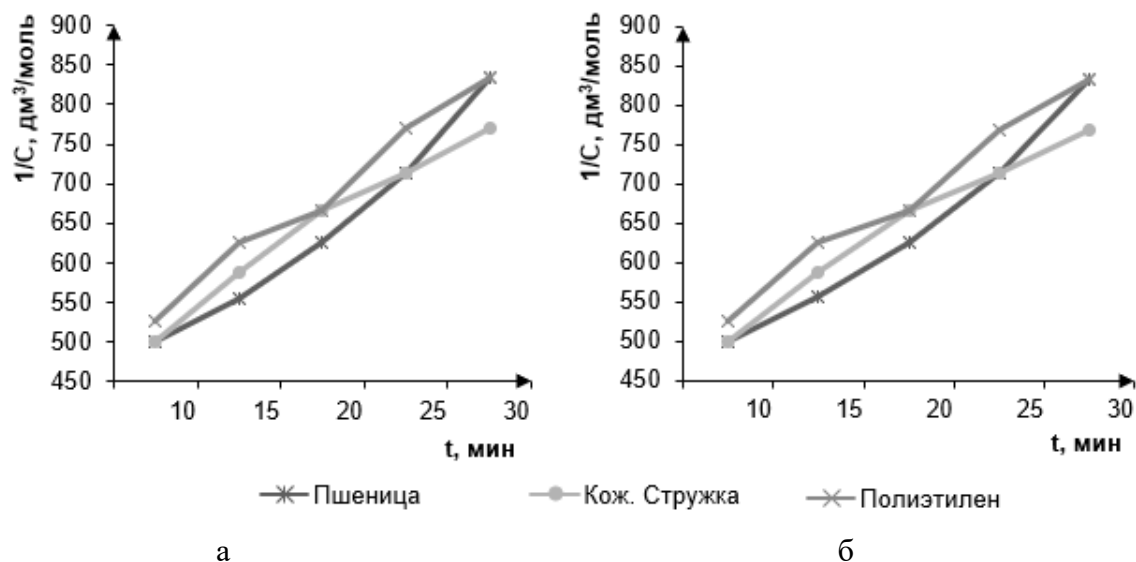


Рис. 6. Графики в координатах модели псевдовторого порядка для двухатомных фенолов: а – пирокатехин; б – гидрохинон

Fig. 6. Plots in the coordinates of the pseudo-second order model for: а – pyrocatechol; б – hydroquinone

Таблица 3. Коэффициенты корреляции (R^2) для кинетических моделей двухатомных фенолов

Table 3. Correlation coefficients (R^2) for kinetic models of dihydric phenols

Сорбент	R^2_1 (ППП)	R^2_2 (ПВП)
Пирокатехин		
Отходы пшеницы	0,99517	0,98997
Кожевенная стружка	0,98661	0,97503
Полиэтилен	0,99382	0,99787
Гидрохинон		
Отходы пшеницы	0,99723	0,98871
Кожевенная стружка	0,98175	0,99152
Полиэтилен	0,99041	0,99383

Для большинства исследуемых систем значения R^2 в координатах ППП были выше или сопоставимы с таковыми для ПВП.

Более строгий интегральный метод, основанный на анализе постоянства констант скорости (табл. 4), подтвердил, что значения k_1 для всех систем остаются

практически неизменными на всём временном интервале, в то время как значения k_2 демонстрируют значительный разброс и тенденцию к уменьшению. Это является надёжным критерием того, что кинетика сорбции адекватно описывается моделью псевдопервого порядка (уравнением Лагергрена) [15].

Таблица 4. Константы скорости сорбции (k_1 , k_2)

Table 4. Sorption rate constants (k_1 , k_2)

Сорбент	t , мин	Пирокатехин		Гидрохинон	
		k_1 , мин ⁻¹	k_2 , Г·ммоль ⁻¹ ·мин ⁻¹	k_1 , мин ⁻¹	k_2 , Г·ммоль ⁻¹ ·мин ⁻¹
Отходы пшеницы	10	0,2	51,6	0,17	57,6
	15		38,6		45,6
	20		32,8		34,8
	25		28,2		28,2
	30		27,4		19,4
Кожевенная стружка	10	0,19	49,0	0,14	49,0
	15		36,4		36,4
	20		30,8		33,8
	25		28,2		22,2
	30		27,4		20,4
Полиэтилен	10	0,18	65,0	0,14	67,0
	15		50,0		55,0
	20		37,9		44,9
	25		32,9		32,9
	30		30,0		27,0

Вывод о псевдопервом порядке указывает на то, что в данных условиях процесс лимитируется скоростью массопереноса (диффузией) сорбата к поверхности сорбента, а не стадией химического взаимодействия на поверхности [18]. Это согласуется с высокой начальной скоростью сорбции и малыми различиями в эффективности химически разнородных материалов. Однако наблюдаемое систематическое преимущество пирокатехина и более

высокая общая эффективность отходов пшеницы, богатых функциональными группами, позволяют предположить, что после стадии диффузии определённый вклад в сорбцию вносят и специфические взаимодействия.

