

Статья поступила в редакцию: 10.07.2026

Статья принята к публикации: 16.08.2026

Статья опубликована: 28.08.2026

УДК 628.316.12:661.183

Очистка металлургических промышленных сточных вод сорбентами на основе модифицированного шафирканского бентонита и сапропеля

Раззақов Ҳасан Қаландарович

канд. техн. наук, проф., проф.

кафедры Химии и нефтегазовой технологии, Бухарский государственный университет

Республика Узбекистан, г. Бухара

Амонов Мухтар Рахматович

д-р техн. наук, проф., проф.

кафедры Химии и нефтегазовой технологии Бухарский государственный университет

Республика Узбекистан, г. Бухара

Назаров Сайфулла Ибодуллоевич

д-р техн. наук (DSc)

проф., проф. кафедры Химии и нефтегазовой технологии, Бухарский государственный

университет

Республика Узбекистан, г. Бухара

E-mail: s.i.nazarov@buxdu.uz

Treatment of metallurgical industrial wastewater using sorbents based on modified Shafirkan bentonite and sapropel

Razzaqov Hasan

professor, Candidate of Technical Sciences, Professor

of the Department of Chemistry and Oil and Gas Technology, Bukhara State University

Uzbekistan, Bukhara

Amonov Muxtar

doctor of Technical Sciences, Professor, Professor

of the Department of Chemistry and Oil and Gas Technology, Bukhara State University

Uzbekistan, Bukhara

Nazarov Sayfulla

doctor of Technical Sciences, Professor, Professor

of the Department of Chemistry and Oil and Gas Technology, Bukhara State University

Uzbekistan, Bukhara

Аннотация

Цель работы — оценка эффективности композиционного сорбента на основе модифицированного шафирканского бентонита и сапропеля при очистке высокоминерализованных сточных вод третьего гидрометаллургического завода (ГМЗ-3), а

Библиографическое описание: Раззақов Ҳ.Қ., Амонов М.Р., Назаров С.И. Очистка металлургических промышленных сточных вод сорбентами на основе модифицированного шафирканского бентонита и сапропеля // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 8(149). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23214>

также определение его сорбционной ёмкости и оптимальной дозы. Научная новизна состоит в применении композита из местного минерального и органоминерального сырья для одновременного снижения жёсткости, минерализации и извлечения широкого спектра тяжёлых металлов непосредственно из реальных промышленных стоков, а не из модельных растворов. Исходные сточные воды характеризовались высокой общей жёсткостью (85,23 мг-экв/л), значительной минерализацией (сухой остаток 7858 мг/л) и повышенным содержанием ионов тяжёлых металлов. Сорбент получали механической активацией (измельчение до 100 мкм) и термической обработкой при 350 °С. Изучено влияние дозы сорбента (0,1–0,3 %) на эффективность извлечения загрязнителей. При дозе 0,3 % степень очистки по тяжёлым металлам составила от 83,9 % (Cu, Co) до 95,5 % (Cr); максимальная сорбционная ёмкость (при дозе 0,1 %) по никелю, меди и кобальту достигала соответственно 37,4; 19,5 и 12,9 мг/г. Общая жёсткость снизилась в 3,3 раза, суммарное содержание катионов, анионов и сухой остаток уменьшились приблизительно вдвое. Остаточные концентрации Al, Zn, Sr, Mo и Cr достигли нормативного уровня, тогда как Ni, Cu, Co, Mn, As и Se остались выше ПДК и требуют доочистки. Практическая значимость работы заключается в возможности применения композиционного сорбента как ступени глубокой очистки промышленных стоков в составе комбинированной технологии.

Abstract

The aim of this work was to evaluate the efficiency of a composite sorbent based on modified Shafirkan bentonite and sapropel for treating highly mineralized wastewater from the third hydrometallurgical plant (HMP-3), and to determine its sorption capacity and optimal dose. The novelty lies in using a composite of local mineral and organo-mineral raw materials to simultaneously reduce hardness and mineralization and to remove a wide range of heavy metals directly from real industrial effluents rather than from model solutions. The raw wastewater was characterized by high total hardness (85.23 meq/L), significant mineralization (dry residue 7858 mg/L) and elevated concentrations of heavy-metal ions. The sorbent was obtained by mechanical activation (grinding to 100 µm) and thermal treatment at 350 °C. The effect of the sorbent dose (0.1–0.3 %) on pollutant removal was studied. At a dose of 0.3 %, the degree of heavy-metal removal ranged from 83.9 % (Cu, Co) to 95.5 % (Cr); the maximum sorption capacity (at a dose of 0.1 %) for nickel, copper and cobalt reached 37.4, 19.5 and 12.9 mg/g, respectively. The total hardness decreased 3.3-fold, while the total content of cations and anions and the dry residue decreased approximately twofold. The residual concentrations of Al, Zn, Sr, Mo and Cr reached the regulatory level, whereas Ni, Cu, Co, Mn, As and Se remained above the MPC and require post-treatment. The practical significance lies in the possibility of using the composite sorbent as a deep-purification stage for industrial effluents within a combined technology.

