



ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ ОТ ФЕНОЛОВ МОДИФИЦИРОВАННЫМ ОТХОДОМ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Нурия Е.Айкенова¹ , к.т.н., Гаусар Мурат¹ , Гузель У. Абилова² PhD, Умбеталы К.Сарсембин³ PhD, Ерик С. Меркибаев³ PhD, Сауле М.Нурмакова³ к.т.н.

¹Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилёва, Астана, Казахстан; aikanova_nye@enu.kz (HEA), (МГ)

²Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, Актюбе, Казахстан; gabilova@zhubanov.edu.kz (ГУА),

³Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева (Satbayev University), Алматы, Казахстан u.sarsembin@satbayev.university (УКС), y.merkibayev@satbayev.university (ЕСМ), snurmakova@satbayev.university (НСМ)

*Автор корреспонденции: Сауле М. Нурмакова snurmakova@satbayev.university, mnurma@mail.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

фенол, адсорбция, хромоспинелевый шлам, щелочная модификация, изотерма Ленгмюра, сточные воды

АБСТРАКТ

В работе исследована возможность использования хромоспинелевого шлама ХШП-02 (богатая фракция) Актюбинского завода ферросплавов в качестве сорбента для извлечения фенола из сточных вод нефтеперерабатывающих предприятий. Проведена щелочная модификация шлама 1 М NaOH при 70 °С с последующим прокаливанием при 450 °С. Физико-химические свойства охарактеризованы методами XRF, СЭМ, ИК-спектроскопии и ТГА/ДСК. Наилучшее описание равновесия адсорбции обеспечивают модели Ленгмюра и Редлиха-Петерсона ($R^2 = 1,000$). Максимальная адсорбционная ёмкость -36,00 мг/г; оптимальная доза 0,30 г/100 мл обеспечивает удаление 96 % фенола. $\Delta G^\circ = -5,97$ кДж/моль подтверждает самопроизвольный физический характер адсорбции и возможность регенерации сорбента.

По статье:

Получено: 25.06.2026

Пересмотрено: 05.09.2026

Принято: 11.09.2026

Опубликовано: 30.09.2026

Для цитирования:

Айкенова Н.Е., Мурат Г., Абилова Г.У., Сарсембин У.К., Меркибаев Е.С., Нурмакова С.М., Очистка сточных вод промышленных предприятий от фенолов модифицированным отходом металлургического производства// Гидрометеорология и экология, 123 (3), 2026, 204–217.

1. ВВЕДЕНИЕ

Нефтеперерабатывающая промышленность является одним из наиболее водоёмких секторов: современные заводы потребляют от 0,4 до 1,6 м³ пресной воды на кубический метр переработанной сырой нефти [1,2]. Сточные воды содержат эмульгированные углеводороды, аммиак, сульфиды, тяжёлые металлы и фенольные соединения, среди которых фенол выделяется как наиболее токсикологически значимый компонент [3...5]. Концентрация фенола в необработанных стоках – 50...300 мг/л, тогда как нормативы сброса составляют 0,5...1,0 мг/л [6,7]. Достижение эффективности очистки 99 % и выше требует многоступенчатых интегрированных подходов [8,9].

Фенол оказывает выраженное токсическое воздействие на водные экосистемы: острые летальные эффекты у рыб наблюдаются при 10–25 мг/л, сублетальные - при 1...5 мг/л (Panigrahy et al., 2022). ВОЗ установила ПДК фенола в питьевой воде - 0,001 мг/л. Метаболическая активация фенола до бензохинонов обуславливает его генотоксический и канцерогенный потенциал [10,11].

Существующие технологии – расширенное окисление, мембранная фильтрация, биологическая очистка – обладают существенными ограничениями при обработке больших объёмов промышленных стоков [12]. На этом фоне адсорбция с использованием сорбентов на основе промышленных отходов привлекает особое внимание: она технически проста, экономически конкурентоспособна и соответствует принципам циркулярной экономики [13,14]. Хромитовый шлам (ХШП), образующийся при производстве феррохромных сплавов, является перспективным материалом в данном контексте, однако систематические исследования его адсорбционных свойств применительно к фенолу в литературе практически отсутствуют. Цель настоящей работы –

исследование модифицированного ХШП-02 Актюбинского завода ферросплавов в качестве сорбента для удаления фенола: физико-химическая характеристика материала, сравнение моделей изотерм и оценка термодинамических параметров.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

2.1. Материалы

Объектом исследования являлся ХШП-02 (богатая фракция) - хромошпинель из фильтр-кеков Актюбинского завода ферросплавов (филиал АО «ТНК «Казхром», Казахстан). По результатам предварительных испытаний трёх видов шлама наибольшую сорбционную эффективность показал ХШП-02. Для экспериментов использовалась фракция (сито Tagler слк-200 Россия) 0.063-0.25 мм. Реагенты квалификации «ч.д.а.»: NaOH, KBr, KI, Na₂S₂O₃, HCl, H₂O₂, фенол (C₆H₅OH).

2.2. Методы

Щелочная модификация

Исходный шлам сушили при 105 ± 5 °С до постоянной массы. Щелочную активацию проводили при Т:Ж = 1:10 в 1 М NaOH, 70 °С, 3 ч. Твёрдую фазу промывали до pH 7-8, затем прокаливали 2 ч при 450 °С (скорость нагрева 7 °С/мин). Полученный материал обозначен АМ-01.[15]

Физико-химическая характеристика

Элементный состав определяли методом XRF на спектрометре Rigaku NEX CG II (мишени Al, Mo, Cu, RX9; метод фундаментальных параметров). Морфологию поверхности изучали методом СЭМ. Функциональные группы идентифицировали ИК-спектроскопией (FTIR). Термическое поведение (PerkinElmer STA 6000 (NETZSCH STA 409 PC/PG)) исследовали методами ТГА и ДСК (25-800 °С).

Адсорбционные эксперименты

Адсорбцию изучали в статических условиях при 298 К; C₀ = 100 мг/дм³. Дозу адсорбента варьировали от 0.05 до 0.50 г (V = 100 мл). Остаточный фенол определяли методом бромирования с йодометрическим титрованием. Адсорбционную ёмкость рассчитывали: q_e = (C₀ - C_e) · V/m; степень удаления: E = (C₀ - C_e)/C₀ × 100%. Равновесие описывали моделями Ленгмюра, Фрейндлиха, Темкина и Редлиха-Петерсона (адекватность по R²). Энергию Гиббса рассчитывали: ΔG° = -RT ln KL[16]. Каждый образец анализировали не менее чем в трех независимых измерениях (n = 3). За результат принимали среднее значение трех измерений.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнительный XRF-анализ элементного состава шламов

Сравнительный анализ трёх образцов хромошпинелевого шлама (ХШП-01 богатая и бедная фракции, ХШП-02 богатая фракция) методом XRF показал, что основным структурообразующим элементом во всех пробах является кислород (36.9-38.8 %), что указывает на преимущественное содержание металлов в форме оксидов и гидроксидов (Таблица 1).

