Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-6-157-162

Исследование динамики адсорбции многокомпонентных сточных вод угольных предприятий сорбентами различной природы

Л.А. Иванова✉, И.В. Тимощук, П.П. Иванов, А.К. Горелкина
Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Российская Федерация
✉ lyuda_ivan@mail.ru

Резюме: В работе исследована динамика процесса адсорбции ионов Fe^{3+}, Mn^{2+}, SO_4^{2-}, NO^{2-} при их совместном присутствии в карьерных сточных водах на сорбентах различной природы. В случае моделируемой смеси катионов и анионов в растворе можно отметить, что для сорбентов марок КАУ, АС и ОДМ-2Ф присутствие в растворе ионов железа снижает адсорбцию ионов марганца. Для сорбентов марки Пуролат-стандарт, СКД-515 наблюдается взаимное увеличение сорбционной способности для ионов железа и марганца. Совместное присутствие катионов и анионов увеличивает степень очистки от сульфат-ионов для сорбентов Пуролат-стандарт, КАУ, АС, ОДМ-2Ф в сравнении с адсорбцией индивидуального вещества в растворе. Динамическая емкость сорбентов по сульфат-ионам ниже в сравнении с ионами железа в 3–6 раз, что позволяет предложить предварительно использовать на очистных сооружениях реагентную обработку сточных вод от сульфат- и нитрит-ионов с последующим отстаиванием в отстойниках-флокуляторах и фильтрацию на фильтрах с песчаной загрузкой. В случае адсорбции ионов из модельной смеси наблюдается увеличение степени очистки по нитрит-ионам для сорбентов марки КАУ, АС СКД-515.
Проведённый анализ позволил сделать вывод, что каждый сорбент, используемый для очистки сточных вод, представляющих собой смеси анионов и катионов, не является полностью предпочтительным, что, в свою очередь, требует формирования комплексной загрузки из сорбентов различной природы.

Ключевые слова: адсорбция, сорбенты, активные угли, железо, марганец, сульфат-ионы, нитрит-ионы, сточные воды

Благодарности: Исследование выполнено в рамках комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения», утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации от 11.05.2022 г. №1144-р, при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, № соглашения 075-15–2022- 1201 от 30.09.2022 г.

Для цитирования: Иванова Л.А., Тимощук И.В., Иванов П.П., Горелкина А.К. Исследование динамики адсорбции многокомпонентных сточных вод угольных предприятий сорбентами различной природы. *Горная промышленность.* 2025;(6):157–162. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-6-157-162

Research into adsorption dynamics of multi-component drain water from coal operations using sorbing agents of various kinds

L.A. Ivanova ✉, I.V. Timoshchuk, P.P. Ivanov, A.K. Gorelkina
Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation
✉ lyuda_ivan@mail.ru

Abstract: This paper investigates the dynamics of Fe^{3+}, Mn^{2+}, SO_4^{2-}, NO^{2-} ion adsorption using sorbing agents of various kinds when a combination of these ions is present in mine drain water. In the case of a simulated mixture of cations and anions in the solution, it can be noted that for sorbing agents of the KAU, AS and ODM-2F brands, the presence of iron ions in the solution reduces the adsorption of manganese ions. For sorbing agents of the Purolat-Standard and SKD-515 brands, a mutual increase in the sorption capacity for iron and manganese ions is observed. Joint presence of cations and anions increases the degree of purification from sulphate ions for the Purolat-Standard, KAU, AS, and ODM-2F sorbing agents as compared to adsorption of individual substances in the solution. The dynamic capacity of the sorbing agents for sulphate ions is 3–6 times lower than that for the iron ions, which makes it possible to propose pre-treatment of the drain water to remove sulphate and nitrite ions, followed by settling in the flocculant settling tanks and filtration through sand filters. In the case of ion adsorption from a model mixture, an increase in the degree of purification for nitrite ions is observed for sorbing agents of the KAU and AS SKD-515 brands. The analysis allowed us to conclude that neither sorbing agent used for the purification of the drain water, which is a mixture of anions and cations, is entirely preferable, which in turn requires formation of a complex mixture of various kinds of sorbing agents.