Ключевые слова: промышленные сточные воды, гидрометаллургический завод, композиционный сорбент, модифицированный бентонит, сапропель, тяжёлые металлы, сорбционная ёмкость, ПДК, общая жёсткость.

Keywords: industrial wastewater, hydrometallurgical plant, composite sorbent, modified bentonite, sapropel, heavy metals, sorption capacity, MPC, total hardness.

Введение

Интенсивное развитие горно-металлургической отрасли сопровождается образованием значительных объёмов сточных вод, отличающихся высокой минерализацией, повышенной жёсткостью и наличием широкого спектра ионов тяжёлых металлов [6, 9]. Сточные воды гидрометаллургических заводов (ГМЗ), на которых применяются кислотное выщелачивание, сорбционное извлечение металлов и сопутствующие реагентные процессы, представляют особую опасность для окружающей среды из-за одновременного присутствия сульфатов, хлоридов, нитратов, ионов кальция и магния, а также токсичных металлов — никеля, меди, кобальта, молибдена, мышьяка и селена [14, 10, 18].

Традиционные механические и биологические методы очистки в отношении таких вод малоэффективны: высокая солёность подавляет биохимические процессы, а мелкодисперсные и растворённые формы металлов практически не удаляются отстаиванием и фильтрацией [9, 14]. В связи с этим актуальной задачей является разработка комплексных технологий, сочетающих адсорбционные, ионообменные и коагуляционные механизмы очистки на основе доступных и недорогих природных материалов [4, 10].

Перспективными сырьевыми источниками для получения сорбентов являются природные слоистые алюмосиликаты (бентониты) и органоминеральные донные отложения (сапропели). Бентониты обладают развитой удельной поверхностью, катионообменной ёмкостью и способностью к набуханию [6, 11, 16, 13, 17], а сапропель содержит гуминовые вещества и функциональные группы, обеспечивающие комплексообразование с ионами металлов [5, 8]. Химическая, механическая и термическая модификация этих материалов позволяет существенно повысить их сорбционные характеристики [11, 19, 12].

Научная новизна работы состоит в применении композита из местного шафирканского бентонита и сапропеля для одновременного снижения общей жёсткости, минерализации и извлечения широкого спектра тяжёлых металлов непосредственно из реальных высокоминерализованных стоков ГМЗ, а не из модельных растворов. Целью исследования являлась оценка эффективности данного композиционного сорбента при очистке сточных вод ГМЗ-3, определение его сорбционной ёмкости, установление оптимальной дозы и сопоставление достигнутых остаточных концентраций с предельно допустимыми концентрациями (ПДК).

Материалы и методы

Объект исследования — сточные воды третьего гидрометаллургического завода (ГМЗ-3), характеризующиеся высокой минерализацией и повышенным содержанием ионов тяжёлых металлов. Отбор и хранение проб выполняли в соответствии с ГОСТ 31861-2012 [2].

Получение и характеристика сорбента. Композиционный сорбент готовили на основе модифицированного шафирканского бентонита и сапропеля при массовом соотношении компонентов 1:1. Материалы подвергали механической активации — измельчению до размера частиц не более 100 мкм — с последующей термической обработкой при 350 °С, что обеспечивало удаление избыточной влаги, частичную деструкцию органической составляющей и формирование дополнительных активных центров [4, 19]. Текстурные и структурные характеристики сорбента (удельная поверхность по методу БЭТ, объём

и распределение пор, фазовый и функциональный состав) контролировали методами низкотемпературной адсорбции азота, рентгенофазового анализа (РФА), ИК-Фурье-спектроскопии (FTIR) и сканирующей электронной микроскопии (SEM).