Таблица 1

Элементный состав образцов ХШП по данным XRF-анализа, масс. %

Элемент	Символ	ХШП-01 (богатая фракция)	ХШП-01 (бедная фракция)	ХШП-02 (богатая фракция)
Хром	Cr	16.10	12.20	18.80
Кальций	Ca	0.47	1.22	18.10
Магний	Mg	25.50	26.70	9.50
Железо	Fe	5.94	4.61	4.87
Кремний	Si	9.98	7.89	5.62
Калий	K	0.71	2.08	1.82

Алюминий	Al	2.22	2.25	1.22
Хлор	Cl	0.15	1.18	1.00
Сера	S	0.37	0.88	0.76
Цинк	Zn	0.42	1.26	0.73
Марганец	Mn	0.58	0.50	0.43
Никель	Ni	0.16	0.11	0.13
Титан	Ti	0.07	0.02	0.03
Кислород	O	37.10	38.80	36.90

Для дальнейших исследований выбран ХШП-02 (богатая фракция). Образец отличается повышенным содержанием Са (18.10 %), что способствует формированию поверхностной основности и усиливает кислотно-основное взаимодействие с гидроксильными группами фенола. Пониженное содержание Si (5.62 %) и Mg (9.50 %) указывает на меньшую долю силикатной матрицы, менее активной в отношении адсорбции органических соединений, что потенциально увеличивает долю доступной для сорбции поверхности. [17,18]

Морфология поверхности (СЭМ)

СЭМ-анализ (Oxford instruments, x-maxn) зафиксировал трансформацию структуры материала на каждом этапе обработки. Исходный шлам (Рис. 1) обладает плотной, малопористой структурой с крупными монолитными агрегатами, ограничивающими доступ к внутреннему объёму материала. После щелочной модификации (Рис. 2) поверхность приобретает развитую систему пор и микротрещин, частицы фрагментируются, что обеспечивает диффузию молекул фенола к активным центрам сорбента [19]. После адсорбции (Рис. 3) поровое пространство заполнено

адсорбированным веществом, поверхность сглажена, что подтверждает высокую сорбционную активность модифицированного материала.

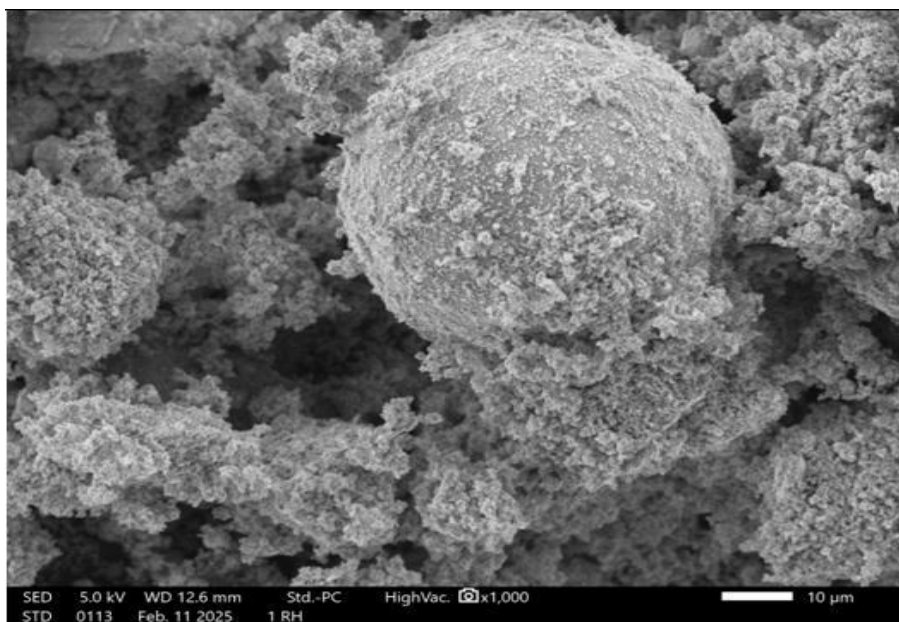


Рисунок 1. Микрофотография поверхности исходного шлама ХШП-02.
Увеличение $\times 1000$

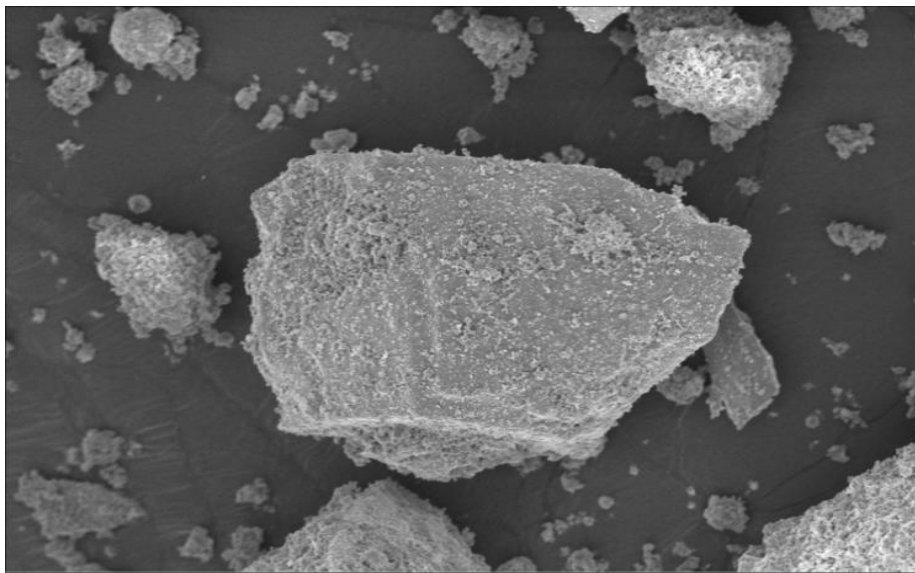


Рисунок 2. Микрофотография поверхности шлама ХШП-02 после щелочной модификации. Увеличение $\times 1000$

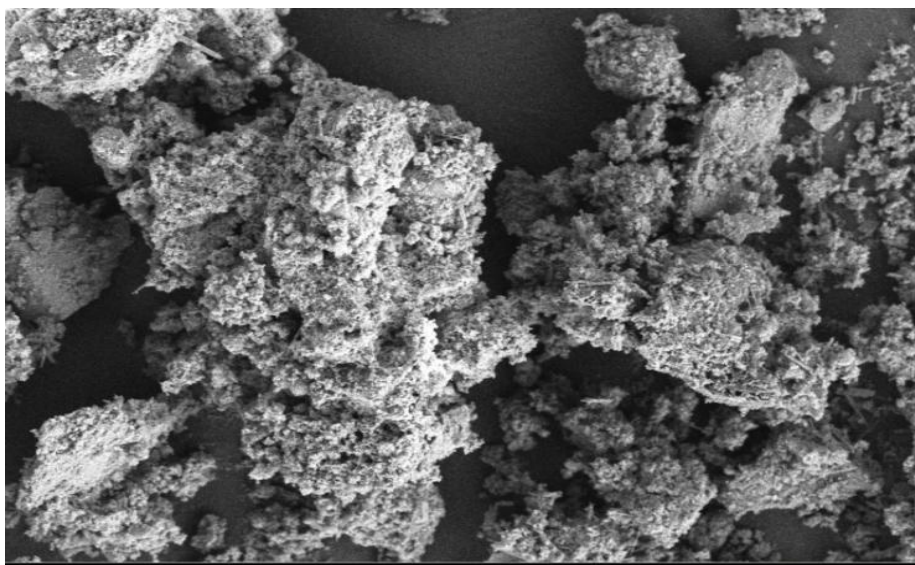


Рисунок 3. Микрофотография поверхности модифицированного шлама после процесса адсорбции фенолов

Увеличение $\times 1000$

EDS-анализ поверхности

Сравнительный EDS-анализ (Oxford instruments, x-maxn) (Рис. 4) показал, что исходный сорбент характеризуется высоким содержанием неорганических компонентов: Cr -41.3 масс.%, Fe

-9.4 масс.%, Mg – 8,1 масс.%, O - 28.7 масс.%, при содержании C -5.7 масс.%. После адсорбции фенола массовая доля углерода возрастает более чем в 6 раз – до 36.8 масс.%, тогда как доля хрома снижается до 5.9 масс.% за счёт экранирования минеральной основы сорбента слоем адсорбированного органического вещества. Это прямо подтверждает закрепление молекул фенола в пористой структуре сорбента.