Keywords: adsorption, sorbing agents, activated carbon, iron, manganese, sulphate ions, nitrite ions, wastewater

Acknowledgments: The research is conducted as part of the comprehensive scientific and technical program of a complete innovative cycle "Development and implementation of a complex of technologies in the fields of exploration and extraction of minerals, ensuring of industrial safety, bioremediation, creation of new products of deep processing of coal raw materials with consecutive amelioration of ecological impact on the environment and risks to human life", approved by the Decree of the Government of the Russian Federation from 11.05.2022 No. 1144-r, agreement No. 075-15-2022- 1201 dated 30.09.2022

For citation: Ivanova L.A., Timoshchuk I.V., Ivanov P.P., Gorelkina A.K. Research into adsorption dynamics of multi-component drain water from coal operations using sorbing agents of various kinds. *Russian Mining Industry.* 2025;(6):157–162. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-6-157-162

Введение

Сточные воды угольных предприятий характеризуются наличием таких токсических загрязнителей, как тяжёлые металлы (железо, марганец, цинк), сульфаты, нитрат- и нитрит-ионы, фенолы, нефтепродукты и др. Эти загрязнители представляют потенциальную угрозу для окружающей среды, если формирующиеся сточные воды сбрасываются без надлежащей очистки. Мониторинговый анализ качества сбрасываемых сточных вод угольных разрезов показал, что количественное содержание в них ионов SO_4^{2-}, NO^{2-}, Fe^{3+}, Mn^{2+} превышает нормативные значения, а также характеризуется значительной неравномерностью в течение года, максимальный пик наблюдается в период май–июль. Превышение ПДК по содержанию ионов железа связано с геохимическими особенностями водовмещающих пород, нарушаемых в технологическом процессе угледобычи, а также широким использованием стальных трубопроводов для межоперационного перемещения сточных вод, содержание сульфат-ионов на выпуске в реку возможно связано с вымыванием данного иона из окружающих горных массивов. Увеличенное содержание ионов магния, нитритов, аммония в отстойниках зависит от интенсивности и длительности использования на эксплуатационном участке техники, горюче-смазочных материалов, а также применения взрывчатых веществ и химических соединений, используемых при добыче углей. Таким образом, поиск технологий глубокой доочистки сточных вод является актуальной и востребованной задачей не только для угледобывающих предприятий, но и для горнодобывающей отрасли в целом.

Вопрос эффективной очистки сточных вод остается открытым для большинства стран, поскольку каждое угледобывающее предприятие характеризуется своей внутренней и внешней средой, под которой понимаем горно-геологические особенности участка, используемую технологию добычи угля, метеорологические и климатические особенности региона угледобычи и др. Поэтому до сих пор не существует универсального решения для всех случаев. Современные технологии способны обеспечить практически любое требуемое качество очищенной воды. Однако стоимость очистки возрастает пропорционально степени ее очистки, что делает задачу поиска экономически обоснованного подхода особенно актуальной. При анализе методов очистки, включая как уже используемые, так и перспективные научные и технологические разработки, необходимо подбирать оптимальные решения, соответствующие принципу разумного баланса. Наиболее экономически целесообразным и эффективным методом доочистки природных и сточных вод от ряда загрязнителей является адсорбция. Выбор типа адсорбента играет существенную роль в эффективности проведения процесса.

Целью работы является оценка эффективности очистки сточных вод угольных карьеров от ионов SO_4^{2-}, NO^{2-}, Fe^{3+}, Mn^{2+} методом адсорбции и выбор наиболее подходящего сорбента.

Материалы и методы

Для оценки степени очистки сточных вод угледобывающих предприятий с моделируемым составом загрязнителей в динамических условиях использовали лабораторную установку [1]. Состав модельной системы: вода – железо (50 ПДК) – марганец (20 ПДК) – сульфаты (10 ПДК) – нитриты (10 ПДК).

Модельный раствор пропускали через лабораторную установку, имеющую высоту фильтрующего слоя загрузки – 0,15 м, диаметр – 0,05 м. Колонка заполнялась сорбентами различной природы. Сорбент предварительно отмыли дистиллированной водой при комнатной температуре, высушили до воздушно-сыпучего состояния. Скорость подачи раствора в фильтрующую колонку составляла 1 дм^3/мин. Оптимальные параметры работы лабораторной установки были предварительно исследованы, результаты приведены в работе [1]. Весь собранный фильтрат был проанализирован на определение ионов SO_4^{2-}, NO^{2-}, Fe^{3+}, Mn^{2+} [2].