Проведение сорбции. Очистку сточной воды проводили в статических условиях. В образцы объёмом 100 мл вносили композитный сорбент в количестве 0,1; 0,15; 0,20; 0,25 и 0,30 % от массы раствора, что при плотности раствора около 1 г/см³ соответствовало дозе 1,0 – 3,0 г/л. Суспензию перемешивали при температуре 25 ± 1 °С и скорости 200 об/мин до достижения сорбционного равновесия, после чего отделяли сорбент фильтрованием и анализировали фильтрат. Все эксперименты выполняли в трёх независимых повторностях, а в работе приведены средние значения полученных результатов.

Аналитические методы. Концентрации тяжёлых металлов (Al, Mn, Ni, Cu, Zn, As, Se, Sr, Mo, Cr и Co) определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS). При необходимости пробы с высоким содержанием металлов предварительно разбавляли до рабочего диапазона измерений. Макрокомпонентный состав (Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{3+} , Fe^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_2^- , NO_3^- , CO_3^{2-} и HCO_3^-), общую жёсткость, сухой остаток, pH, содержание свободного CO_2 и SiO_2 определяли титриметрическими, ионометрическими и гравиметрическими методами в соответствии с действующими стандартными методиками. Степень очистки рассчитывали по уравнению: $E = (C_0 - C)/C_0 \cdot 100$ %, а сорбционную ёмкость q (мг/г) — по формуле $q = (C_0 - C) \cdot V/m$, где C_0 и C — концентрация компонента до и после очистки, V — объём раствора, m — масса сорбента. Остаточные концентрации сопоставляли с ПДК химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования [1].

Результаты и обсуждение

Исходная характеристика сточных вод. Анализ показал, что сточные воды ГМЗ-3 являются высокоминерализованными. В катионном составе преобладали ионы магния (574 мг/л) и кальция (748 мг/л), что определяло высокую общую жёсткость — 85,23 мг-экв/л. Значительными были также содержания натрия (658 мг/л) и калия (245 мг/л). Среди анионов доминировали хлориды (2045 мг/л) и сульфаты (2310 мг/л); присутствие сульфатов связано с применением в технологических процессах реагентов H_2SO_4 , K_2SO_4 , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ и FeSO_4 [7]. Суммарное содержание анионов составляло 5450,2 мг/л, сухой остаток — 7858 мг/л.

Изменение макрокомпонентного состава. Применение сорбента (доза 0,3 %) привело к снижению суммарного содержания катионов с 2313 до 1137 мг/л и анионов — с 5450,2 до 2372,3 мг/л, то есть приблизительно вдвое (таблица 1). Наиболее выражено уменьшились ионы, определяющие жёсткость: Ca^{2+} — на 66,7 %, Mg^{2+} — на 71,3 %. Существенно снизилось содержание сульфатов (на 62,9 %) и хлоридов (на 48,6 %).

Таблица 1.

Макрокомпонентный (ионный) состав сточных вод ГМЗ-3 до и после очистки, мг/л

Компонент	До очистки	После очистки (0,3 %)	Снижение, %
Катионы			
Na^+	658	521	20,8

Компонент	До очистки	После очистки (0,3 %)	Снижение, %
K ⁺	245	151	38,4
NH ₄ ⁺	32	29	9,4
Ca ²⁺	748	249	66,7
Mg ²⁺	574	165	71,3
Fe ³⁺	32	14	56,3
Fe ²⁺	24	8	66,7
Сумма катионов	2313	1137	50,8
Анионы			
Cl ⁻	2045	1051	48,6
SO ₄ ²⁻	2310	856	62,9
NO ₂ ⁻	1,2	0,34	71,7
NO ₃ ⁻	772	345	55,3
CO ₃ ²⁻	54	22	59,3
HCO ₃ ⁻	268	98	63,4
Сумма анионов	5450,2	2372,3	56,5

Изменение интегральных показателей. Снижение содержания кальция и магния обусловило уменьшение общей жёсткости в 3,3 раза — с 85,23 до 26,2 мг-экв/л (таблица 2). Сухой остаток уменьшился с 7858 до 3689 мг/л, значение pH стабилизировалось вблизи нейтрального (с 7,89 до 7,31). После очистки вода приобрела полную прозрачность, отсутствие цвета и запаха; осадок при отстаивании не образовывался.

Таблица 2.