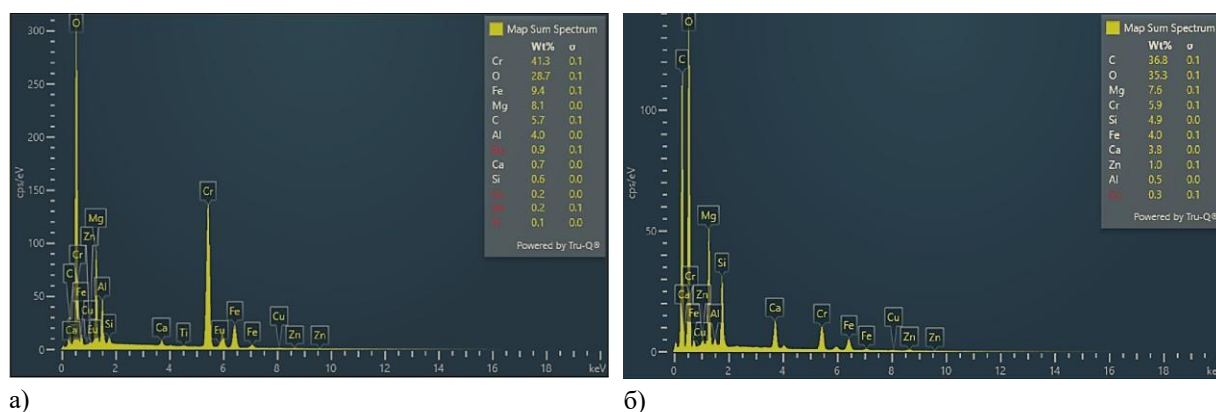


Рисунок 4. Энергодисперсионные спектры поверхности сорбента ХШП-02 (богатая фракция): а) исходный образец; б) после адсорбции фенола

ИК-Фурье-спектроскопия

Сравнение ИК-спектров АМ-01 до и после адсорбции (Рис. 5) выявило значительное уширение и рост интенсивности полосы $\nu(\text{O-H})$ в области 3340.71 см^{-1} , что свидетельствует об образовании водородных связей между гидроксильными группами фенола и поверхностью сорбента. Рост интенсивности полосы 1411.89 см^{-1} (колебания ароматического кольца и деформационные колебания O-H) подтверждает присутствие ароматических фрагментов фенола. Появление новых полос при 999.13 , 873.75 и 623.01 см^{-1} (валентные и деформационные колебания C-O и C-H ароматического кольца) указывает на внедрение молекул фенола в структуру адсорбента [21,22]. Механизм сорбции имеет смешанный характер: физическая адсорбция за счёт π - π -взаимодействий и хемосорбция за счёт водородных связей.

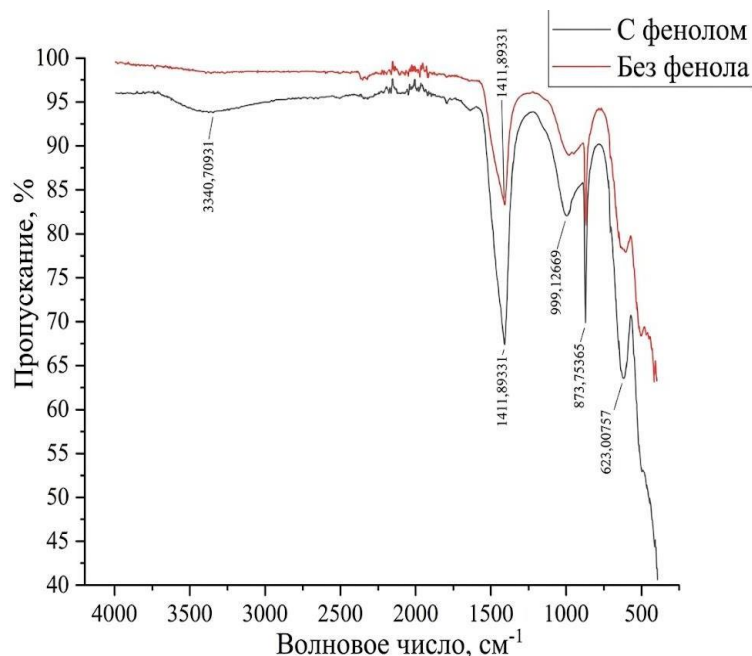


Рисунок 5. ИК-спектры модифицированного шлака (АМ-01) до и после адсорбции фенола

Термический анализ (ТГА/ДСК)

ТГА (PerkinElmer STA 6000 (NETZSCH STA 409 PC/PG)) исходного адсорбента (Рис. 6) показывает три стадии: до 160°C - удаление влаги ($\sim 1.2\%$); $160\ldots 600^\circ\text{C}$ - термолит органических примесей [23]; выше 650°C - диссоциация карбонатов (остаток 91.29%). После адсорбции (Рис. 7) остаточная масса снижается до 87.78% (на 3.51%

больше потерь), что является прямым доказательством закрепления фенола в порах материала.