На основе полученных кинетических данных были рассчитаны ключевые параметры, количественно характеризующие эффективность сорбентов (табл. 5).

Таблица 5. Сорбционные характеристики нетрадиционных сорбентов

Table 5. Sorption characteristics of non-traditional sorbents

Сорбент	Пирокатехин				Гидрохинон			
	Г, %	COE · 10 ⁻³ , моль/Г	D	k_1	Г, %	COE · 10 ⁻³ , моль/Г	D	k_1
Отходы пшеницы	99,0	5,941	99,1	0,2	98,8	5,928	82,3	0,17
Кожевенная стружка	98,9	5,936	89,9	0,19	98,7	5,922	75,9	0,14
Полиэтилен	99,0	5,941	99,1	0,18	98,8	5,928	82,3	0,14

Наибольшие значения всех сорбционных параметров для обоих фенолов были получены для непищевых отходов переработки пшеницы. Это позволяет сделать вывод о его максимальной эффективности и универсальности в качестве сорбента для удаления исследуемых загрязнителей из водных растворов.

Проведённые исследования показали, что все изученные нетрадиционные сорбенты обладают высокой и сопоставимой эффективностью в отношении удаления пирокатехина и гидрохинона из водных растворов. На основании комплексного анализа (сравнительной эффективности, кинетического моделирования и расчёта сорбционных параметров) установлено, что непищевые отходы переработки пшеницы являются наиболее эффективным и перспективным материалом. Этот вывод подтверждается максимальными значениями ключевых характеристик: степени извлечения (до 99,0%), статической ёмкости, коэффициента распределения и наибольшей константой скорости сорбции.

Кинетика процесса во всех исследованных системах удовлетворительно описывается моделью псевдопервого порядка, что указывает на лимитирование скорости процесса стадией массопереноса к поверхности сорбента в данных экспериментальных условиях.

Таким образом, непищевые отходы переработки пшеницы можно рекомендовать в качестве универсального, эффективного и доступного сорбента для очистки водных сред от исследуемых двухатомных фенолов. Для окончательного установления детальных механизмов сорбции и углублённой оценки практического потенциала материалов необходимы дальнейшие исследования, включающие построение изотерм сорбции и изучение влияния pH и температуры.

Выводы

Проведённое исследование позволило дать сравнительную оценку сорбционной способности трёх типов нетрадиционных материалов – лигноцеллюлозных отходов пшеницы, кожевенной стружки и полиэтилена – в отношении удаления изомерных двухатомных фенолов (гидрохинона и пирокатехина) из водных растворов.

1. Установлено, что все исследуемые материалы проявляют высокую и сопоставимую эффективность, достигая степени извлечения более 98,5% уже в первые 10 минут контакта при начальной концентрации 0,1 М. Это свидетельствует о развитой удельной поверхности и доступности активных центров у всех трёх сорбентов после соответствующей подготовки.

2. Выявлено влияние структурной изомерии на сорбционное поведение: пирокатехин (*орто*-изомер) систематически, хотя и незначительно (на 0,1–0,3%), превосходит гидрохинон (*пара*-изомер) по степени извлечения на всех сорбентах. Данный факт объясняется совокупностью более высокой кислотности (pK_{a1} 9,45 против 10,00) и гидрофобности ($\log K_{ow}$ 0,88 против 0,59) пирокатехина, что усиливает вклад как электростатических, так и дисперсионных взаимодействий.

3. Кинетика процесса во всех системах удовлетворительно описывается моделью псевдопервого порядка (уравнением Лагергрена), что указывает на лимитирование скорости процесса стадией массопереноса (диффузией) сорбата к поверхности, а не химической реакцией на поверхности.

4. На основе комплексного анализа сорбционных характеристик: степени извлечения (Γ), статической обменной ёмкости (СОЕ), коэффициента распределения (D) и константы скорости (k_1) – наиболее эффективным и универсальным сорбентом признаны непищевые отходы переработки пшеницы. Для данного материала

зафиксированы максимальные значения всех указанных параметров для обоих фенолов.