Интегральные физико-химические показатели сточных вод ГМЗ-3 до и после очистки

Показатель	До очистки	После очистки (0,3 %)
Общая жёсткость, мг-экв/л	85,23	26,2
Карбонатная жёсткость, мг-экв/л	3,79	3,12
Некарбонатная жёсткость, мг-экв/л	81,44	23,08
pH	7,89	7,31
Сухой остаток (эксперим.), мг/л	7858	3689
Сухой остаток (расчётн.), мг/л	7763	3509
Свободный CO ₂ , мг/л	29	24
SiO ₂ , мг/л	8	4
Поглощённые вещества, мг/л	410	374

Извлечение тяжёлых металлов. С увеличением дозы сорбента концентрации всех металлов последовательно снижались (таблица 3). Так, содержание никеля уменьшилось с 62,124 до 9,430 мг/л, меди — с 31,475 до 5,076 мг/л, кобальта — с 21,747 до 3,507 мг/л.

Таблица 3.

Концентрация тяжёлых металлов в сточных водах ГМЗ-3 в зависимости от дозы сорбента и итоговая степень очистки

Металл	Исходная	0,1 %	0,15 %	0,2 %	0,25 %	0,3 %	E, % (0,3 %)
Al	0,173	0,057	0,039	0,025	0,018	0,013	92,5
Mn	1,312	0,469	0,333	0,222	0,173	0,136	89,6
Ni	62,124	24,753	19,450	14,734	11,787	9,430	84,8
Cu	31,475	11,943	9,256	6,568	5,673	5,076	83,9
Zn	0,122	0,035	0,024	0,017	0,013	0,009	92,6
As	0,921	0,270	0,253	0,183	0,122	0,087	90,6
Se	1,142	0,379	0,249	0,162	0,098	0,054	95,3
Sr	4,870	1,710	1,201	0,832	0,601	0,462	90,5
Mo	2,811	0,850	0,611	0,425	0,319	0,239	91,5
Cr	0,223	0,055	0,038	0,024	0,015	0,010	95,5
Co	21,747	8,869	7,632	5,775	4,331	3,507	83,9

Примечание: концентрации приведены в мг/л; E — степень очистки при дозе сорбента 0,3 %.

При дозе 0,3 % степень очистки по всем металлам превышает 80 %; максимальные значения достигнуты для хрома (95,5 %), селена (95,3 %) и цинка (92,6 %), а для металлов с наибольшими исходными концентрациями — Ni, Cu и Co — она составила 84,8; 83,9 и 83,9 % соответственно (рисунок 1)

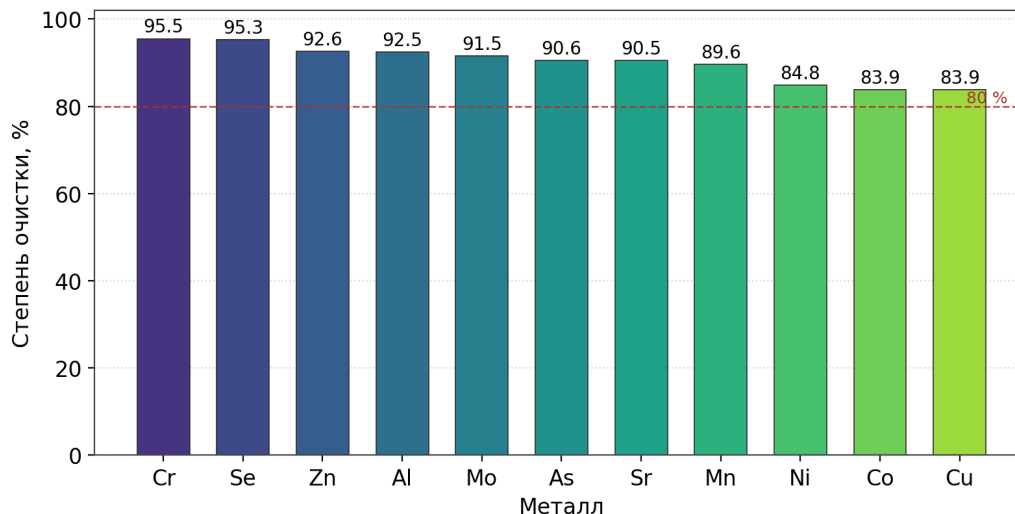


Рисунок 1. Степень очистки сточных вод ГМЗ-3 по тяжёлым металлам при дозе сорбента 0,3 %