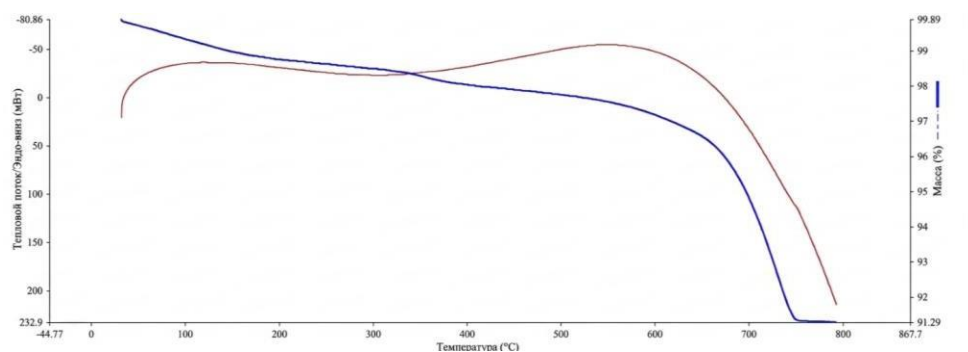


Рисунок 6. Термический анализ адсорбента до очистки

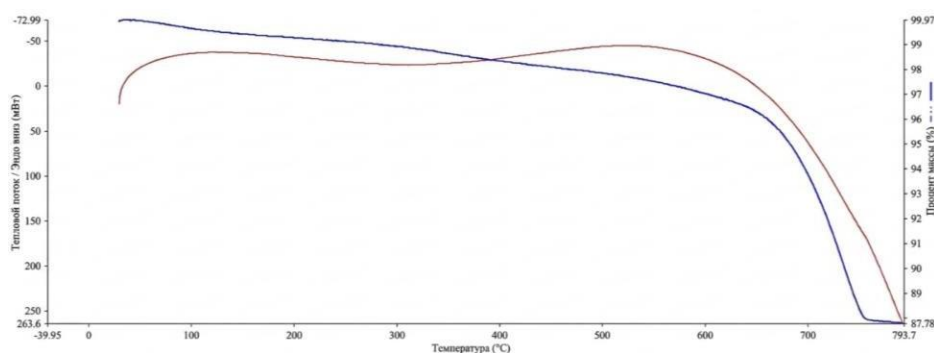
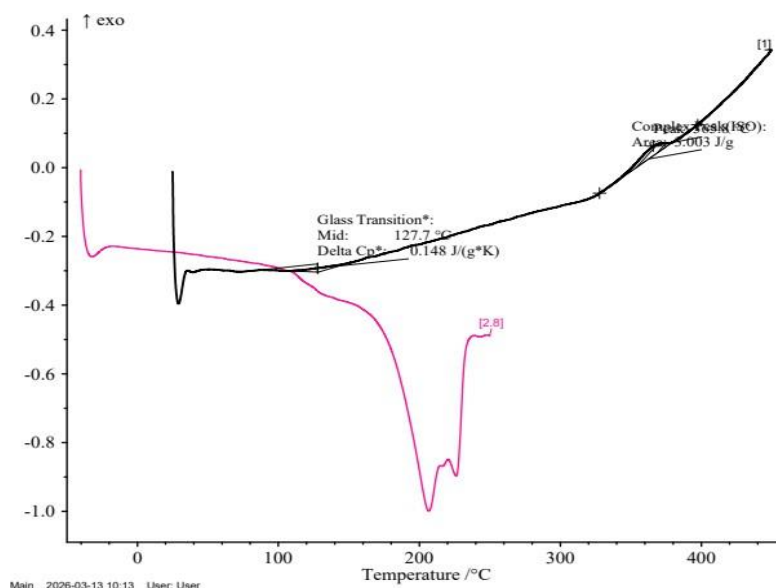


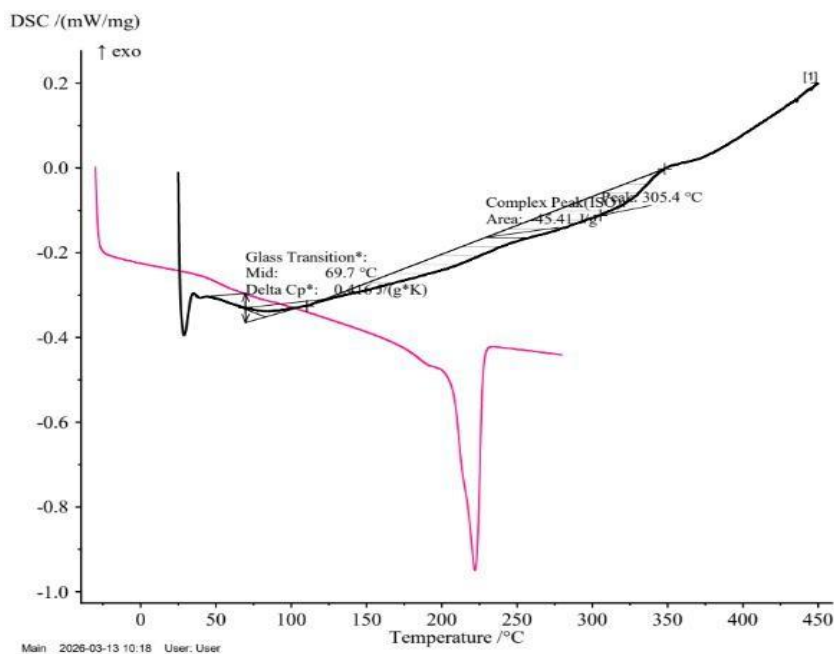
Рисунок 7. Термический анализ адсорбента после очистки

ДСК исходного образца (Рис. 8а) показывает стеклование при 127.7 °С ($\Delta C_p = 0.148$ Дж/г·К). После адсорбции (Рис. 8б) температура стеклования смещается до 69.7 °С при росте ΔC_p до 0.416 Дж/г·К, что указывает на пластифицирующий эффект фенола; в области

305.4 °С фиксируется новый тепловой эффект (45.41 Дж/г), отсутствующий у исходного образца и соответствующий разложению адсорбированного фенольного комплекса.



a)



б)

Рисунок 8. Термограммы ДСК исследуемого адсорбента на основе шлама-02: а) до адсорбции; б) после адсорбции

Изотермы адсорбции

Экспериментальные данные обработаны по моделям Ленгмюра, Фрейндлиха, Темкина и Редлиха-Петерсона (Рис. 9...13, Таблица 2).

Изотерма адсорбции фенола на модифицированном ХШП Богатый-02

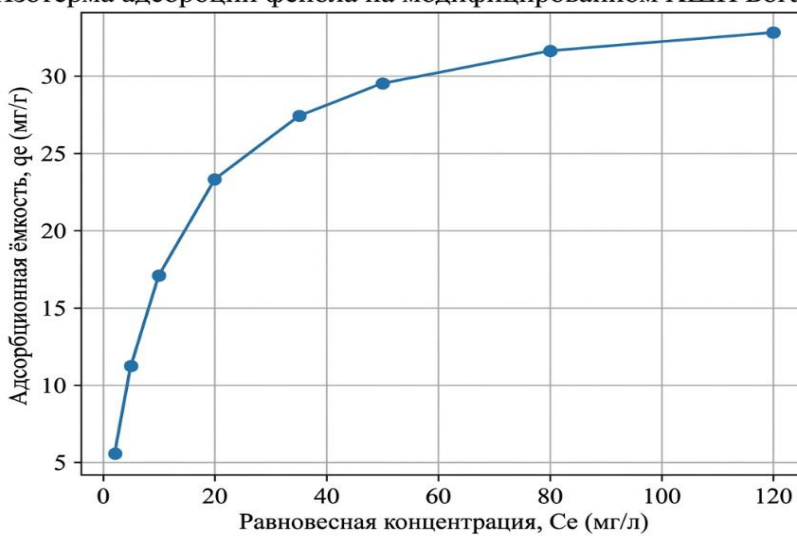


Рисунок 9. Изотерма адсорбции фенола на модифицированном ХШП-02 (богатая фракция)