Предложены доминирующие механизмы сорбции для каждого материала: для отходов пшеницы – водородные связи и π - π -взаимодействия с лигнином; для кожаной стружки – ион-дипольные и водородные связи с функциональными группами коллагена; для полиэтилена – гидрофобные и дисперсионные взаимодействия.

Таким образом, непищевые отходы переработки пшеницы можно рекомендо-

вать в качестве эффективного, доступного и экологически безопасного сорбента для очистки водных сред от двухатомных фенолов. Высокая начальная скорость и степень извлечения, а также низкая стоимость исходного сырья определяют практическую перспективу его применения. Для углублённого изучения механизмов и оптимизации условий сорбции целесообразны дальнейшие исследования, включающие построение изотерм сорбции, изучение влияния pH и ионной силы раствора, а также тестирование в многокомпонентных системах.

Список литературы

1. Лысенко А. В., Левина К. А., Кувардин Н. В. Адсорбция прямых светопрочных красителей целлюлозным сырьём из водных растворов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2021. Т. 11, № 1. С. 114-129.
2. Юшин В. В., Лысенко А. В., Солуковцева Т. В. Вторичное использование побочных продуктов свеклосахарного производства // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2018. Т. 8, № 2 (27). С. 109-117.
3. Коновальцева З. С., Волвенкина К. В., Лысенко А. В. Сравнение кинетических характеристик сорбции фенола нетрадиционными сорбентами // Молодежь и XXI век – 2025: сборник научных статей 14-й Международной молодежной научной конференции. Курск: Университетская книга, 2025. С. 55-57.
4. Коновальцева З. С., Волвенкина К. В., Лысенко А. В. Сорбционное разделение фенолов непищевыми отходами переработки пшеницы // Молодежь и наука: шаг к успеху: сборник научных статей 8-й Всероссийской научной конференции перспективных разработок молодых ученых: в 4 т. Т. 4. Курск: Университетская книга, 2025. С. 72-74.
5. Коновальцева З. С., Волвенкина К. В., Лысенко А. В. Сорбционное разделение фенолов кожаной стружкой // Молодежь и наука: шаг к успеху: сборник научных статей 8-й Всероссийской научной конференции перспективных разработок молодых ученых: в 4 т. Т. 4. Курск: Университетская книга, 2025. С. 75-77.
6. Коновальцева З. С., Волвенкина К. В., Лысенко А. В. Сорбционное разделение фенолов гранулами полиэтилена // Молодежь и наука: шаг к успеху: сборник научных статей 8-й Всероссийской научной конференции перспективных разработок молодых ученых: в 4 т. Т. 4. Курск: Университетская книга, 2025. С. 69-71.
7. Sun R. Cereal straw as a resource for sustainable biomaterials and biofuels: chemistry, extractives, lignins, hemicelluloses and cellulose. Amsterdam; Boston: Elsevier, 2010. 296 p.
8. Shoulders M. D., Raines, R. T. Collagen structure and stability // Annual Review of Biochemistry. 2009. Vol. 78. P. 929-958.
9. Пористые полимерные наноконпозиционные материалы для охраны окружающей среды / Г. С. Минаков, С. А. Широких, Д. Ю. Корнилов, М. Ю. Королева // Химия в интересах устойчивого развития. 2022. Т. 30, № 1. С. 56-67.
10. Влияние структуры пектинов льняного и растительного сырья на формирование гибридных фитосорбентов и кинетику абсорбции алкалоидов / С. В. Алеева, С. А. Кокшаров, Н. Л. Корнилова,

Е. Н. Никифорова // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2023. № 6 (408). С. 80-90.

11. Наноразмерные супрамолекулярные системы: от коллоидных ПАВ к амфифильным макроциклам и суперамфифилам / Р. Р. Кашапов, А. Б. Миргородская, Д. М. Кузнецов, Ю. С. Разуваева, Л. Я. Захарова // Коллоидный журнал. 2022. Т. 84, № 5. С. 503-522.

12. Волвенкина К. В., Коновальцева З. С. Анализ изотермы сорбции раствора фенола отходами переработки зерновых культур // Юность и знания – гарантия успеха – 2022: сборник научных статей 9-й Международной молодежной научной конференции: в 3 т. Т. 3. Курск: Университетская книга, 2022. С. 58-60.

13. Степанов М. Р., Каплун А. П. Определение концентрации полифенолов в присутствии альдегидов при синтезе наночастиц серебра с помощью экстрактов растений // Бутлеровские сообщения. 2022. Т. 69, № 4. С. 81-88.