Полученные результаты показывают, что при дозе сорбента 0,3 % достигается эффективное извлечение всех исследованных тяжёлых металлов. Наибольшая степень очистки наблюдается для Cr (95,5 %), Se (95,3 %) и Zn (92,6 %), что свидетельствует о высокой аффинности активных центров сорбента к данным ионам. Несколько более низкая эффективность удаления Ni, Cu и Co обусловлена их повышенными исходными

концентрациями и конкуренцией за сорбционные центры. В целом степень очистки по всем исследованным металлам превышает 80 %, что подтверждает перспективность применения разработанного сорбента для очистки промышленных сточных вод

Сорбционная ёмкость. Рассчитанная сорбционная ёмкость q закономерно снижается с ростом дозы сорбента, что характерно для процессов адсорбции: при малых дозах активные центры используются полнее [15]. Для никеля величина q уменьшается с 37,4 мг/г (доза 0,1 %) до 17,6 мг/г (доза 0,3 %), для меди — с 19,5 до 8,8 мг/г, для кобальта — с 12,9 до 6,1 мг/г; для стронция и молибдена максимальная сорбционная ёмкость (доза 0,1 %) составила около 3,2 и 2,0 мг/г соответственно (рисунок 2). Полученные значения ёмкости сопоставимы с литературными данными для модифицированных бентонитовых сорбентов и подтверждают эффективность органоминерального композита при высоких исходных концентрациях металлов.

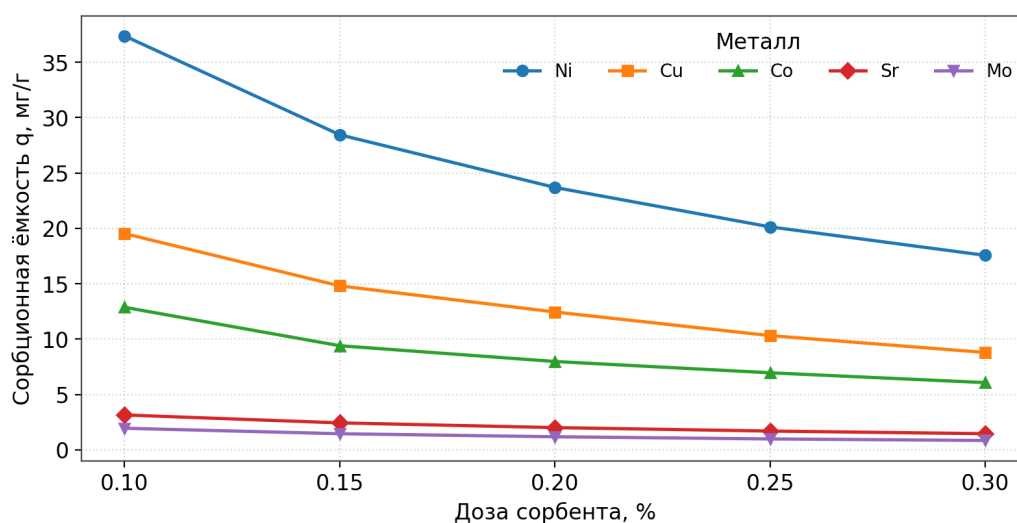


Рисунок 2. Зависимость сорбционной ёмкости q от дозы сорбента для Ni, Cu, Co, Sr, Mo

Зависимость остаточной концентрации от дозы сорбента носит нелинейный характер (рисунок 3): наиболее интенсивное снижение наблюдается в интервале доз 0,1–0,2 %, тогда как при переходе от 0,25 к 0,3 % прирост эффективности замедляется. Это указывает на постепенное заполнение сорбционной ёмкости и позволяет рассматривать интервал 0,2–0,3 % как оптимальный по критерию «степень очистки — расход реагента».