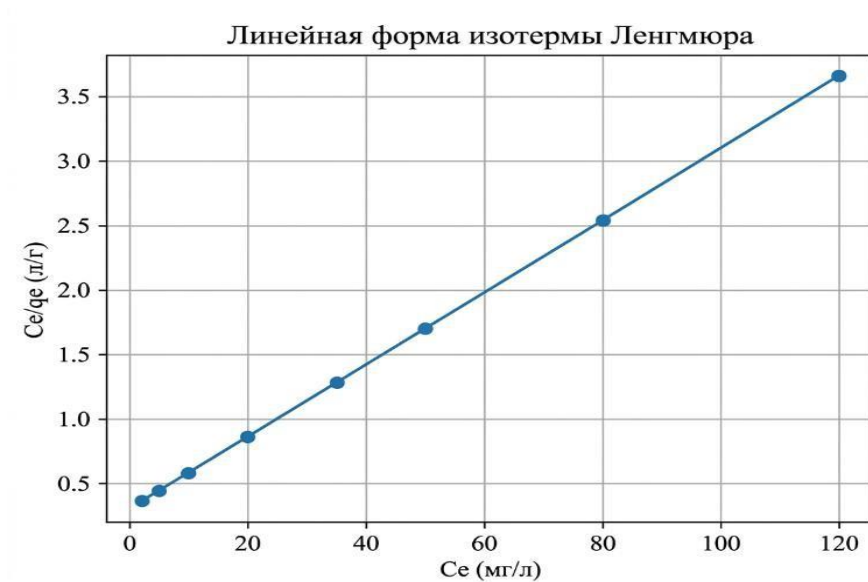


Рисунок 10. Линеаризованный график Ленгмюра

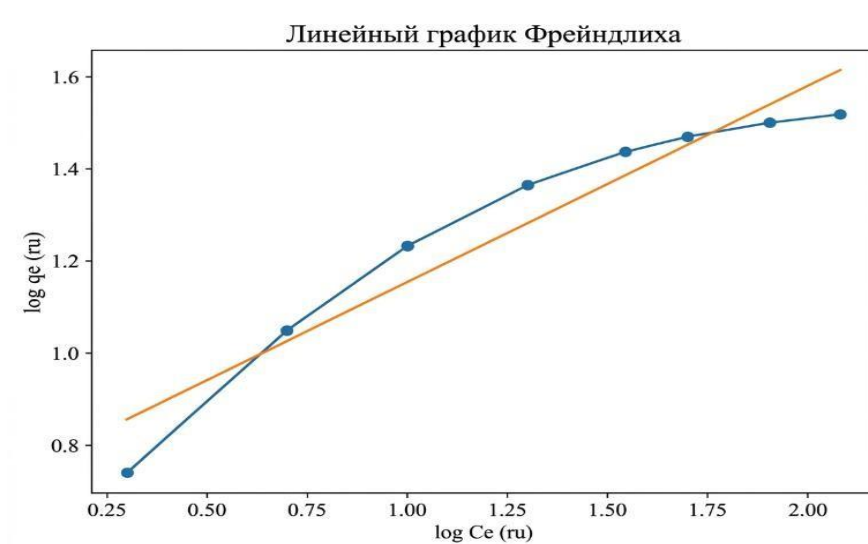
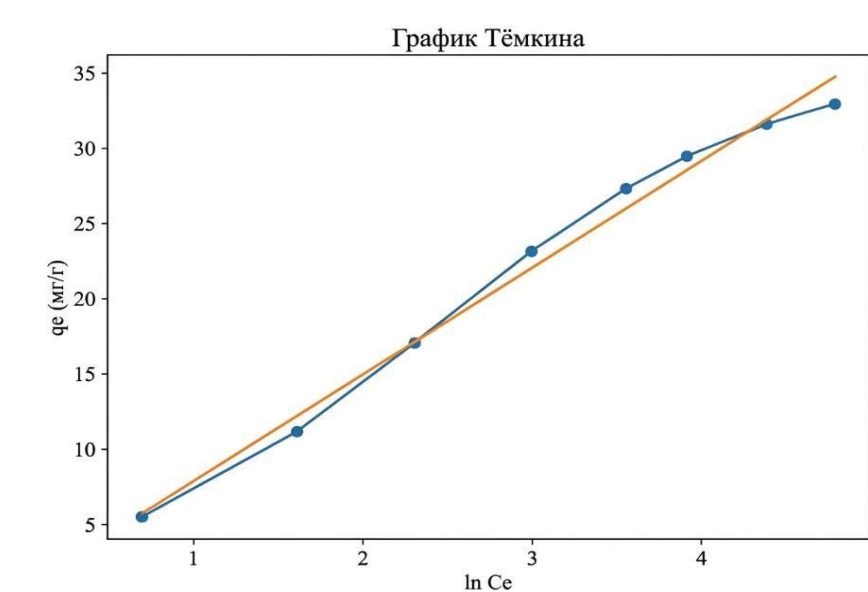


Рисунок 11. Линеаризованный график Фрейндлиха

Рисунок 12. График Темкина в координатах $q_e - \ln C_e$

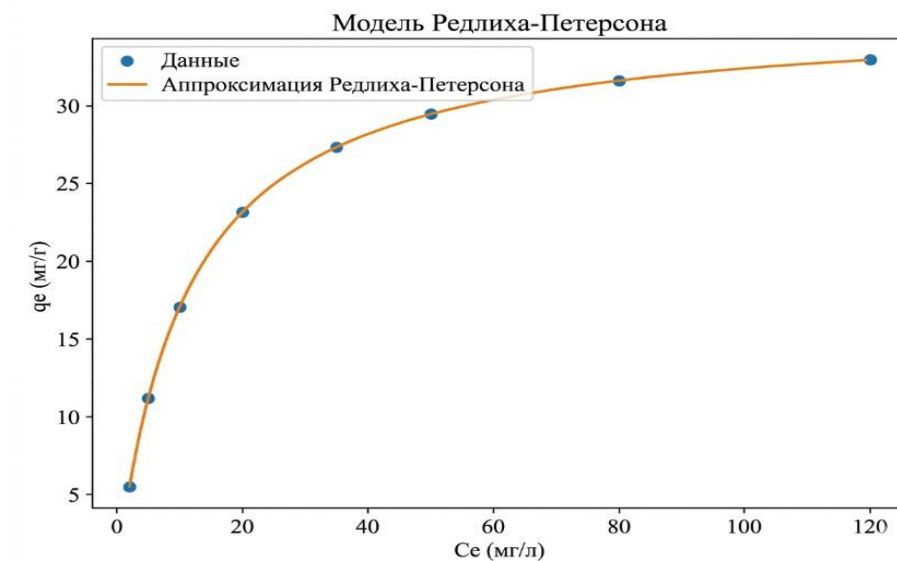


Рисунок 13. Нелинейная аппроксимация по модели Редлиха-Петерсона

Таблица 2

Параметры изотерм адсорбции фенола на АМ-01

Параметры модели

Модель Ленгмюра			Модель Фрейндлиха			Модель Темкина			Модель Редлиха-Петерсона			
KL	am	R ²	KF	n	R ²	AT	B	R ²	KR	α	β	R ²
0.09	36.00	1.000	5.34	2.345	0.922	1.118	6.589	0.988	3.240	0.09	1.000	1.000

Наилучшее описание равновесия обеспечивают модели Ленгмюра и Редлиха-Петерсона ($R^2 = 1.000$), что свидетельствует о монослойной адсорбции на однородной поверхности; значение $\beta = 1.000$ независимо подтверждает применимость изотермы Ленгмюра. Низкое значение константы Темкина ($B = 6.589$ Дж/моль) характерно для физической адсорбции.

Оптимизация дозы адсорбента (Рис. 14) показала, что при 0.05 г степень удаления фенола составляет лишь 18 % (из-за недостаточного числа активных центров), при 0.30 г резко возрастает до 96 %, а дальнейшее увеличение до 0.50 г даёт незначительный прирост (~1 %). Оптимальная доза составляет 0.30 г/100 мл.