14. Мальцева В. С., Сазонова А. В., Роик Б. О. Кинетика сорбции ионов меди (II) из водных растворов нетрадиционными материалами // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Физика и химия. 2012. № 2. С. 163-166.

15. Simonin J.-P. On the comparison of pseudo-first order and pseudo-second order rate laws in the modeling of adsorption kinetics // Chemical Engineering Journal. 2016. Vol. 300. P. 254-263.

16. Ниязи Ф. Ф., Мальцева В. С., Сазонова А. В. Кинетические закономерности сорбции ионов железа (II, III) модифицированными карбонатными породами // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Физика и химия. 2012. № 1. С. 40-47.

17. Michalowicz J., Duda W. Phenols – sources and toxicity // Polish Journal of Environmental Studies. 2007. Vol. 16, no. 3. P. 347-362.

18. Plazinski W., Rudzinski W., Plazinska A. Theoretical models of sorption kinetics including a surface reaction mechanism: A review // Advances in Colloid and Interface Science. 2009. Vol. 152, is. 1-2. P. 2-13.

19. Ngah W.S.W., Hanafiah M.A.K.M. Removal of heavy metal ions from wastewater by chemically modified plant wastes as adsorbents: A review // Bioresource Technology. 2008. Vol. 99, no. 10. P. 3935-3948.

20. Ahmed M. J., Theydan S. K. Adsorption of phenols onto peanut husks: Equilibrium, kinetics and thermodynamics // Journal of Saudi Chemical Society. 2014. Vol. 18, is. 5. P. 675-685.

21. Васильев А. В. Использование биосорбентов для очистки почв и водных объектов от нефтяных загрязнений // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2024. Т. 26, № 6 (122). С. 164-174.

References

1. Lysenko A.V., Levina K.A., Kuvardin N.V. Adsorption of direct light-resistant dyes with cellulose raw materials from aqueous solutions. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2021;11(1):114-129. (In Russ.)

2. Yushin V.V., Lysenko A.V., Solukovtseva T.V. Secondary use of sugar beet by-products. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2018;8(2):109-117. (In Russ.)

3. Konoval'tseva Z.S., Volvenkina K.V., Lysenko A.V. Comparison of kinetic characteristics of phenol sorption by non-traditional sorbents. In: *Molodezh' i XXI vek – 2025: sbornik nauchnykh statei 14-i Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii = Youth and the XXI century – 2025: collection of scientific articles of the 14th International Youth Scientific Conference*. Kursk: Universitetskaya kniga; 2025. P. 55-57. (In Russ.)

4. Konoval'tseva Z.S., Volvenkina K.V., Lysenko A.V. Sorption separation of phenols from non-food wheat processing waste. In: *Molodezh' i nauka: shag k uspekhu: sbornik nauchnykh statei 8-i Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii perspektivnykh razrabotok molodykh uchenykh = Youth and science: a step towards*

success: collection of scientific articles of the 8th All-Russian scientific conference of promising developments of young scientists. Vol. 4. Kursk: Universitetskaya kniga; 2025. P. 72-74. (In Russ.)

5. Konoval'tseva Z.S., Volvenkina K.V., Lysenko A.V. Sorption separation of phenols by leather shavings. In: *Molodezh' i nauka: shag k uspekhu: sbornik nauchnykh statei 8-i Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii perspektivnykh razrabotok molodykh uchenykh = Youth and science: a step towards success: collection of scientific articles of the 8th All-Russian scientific conference of promising developments of young scientists*. Vol. 4. Kursk: Universitetskaya kniga; 2025. P. 75-77. (In Russ.)

6. Konoval'tseva Z.S., Volvenkina K.V., Lysenko A.V. Sorption separation of phenols by polyethylene granules. In: *Molodezh' i nauka: shag k uspekhu: sbornik nauchnykh statei 8-i Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii perspektivnykh razrabotok molodykh uchenykh = Youth and science: a step towards success: collection of scientific articles of the 8th All-Russian Scientific conference of promising developments of young scientists*. Vol. 4. Kursk: Universitetskaya kniga; 2025. P. 69-71. (In Russ.)

7. Sun R. Cereal straw as a resource for sustainable biomaterials and biofuels: chemistry, ex-tractives, lignins, hemicelluloses and cellulose. Amsterdam; Boston: Elsevier; 2010. 296 p.