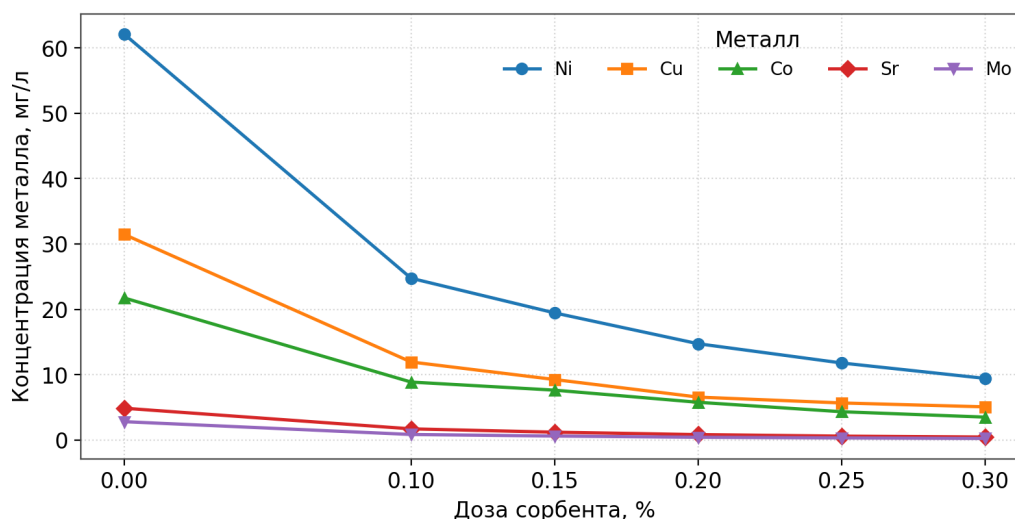


Рисунок 3. Изменение концентрации тяжёлых металлов (Ni, Cu, Co, Sr, Mo) в зависимости от дозы сорбента

Сопоставление с ПДК. Для оценки экологической эффективности остаточные концентрации металлов при дозе 0,3 % сопоставлены с ПДК для водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования [1] (таблица 4). Установлено, что содержание Al, Zn, Sr, Mo и Cr снижается до уровня ниже ПДК, тогда как Ni, Cu, Co, а также As, Se и Mn остаются выше нормативных значений (для никеля и кобальта — на 1–2 порядка). Таким образом, разработанный сорбент обеспечивает глубокое удаление ряда компонентов, однако для достижения нормативного качества по никелю, меди и кобальту требуется доочистка — увеличение дозы, многоступенчатая обработка или комбинирование с ионным обменом либо осаждением.

Таблица 4.

Сопоставление остаточных концентраций тяжёлых металлов (доза 0,3 %) с ПДК

Металл	Остаточная конц., мг/л	ПДК, мг/л	Кратность С/ПДК	Оценка
Al	0,013	0,5	0,03	ниже ПДК
Mn	0,136	0,1	1,4	выше ПДК
Ni	9,430	0,02	471,5	выше ПДК
Cu	5,076	1	5,1	выше ПДК
Zn	0,009	1	0,01	ниже ПДК
As	0,087	0,01	8,7	выше ПДК
Se	0,054	0,01	5,4	выше ПДК
Sr	0,462	7	0,07	ниже ПДК
Mo	0,239	0,25	0,96	ниже ПДК
Cr	0,010	0,05	0,20	ниже ПДК
Co	3,507	0,1	35,1	выше ПДК

Примечание: ПДК приведены по ГН 2.1.5.1315 – 03. Для хрома использована ПДК по Cr(VI), тогда как методом ICP-MS определяли валовое содержание хрома, поэтому оценка по хромю является консервативной. При внедрении технологии следует руководствоваться действующими санитарными нормативами Республики Узбекистан.

Механизм очистки. Комплексное действие композитного сорбента реализуется за счёт нескольких взаимодополняющих механизмов: ионного обмена на межслоевых катионах бентонита, поверхностного комплексообразования с участием гуминовых веществ и функциональных групп сапропеля, а также адсорбции на развитой пористой поверхности, сформированной в процессе модификации сорбента [11, 16, 3]. Совместное протекание этих процессов обеспечивает эффективное извлечение ионов жёсткости, тяжёлых металлов и других растворённых загрязняющих веществ, сопровождающееся снижением общей минерализации очищаемой воды. Комплексный характер взаимодействия позволяет достичь более высокой эффективности очистки по сравнению с использованием отдельных физико-химических методов.

Заключение

1. Разработанный композиционный сорбент на основе модифицированного шафирканского бентонита и сапропеля (соотношение 1:1), полученный измельчением до 100 мкм и термической активацией при 350 °С, проявляет высокую сорбционную способность по отношению к тяжёлым металлам и макрокомпонентам высокоминерализованных сточных вод гидрометаллургического производства.