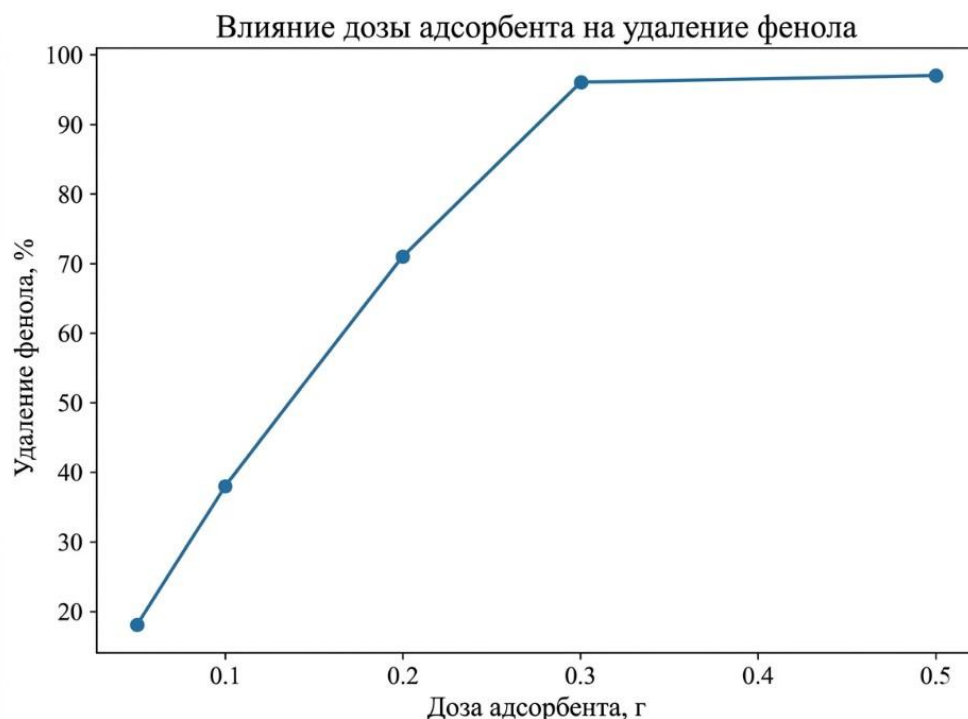


Рисунок 14. Влияние дозы адсорбента на степень удаления фенола

Сравнение с литературными данными по адсорбции фенола

Для оценки места разработанного адсорбента АМ-01 (модифицированный ХШП-02) среди известных сорбентов фенола проведено сопоставление максимальной адсорбционной ёмкости и эффективности удаления с опубликованными данными для сорбентов, полученных из промышленных и сельскохозяйственных отходов (Таблица 3).

Таблица 3

Сравнение сорбента АМ-01 (ХШП-02) с литературными данными по адсорбции фенола

Сорбент	Максимальная адсорбционная ёмкость, мг/г	Эффективность удаления фенола, %	Источник
АМ-01 (модифицированный ХШП-02, хромошпинелевый шлам, щелочная активация NaOH + прокаливание)	36.00	96 (доза 0.30 г/100 мл)	настоящая работа
Активированный уголь из скорлупы Fox nutshell, ZnCl ₂ -активация (Kumar, Jena, 2016)	158.9	не указана авторами отдельно от кривых дозирования	[13]
Биоуголь из ствола масличной пальмы, паровой пиролиз (Lawal et al., 2021)	62.89	не указана авторами отдельно от кривых дозирования	[14]
Биоуголь из скорлупы сосновых шишек, пиролиз 550 °C (Mohammed et al., 2018)	21.2	99	[19]
Активированный уголь из нефтешлама, КОН-активация (Mojoudi et al., 2019)	434	не указана авторами отдельно от кривых дозирования	[21]

Примечание: показатели для сорбентов [13, 14, 19, 21] приведены по данным соответствующих публикаций (см. Список литературы) и получены в разных экспериментальных условиях (исходная концентрация фенола, доза адсорбента, температура), что ограничивает их прямое количественное сопоставление с настоящей работой.

Полученные результаты показывают, что адсорбционная ёмкость АМ-01 (36.00 мг/г) ниже, чем у специально активированных углеродных сорбентов (158.9...434 мг/г), но сопоставима с рядом биоуглей растительного происхождения и превышает показатели ряда сорбентов, полученных без химической активации. При этом преимуществом АМ-01 является использование многотоннажного отхода металлургического производства и относительно простая одностадийная щелочная модификация без применения дорогостоящих активирующих агентов (ZnCl_2 , KOH , H_3PO_4), что определяет экономическую привлекательность сорбента при сопоставимой эффективности удаления фенола (96%).

Термодинамика адсорбции (энергия Гиббса)

$$\Delta G^\circ = -RT \ln KL = -(8.314)(298)(-2.4079) \approx -5.97 \text{ кДж/моль}$$

Отрицательное значение ΔG° подтверждает самопроизвольный характер адсорбции фенола на ХШП-02 при 298 К. Величина 5.97 кДж/моль находится в диапазоне 0-20 кДж/моль, характерном для физической адсорбции, что указывает на обратимость процесса и перспективность регенерации сорбента для повторного использования.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Сравнительный анализ существующих методов очистки сточных вод от фенола (окисление, биологическая очистка, мембранные процессы) показал, что адсорбция на основе промышленных отходов обеспечивает оптимальное сочетание эффективности и технологической простоты, одновременно решая задачи очистки воды и утилизации отходов.

2. Из трёх исследованных образцов хромошпинелевого шлама для разработки сорбента выбран ХШП-02 (богатая фракция) благодаря повышенному содержанию кальция (18.10 %). Щелочная модификация дала адсорбент АМ-01: СЭМ показал формирование пористой структуры после модификации и её заполнение после адсорбции; EDS зафиксировал рост доли углерода с 5.7 до 36.8 масс.%; ИК-спектроскопия выявила полосы, характерные для ароматического кольца и фенольной ОН-группы; термический анализ показал дополнительную потерю массы (~3.5 %) и тепловой эффект при 305 °С после сорбции. В совокупности эти данные подтверждают закрепление фенола на поверхности и в порах АМ-01.

3. Оптимальная доза адсорбента составила 0.30 г/100 мл, обеспечивающая удаление около 96 % фенола из раствора.

4. Равновесие адсорбции наилучшим образом описывается моделями Ленгмюра и Редлиха–Петерсона ($R^2 = 1.000$); предельная ёмкость моно слоя -36 мг/г. Энергия Гиббса $\Delta G^\circ = -5.97$ кДж/моль свидетельствует о самопроизвольной физической адсорбции с возможностью регенерации сорбента.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения АМ-01 на стадиях доочистки стоков нефтеперерабатывающих заводов, что снижает экологическую нагрузку на водные объекты и затраты на коммерческие адсорбенты, способствуя переходу к принципам замкнутого цикла производства за счёт вовлечения промышленных отходов в повторное использование.

Формулировка и представление выводов на основе полученных результатов; сопоставление полученных результатов с уже имеющимися результатами по данной тематике; оценка практической ценности полученных результатов.

ДОСТУПНОСТЬ ДАННЫХ

Данные, использованные в настоящем исследовании, получены авторами в ходе экспериментальных исследований. Данные, подтверждающие результаты исследования, доступны у соответствующего автора по обоснованному запросу.