8. Shoulders M.D., Raines R.T. Collagen structure and stability. *Annual Review of Bio-chemistry*. 2009;(78):929-958.

9. Minakov G.S., Shirokikh S.A., Kornilov D.Yu., Koroleva M.Yu. Porous polymer nanocomposite materials for environmental protection. *Khimiya v interesakh ustoichivogo razvitiya = Chemistry for Sustainable Development*. 2022;30(1):56-67. (In Russ.)

10. Aleeva S.V., Koksharov S.A., Kornilova N.L., Nikiforova E.N. The influence of the structure of pectins from flax and vegetable raw materials on the formation of hybrid phytosorbents and the kinetics of alkaloid absorption. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti = Izvestiya. Textile Industry Technology*. 2023;(6):80-90. (In Russ.)

11. Kashapov R.R., Mirgorodskaya A.B., Kuznetsov D.M., Razuvaeva Yu.S., Zakharova L.Ya. Nanoscale supramolecular systems: from colloidal surfactants to amphiphilic macrocycles and superamphiphiles. *Kolloidnyi zhurnal = Colloid Journal*. 2022;84(5):503-522. (In Russ.)

12. Volvenkina K.V., Konoval'tseva Z.S. Analysis of the isotherm of the sorption of a phenol solution by grain processing waste. In: *Yunost' i znaniya – garantiya uspekha – 2022: sbornik nauchnykh statei 9-i Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii = Youth and knowledge – a guarantee of success – 2022: collection of scientific articles of the 9th International Youth Scientific Conference*. Vol. 3. Kursk: Universitetskaya kniga; 2022. P. 58-60. (In Russ.)

13. Stepanov M.R., Kaplun A.P. Determination of the concentration of polyphenols in the presence of aldehydes during the synthesis of silver nanoparticles using plant extracts. *Butlerovskie soobshcheniya = Butlerov Communication*. 2022;69(4):81-88. (In Russ.)

14. Mal'tseva V.S., Sazonova A.V., Roik B.O. Kinetics of sorption of Copper (II) ions from aqueous solutions by non-traditional materials. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Fizika i khimiya = Proceedings of the Southwest State University. Series: Physics and Chemistry*. 2012;(2):163-166. (In Russ.)

15. Simonin J.-P. On the comparison of pseudo-first order and pseudo-second order rate laws in the modeling of adsorption kinetics. *Chemical Engineering Journal*. 2016;300:254-263.

16. Niyazi F.F., Mal'tseva V.S., Sazonova A.V. Kinetic patterns of sorption of Iron (II, III) ions by modified carbonate rocks. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Fizika i khimiya = Proceedings of the Southwest State University. Series: Physics and Chemistry*. 2012;(1):40-47. (In Russ.)

17. Michalowicz J., Duda W. Phenols – sources and toxicity. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2007;16(3):347-362.

18. Plazinski W., Rudzinski W., Plazinska A. Theoretical models of sorption kinetics including a surface reaction mechanism: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2009;152(1-2):2-13.

19. Ngah W.S.W., Hanafiah M.A.K.M. Removal of heavy metal ions from wastewater by chemically modified plant wastes as adsorbents: A review. *Bioresource Technology*. 2008;99(10):3935-3948.

20. Ahmed M.J., Theydan S.K. Adsorption of phenols onto peanut husks: Equilibrium, kinetics and thermodynamics. *Journal of Saudi Chemical Society*. 2014;18(5):675-685.

21. Vasil'ev A.V. The use of biosorbents for cleaning soils and water bodies from oil pollution. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk = Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2024;26(6):164-174. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the Authors

Умарова Кристина Владимировна, магистрант кафедры фундаментальной химии и химической технологии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: christinavolvenkina@gmail.com

Kristina V. Umarova, Undergraduate of the Department of Fundamental Chemistry and Chemical Technology, Southwest State University Kursk, Russian Federation, e-mail: christinavolvenkina@gmail.com

Лысенко Анна Владимировна, кандидат химических наук, доцент кафедры фундаментальной химии и химической технологии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ginger313@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0776-8648

Anna V. Lysenko, Candidate of Sciences (Chemical), Associate Professor of the Department of Fundamental Chemistry and Chemical Technology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ginger313@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0776-8648

Дорошенко Мария Вячеславовна, студент кафедры фундаментальной химии и химической технологии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: masha.bi.14@mail.ru

Maria V. Doroshenko, Student of the Department of Fundamental Chemistry and Chemical Technology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: masha.bi.14@mail.ru

Колочева Дарья Владимировна, студент кафедры фундаментальной химии и химической технологии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: dkolocheva@icloud.com

Darya V. Kolocheva, Student of the Department of Fundamental Chemistry and Chemical Technology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: dkolocheva@icloud.com