2. При дозе сорбента 0,3 % степень очистки по тяжёлым металлам составляет от 83,9 % (Cu, Co) до 95,5 % (Cr); высокие значения достигнуты также для Se (95,3 %) и Zn (92,6 %). Максимальная сорбционная ёмкость, рассчитанная при дозе 0,1 %, достигает 37,4 мг/г по Ni, 19,5 мг/г по Cu и 12,9 мг/г по Co; с увеличением дозы до 0,3 % она закономерно снижается (для Ni — до 17,6 мг/г). Оптимальным по критерию «эффективность — расход реагента» является интервал доз 0,2–0,3 %.

3. Очистка сопровождается снижением общей жёсткости в 3,3 раза (с 85,23 до 26,2 мг-экв/л), а также уменьшением суммарного содержания катионов, анионов и сухого остатка приблизительно вдвое; значение pH стабилизируется вблизи нейтрального, органолептические показатели воды улучшаются.

4. Сопоставление с ПДК показало, что остаточные концентрации Al, Zn, Sr, Mo и Cr достигают нормативного уровня, тогда как Ni, Cu, Co, Mn, As и Se остаются выше ПДК и требуют дополнительной доочистки (увеличение дозы, многоступенчатая схема или комбинирование сорбции с ионным обменом либо осаждением). Следовательно, разработанный сорбент целесообразно применять как эффективную ступень предварительной и глубокой очистки в составе комбинированной технологии.

5. Полученные результаты подтверждают перспективность использования сорбентов на основе местного минерального и органоминерального сырья. Дальнейшие исследования целесообразно направить на изучение изотерм и кинетики сорбции, влияния pH и температуры раствора, регенерацию сорбента и оптимизацию состава композита.

Список литературы

1. ГН 2.1.5.1315–03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. — М. — 2003.

2. ГОСТ 31861-2012. Вода. Общие требования к отбору проб. – М.: Стандартинформ, 2013. – 32 с.
3. Когановский А.М., Клименко Н.А., Левченко Т.М. Адсорбция органических веществ из воды. – Л.: Химия, 1990. – 256 с.
4. Смирнов А.Д. Сорбционная очистка воды. – Л.: Химия, 1982. – 168 с.
5. Стрельникова О.Ю., Гурова Н.С. Использование сапропеля для очистки сточных вод от ионов тяжёлых металлов // Вода: химия и экология. – 2015. – № 4.
6. Тарасевич Ю.И. Природные сорбенты в процессах очистки воды. – Киев: Наукова думка, 1981. – 208 с.
7. Химическая технология неорганических веществ / под ред. Т.Г. Ахметова. – М.: Высшая школа, 2002. – 688 с. – М.: Высшая школа, 2002. – 688 с.
8. Albrektienė-Plačakė R., Paliulis D. Albrektienė-Plačakė R., Paliulis D. Investigation on applying sapropel for removal of heavy metals (cadmium, chromium, copper, and zinc) from aqueous solutions // Archives of Environmental Protection. – 2024. – Т. 50, № 2.
9. Bailey S.E., Olin T.J., Bricka R.M., Adrian D.D. A review of potentially low-cost sorbents for heavy metals // Water Research. – 1999. – № 11.
10. Barakat M.A. New trends in removing heavy metals from industrial wastewater // Arabian Journal of Chemistry. – 2011. – № 4.
11. Bhattacharyya K.G., Gupta S.S. Adsorption of a few heavy metals on natural and modified kaolinite and montmorillonite: A review // Advances in Colloid and Interface Science. – 2008. – № 2.
12. Borah D., Nath H., Saikia H. Modification of bentonite clay and its applications: a review // Reviews in Inorganic Chemistry. – 2022. – № 3.
13. Dhar A.K., Himu H.A., Bhattacharjee M., Mostufa M.G., Parvin F. Insights on applications of bentonite clays for the removal of dyes and heavy metals from wastewater: a review // Environmental Science and Pollution Research. – 2023. – № 3.
14. Fu F., Wang Q. Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review // Journal of Environmental Management. – 2011. – № 3.
15. Ho Y.S. McKay G. Pseudo-second order model for sorption processes // Process Biochemistry. – 1999. – № 5.
16. Kubilay S., Gürkan R., Savran A. Şahan T. Removal of Cu(II), Zn(II) and Co(II) ions from aqueous solutions by adsorption onto natural bentonite // Adsorption. – 2007. – № 1.
17. Novikau R., Lujanienė G. Adsorption behaviour of pollutants: heavy metals, radionuclides, organic pollutants, on clays and their minerals (raw, modified and treated): a review // Journal of Environmental Management. – 2022. – Т. 114685.
18. Qasem N.A.A., Mohammed R.H., Lawal D.U. Removal of heavy metal ions from wastewater: a comprehensive and critical review // npj Clean Water. – 2021. – Т. 36.
19. Uddin M.K. A review on the adsorption of heavy metals by clay minerals, with special focus on the past decade // Chemical Engineering Journal. – 2017.