ВКЛАД АВТОРОВ

Концептуализация – Н.Е. Айкенова, С.М. Нурмакова; управление данными – Н.Е. Айкенова, Г. Мурат; формальный анализ – Н.Е. Айкенова, Г.К. Абилова, Е.С. Меркибаев; методология – Н.Е. Айкенова, Г.К. Абилова, С.М. Нурмакова; надзор – Н.Е. Айкенова, С.М. Нурмакова; визуализация – Н.Е. Айкенова, Г. Мурат; написание первоначального варианта – Н.Е. Айкенова, Г. Мурат; написание, рецензирование и редактирование – Н.Е. Айкенова, Г.К. Абилова, У.К. Сарсембин, Е.С. Меркибаев, С.М. Нурмакова.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследования проводились в рамках программно-целевого финансирования Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан на 2024-2026 годы по программе № BR24992882 «Разработка новых технологий по переработке техногенных отходов с улучшением экологической обстановки в регионе»

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Anku W. W., Mamo M. A., Govender P. P. Phenolic compounds in water: sources, reactivity, toxicity and treatment methods // *Phenolic Compounds — Biological Activity*. – InTechOpen, 2017. – P. 419–443. – <https://doi.org/10.5772/66927>
2. Al-Gheethi A. A. et al. Sustainable approaches for removing Rhodamine B dye using agricultural waste adsorbents // *Chemosphere*. – 2022. – Vol. 287. – Art. 132080. – <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132080>
3. Barquilha C. E. R., Braga M. C. B. Adsorption of organic and inorganic pollutants onto biochars // *Bioresource Technology Reports*. – 2021. – Vol. 15. – Art. 100728. – <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100728>
4. Brillas E., Garcia-Segura S. Benchmarking Fenton, photo-Fenton, electro-Fenton processes // *Separation and Purification Technology*. – 2020. – Vol. 237. – Art. 116337. – <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116337>
5. Crini G., Lichtfouse E. Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment // *Environmental Chemistry Letters*. – 2018. – Vol. 17. – P. 145–155. – <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0785-9>
6. Dai Q. et al. Co-pyrolysis biochar from sewage sludge and lignin // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. – 2022. – Vol. 10, No. 3. – Art. 107898. – <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107898>
7. El-Naas M. H., Surkatti R., Al-Zuhair S. Petroleum refinery wastewater treatment: a pilot scale study // *Journal of Water Process Engineering*. – 2016. – Vol. 14. – P. 71–76. – <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2016.10.005>
8. Grace Pavithra K. et al. A review on advancements in extraction and removal of phenols from phenolic wastewater // *Environmental Research*. – 2023. – Vol. 237. – Art. 117005. – <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117005>
9. Ho S.-H. et al. High-efficiency removal of lead from wastewater by biochar from anaerobic digestion sludge // *Bioresource Technology*. – 2017. – Vol. 246. – P. 142–149. – <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.025>
10. Inyang M. I. et al. A review of biochar as a low-cost adsorbent for aqueous heavy metal removal // *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. – 2016. – Vol. 46, No. 4. – P. 406–433. – <https://doi.org/10.1080/10643389.2015.1096880>
11. Jafarinejad S. Simulation for performance and economic evaluation of activated sludge process in petroleum refinery // *ChemEngineering*. – 2019. – Vol. 3, No. 2. – Art. 45. – DOI: 10.3390/chemengineering3020045
12. Kim S. et al. Review of adsorption-membrane hybrid systems for water treatment // *Chemosphere*. – 2022. – Vol. 286. – Art. 131916. – <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131916>
13. Kumar A., Jena H. M. Removal of methylene blue and phenol onto activated carbon from Fox nutshell // *Journal of Cleaner Production*. – 2016. – Vol. 137. – P. 1246–1259. – <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.177>
14. Lawal A. A. et al. Adsorption mechanism of phenol removal by biochar from oil palm frond // *Environmental Pollution*. – 2021. – Vol. 269. – Art. 116197. – <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116197>
15. Lima É. C. et al. A critical review of thermodynamic parameters on adsorption equilibria // *Journal of Molecular Liquids*. – 2019. – Vol. 273. – P. 425–434. – <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.10.048>
16. Mamman S. et al. Influence of adsorption parameters on phenolic compounds removal // *Desalination and Water Treatment*. – 2024. – Vol. 320. – Art. 100631. – <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100631>
17. Mhlongo N. L. et al. Phenolic compounds occurrence and human health risk assessment // *Frontiers in Toxicology*. – 2024. – Vol. 5. – Art. 1269601. – <https://doi.org/10.3389/ftox.2023.1269601>
18. Mohamad Said K. A. et al. A review of technologies for phenol removal from wastewater // *Process Safety and Environmental Protection*. – 2021. – Vol. 151. – P. 257–289. – <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.05.015>
19. Mohammed N. A. S. et al. Phenol adsorption on biochar from pine fruit shells // *Journal of Environmental Management*. – 2018. – Vol. 226. – P. 377–385. – <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.033>
20. Mohd A. Presence of phenol in wastewater effluent and its removal // *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*. – 2020. – Vol. 102, No. 6. – P. 1362–1384. – <https://doi.org/10.1080/03067319.2020.1738412>
21. Mojoudi N. et al. Phenol adsorption on microporous activated carbons from oily sludge // *Scientific Reports*. – 2019. – Vol. 9. – Art. 19352. – <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55794-4>
22. Muhammad S. et al. Agricultural-waste-based nano-activated carbon for wastewater treatment // *Agriculture*. – 2022. – Vol. 12, No. 10. – Art. 1737. – <https://doi.org/10.3390/agriculture12101737>
23. Mukherjee A. et al. Synthesis of biochar from lignocellulosic biomass // *Frontiers in Materials*. – 2022. – Vol. 9. – Art. 870184. – <https://doi.org/10.3389/fmats.2022.870184>

REFERENCES

1. Anku, W. W., Mamo, M. A., & Govender, P. P. (2017). Phenolic compounds in water: sources, reactivity, toxicity and treatment methods. In *Phenolic Compounds — Biological Activity* (pp. 419–443). InTechOpen. <https://doi.org/10.5772/66927>

2. Al-Gheethi, A. A., et al. (2022). Sustainable approaches for removing Rhodamine B dye using agricultural waste adsorbents. *Chemosphere*, 287, 132080. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132080>
3. Barquilha, C. E. R., & Braga, M. C. B. (2021). Adsorption of organic and inorganic pollutants onto biochars. *Bioresource Technology Reports*, 15, 100728. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100728>
4. Brillas, E., & Garcia-Segura, S. (2020). Benchmarking Fenton, photo-Fenton, electro-Fenton processes. *Separation and Purification Technology*, 237, 116337. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116337>
5. Crini, G., & Lichtfouse, E. (2018). Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters*, 17, 145–155. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0785-9>
6. Dai, Q., et al. (2022). Co-pyrolysis biochar from sewage sludge and lignin. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(3), 107898. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107898>
7. El-Naas, M. H., Surkatti, R., & Al-Zuhair, S. (2016). Petroleum refinery wastewater treatment: a pilot scale study. *Journal of Water Process Engineering*, 14, 71–76. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2016.10.005>
8. Grace Pavithra, K., et al. (2023). A review on advancements in extraction and removal of phenols from phenolic wastewater. *Environmental Research*, 237, 117005. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117005>
9. Ho, S.-H., et al. (2017). High-efficiency removal of lead from wastewater by biochar from anaerobic digestion sludge. *Bioresource Technology*, 246, 142–149. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.025>
10. Inyang, M. I., et al. (2016). A review of biochar as a low-cost adsorbent for aqueous heavy metal removal. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 46(4), 406–433. <https://doi.org/10.1080/10643389.2015.1096880>
11. Jafarinejad, S. (2019). Simulation for performance and economic evaluation of activated sludge process in petroleum refinery. *ChemEngineering*, 3(2), 45. DOI:10.3390/chemengineering3020045
12. Kim, S., et al. (2022). Review of adsorption-membrane hybrid systems for water treatment. *Chemosphere*, 286, 131916. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131916>
13. Kumar, A., & Jena, H. M. (2016). Removal of methylene blue and phenol onto activated carbon from Fox nutshell. *Journal of Cleaner Production*, 137, 1246–1259. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.177>
14. Lawal, A. A., et al. (2021). Adsorption mechanism of phenol removal by biochar from oil palm frond. *Environmental Pollution*, 269, 116197. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116197>
15. Lima, É. C., et al. (2019). A critical review of thermodynamic parameters on adsorption equilibria. *Journal of Molecular Liquids*, 273, 425–434. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.10.048>
16. Mamman, S., et al. (2024). Influence of adsorption parameters on phenolic compounds removal. *Desalination and Water Treatment*, 320, 100631. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100631>
17. Mhlongo, N. L., et al. (2024). Phenolic compounds occurrence and human health risk assessment. *Frontiers in Toxicology*, 5, 1269601. <https://doi.org/10.3389/ftox.2023.1269601>
18. Mohamad Said, K. A., et al. (2021). A review of technologies for phenol removal from wastewater. *Process Safety and Environmental Protection*, 151, 257–289. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.05.015>
19. Mohammed, N. A. S., et al. (2018). Phenol adsorption on biochar from pine fruit shells. *Journal of Environmental Management*, 226, 377–385. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.033>
20. Mohd, A. (2020). Presence of phenol in wastewater effluent and its removal. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 102(6), 1362–1384. <https://doi.org/10.1080/03067319.2020.1738412>
21. Mojoudi, N., et al. (2019). Phenol adsorption on microporous activated carbons from oily sludge. *Scientific Reports*, 9, 19352. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55794-4>
22. Muhammad, S., et al. (2022). Agricultural-waste-based nano-activated carbon for wastewater treatment. *Agriculture*, 12(10), 1737. <https://doi.org/10.3390/agriculture12101737>
23. Mukherjee, A., et al. (2022). Synthesis of biochar from lignocellulosic biomass. *Frontiers in Materials*, 9, 870184. <https://doi.org/10.3389/fmats.2022.870184>

МЕТАЛЛУРГИЯ ӨНЕРКӘСІБІНІҢ МОДИФИКАЦИЯЛАНҒАН ҚАЛДЫҒЫМЕН ӨНДІРІСТІК КӘСІПОРЫНДАРДЫҢ САРҚЫНДЫ СУЛАРЫН ФЕНОЛДАРДАН ТАЗАРТУ

Нурия Е.Айкенова¹ т.ғ.к., Г. Мурат¹, Гузель У. Абилова² PhD, Умбеталы К.Сарсембин³ PhD, Ерик С. Меркибаев³ PhD, Сауле М.Нурмакова³ т.ғ.к.

¹Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан; aikenova_nye@enu.kz (HEA), (МГ)

²Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе, Қазақстан; gabilova@zhubanov.edu.kz (ГУА),

³К.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті (Satbayev University), Алматы, Қазақстан; u.sarsembin@satbayev.university (УКС), y.merkibayev@satbayev.university (ECM), snurmakova@satbayev.university (HCM)

*Автор корреспонденции: Сауле М. Нурмакова snurmakova@satbayev.university. mnurma@mail.ru

ТҮЙІН СӨЗДЕР

фенол, адсорбция, хром-
шпинель шөгінділер, сілтілік
модификация, Лангмюр
изотермасы, қалдық сулар

АБСТРАКТ

Бұл зерттеу Ақтөбе ферроқорытпа зауытынан алынған XShP-02 хромшпинелі шламының (бай бөлігі) мұнай өңдеу зауыттарының ағынынан фенолды сорбент ретінде жою әлеуетін зерттейді. Шлам 70 °C-та 1 М NaOH ерітіндісімен сілтілік модификациядан өтіп, кейін 450 °C-та кальцинацияланды. Физико-химиялық қасиеттері XRF, SEM, ИҚ спектроскопия және TGA/DSC әдістерімен сипатталды. Лангмюр және Редлих–Петерсен модельдері адсорбциялық тепе-

Мақала жайында:

Алынды: 25.06.2026

Қайта қаралды: 05.09.2026

Қабылданды: 11.09.2026

Жарияланды: 30.09.2026

теңдікті ең жақсы сипаттайды ($R^2 = 1,000$). Ең жоғары адсорбциялық сыйымдылық 36,00 мг/г; 0,30 г/100 мл оңтайлы доза фенолдың 96 %-ын жоюды қамтамасыз етеді. $\Delta G^\circ = -5,97$ кДж/моль адсорбцияның спонтанды физикалық сипатын және сорбентті қайта өңдеу мүмкіндігін растайды.

REMOVAL OF PHENOLS FROM INDUSTRIAL WASTEWATER USING MODIFIED METALLURGICAL WASTE

Nuriya E. Aikenova Candidate of Technical Sciences, G. Murat¹, Guzel U. Abilova² PhD, Umbetaly K. Sarsembin³ PhD, Yerik S. Merkiybayev³ PhD, Saule M. Nurmakova³ Candidate of Technical Sciences

¹L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; aikenova_nye@enu.kz (NEA), (GM)

²K. Zhubanov Aktobe Regional University, Aktobe, Kazakhstan; gabilova@zhubanov.edu.kz (GUA)

³K.I. Satbayev Kazakh National Research Technical University (Satbayev University), Almaty, Kazakhstan;

u.sarsembin@satbayev.university (UKS), y.merkibayev@satbayev.university (ESM), snurmakova@satbayev.university (SMN)

*Corresponding author: Saule M. Nurmakova, snurmakova@satbayev.university; mnurma@mail.ru

KEY WORDS

a phenol, adsorption, chromi-um-spinel sludge, alkaline modification, Langmuir isotherm, waste water

About article:

Received: 25.06.2026

Revised: 05.09.2026

Accepted: 11.09.2026

Published: 30.09.2026

ABSTRACT

This study investigates the potential for using XShP-02 chromium spinel sludge (rich fraction) from the Aktobe Ferroalloy Plant as a sorbent for the removal of phenol from the effluent of oil refineries. The sludge was subjected to alkaline modification with 1 M NaOH at 70 °C, followed by calcination at 450 °C. The physicochemical properties were characterised using XRF, SEM, IR spectroscopy and TGA/DSC. The Langmuir and Redlich–Peterson models provide the best description of the adsorption equilibrium ($R^2 = 1.000$). The maximum adsorption capacity is 36.00 mg/g; an optimal dose of 0.30 g/100 ml ensures the removal of 96% of phenol. $\Delta G^\circ = -5.97$ kJ/mol confirms the spontaneous physical nature of the adsorption and the possibility of sorbent regeneration.

Примечание издателя: заявления, мнения и данные во всех публикациях принадлежат только автору (авторам), а не журналу "Гидрометеорология и экология" и/или редактору (редакторам).