References

1. GN 2.1.5.1315–03. Maximum Permissible Concentrations (MPC) of Chemicals in the Water of Water Bodies for Drinking and Cultural-Domestic Use. Moscow, 2003. Moscow, 2003.
2. GOST 31861-2012. Water. General Requirements for Sampling. Moscow, Standartinform, 2013. 32 P. – Moscow: Standartinform, 2013. – 32 P.
3. Koganovsky A.M., Klimenko N.A., Levchenko T.M. Adsorption of Organic Substances from Water. Leningrad, Khimiya. – 1990. – 256 P.
4. Smirnov A.D. Sorption Water Treatment. Leningrad, Khimiya. – 1982. – 168 P.
5. Strelnikova O.Yu., Gurova N.S. Application of sapropel for the removal of heavy metal ions from wastewater. Water: Chemistry and Ecology, 2015, no. 4, P. 25–31.
6. Tarasevich Yu.I. Natural Sorbents in Water Treatment Processes. Kyiv, Naukova Dumka. – 1981. – 208 P.
7. Akhmetov T.G. (Ed.). Chemical Technology of Inorganic Substances. Moscow, Vysshaya Shkola. – 2002. – 688 P.
8. Albrektienė-Plačakė, R., Paliulis, D. Albrektienė-Plačakė, R., Paliulis, D. Investigation on applying sapropel for removal of heavy metals (cadmium, chromium, copper, and zinc) from aqueous solutions. Archives of Environmental Protection, 2024, vol. 50, P. 55–64 // Archives of Environmental Protection. – 2024. – T. 50, № 2.
9. Bailey S.E., Olin T.J., Bricka R.M., Adrian D.D. A review of potentially low-cost sorbents for heavy metals. Water Research, 1999, vol. 33, no. 11, P. 2469–2479.
10. Barakat M.A. New trends in removing heavy metals from industrial wastewater. Arabian Journal of Chemistry, 2011, vol. 4, no. 4, P. 361–377.
11. Bhattacharyya K.G., Gupta S.S. Adsorption of a few heavy metals on natural and modified kaolinite and montmorillonite: A review // Advances in Colloid and Interface Science. – 2008. – № 2.
12. Borah, D., Nath, H., Saikia, H. Modification of bentonite clay and its applications: a review. Reviews in Inorganic Chemistry, 2022, vol. 42, no. 3, P. 265–282.
13. Dhar A.K., Himu H.A., Bhattacharjee, M., Mostufa M.G., Parvin, F. Insights on applications of bentonite clays for the removal of dyes and heavy metals from wastewater: a review. Environmental Science and Pollution Research, 2023, vol. 30, no. 3, P. 5440–5474.
14. Fu, F., Wang, Q. Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review // Journal of Environmental Management. – 2011. – № 3.
15. Ho Y.S., McKay, G. Pseudo-second order model for sorption processes. Process Biochemistry, 1999, vol. 34, no. 5, P. 451–465.
16. Kubilay, S., Gürkan, R., Savran, A., Şahan, T. Removal of Cu(II), Zn(II) and Co(II) ions from aqueous solutions by adsorption onto natural bentonite. Adsorption, 2007, vol. 13, no. 1, P. 41–51.

-
17. Novikau, R., Lujaniene, G. Adsorption behaviour of pollutants: heavy metals, radionuclides, organic pollutants, on clays and their minerals (raw, modified and treated): a review // Journal of Environmental Management. – 2022. – Т. 114685.
 18. Qasem N.A.A., Mohammed R.H., Lawal D.U. Removal of heavy metal ions from wastewater: a comprehensive and critical review. npj Clean Water, 2021, vol. 4, art. 36.
 19. Uddin M.K. A review on the adsorption of heavy metals by clay minerals, with special focus on the past decade. Chemical Engineering Journal, 2017, vol. 308, P. 438–462.