Определение железа в водных растворах проводили согласно стандартной методике спектрофотометрическим методом, основанным на образовании окрашенных комплексов железа с сульфосалициловой кислотой (ГОСТ

Таблица 1
Характеристики адсорбентов

Table 1
Adsorbing agent characteristics

Марка АУ	СКД-515	Пуролат-стандарт	КАУ	ОДМ-2Ф	АС
Производитель	ОАО «Сорбент», г. Пермь	ОАО «Синтез», г. Ростов-на-Дону	ООО «Карбон», Владимирская область	ООО «ТД ОКПУР», г. Екатеринбург	ООО «АЛСИС», г. Екатеринбург
Сырьё	Смесь каменных углей марок К и Д, коксо-химическая смола	Антрацит	Скорлупа кокосовых орехов	Опок	Алюмосиликат
Карбонизация и активация	Карбонизация и активация	Одностадийная, парогазовая	Двустадийная, парогазовая	-	-
Прочность, %	75	90–95	98	99,9	99,94
Размер частиц, мм	0,5–1,5	0,1–3	0,4–1,7	0,3–1,5	0,7–1,4
Зольность, %	–	5	< 6	–	–
Насыпная плотность, г/см^3	0,52	0,7–0,9	0,49	0,68–0,72	0,46–0,49
Влагоемкость, %	95	90	92	80–95	–
Суммарный объём пор по воде, см^3/г	0,62	0,500	0,951	–	–
Удельная поверхность пор (SБЭТ), м^2/г	791	311	1512	120-180	–
Объем пор, см^3/г: микро- мезо- макро	0,36 0,20 0,06	0,070 0,000 0,430	0,622 0,110 0,219	– – –	– – –

4011–72)[1]. Содержание ионов марганца определялось по реакции образования окрашенного соединения с формальдоксимом в щелочной среде (РД 52.24.467-2008). Нитрит-ионы измеряли потенциометрическим методом с применением нитрит-селективного электрода (РД 52.24.367- 2010), содержание сульфат-ионов в воде определяли на жидкостном хроматографе «Стайер М».

Характеристика объектов

Для выбора наиболее эффективного адсорбента для очистки карьерных сточных вод угольных предприятий от приоритетных загрязнителей (Fe^{3+}, Mn^{2+}, $SO_4$2–, NO^{2-}) [3] в качестве объектов исследования были выбраны сорбционные материалы разного химического состава (табл. 1):

– сорбент ОДМ-2Ф – на основе осадочной горной породы опоки, состоящей из залежей диатомитовых водорослей и простейших;

– сорбент АС – на основе алюмосиликата;

– СКД-515 – на основе каменного угля с использованием двухступенчатой термической обработки / активации;

– КАУ – на основе скорлупы кокосовых орехов путем ее дробления с последующим рассевом;

– Пуролат-стандарт – на основе угля марки антрацит с использованием одностадийного процесса карбонизации/ активации воздухом.

1 ПНД Ф 14.1:2:4.50-96 Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовой концентрации общего железа в питьевых, природных и сточных водах фотометрическим методом с сульфосалициловой кислотой. Введ. 2004-01-01. М.: ФЦАО; 2011. 19 с.; ГОСТ 4011-72 Вода питьевая. Методы измерения массовой концентрации общего железа. Введ. 1974-01-01. М.: Стандартинформ; 2010. 12 с.

Результаты и их обсуждение

Изучение процесса динамики извлечения анализируемых загрязнителей сорбентами различной природы имеет большое практическое значение для выбора наиболее эффективного адсорбента и параметров очистки, а также конструктивных характеристик предлагаемой адсорбционной колонны [4]. Для выбора наилучшего варианта сорбционной загрузки собрали лабораторную установку, через которую пропускали модельную смесь сточных вод, состоящую из ионов Fe^{3+}, Mn^{2+}, SO_4^{2-}, NO2–, а также монорастворы исследуемых индивидуальных ионов. Степень очистки модельных растворов после пропускания 50 дм^3 раствора приведена в табл. 2.

Экспериментальные данные показали, что все исследуемые сорбенты имеют высокую степень очистки воды от ионов железа из монорастворов, для очистки от ионов марганца из монорастворов лучшую сорбционную способность показали сорбенты марок АС и ОДМ-2Ф, в сравнении с катионами сульфат- и нитрит-ионы показывают значительно меньшую степень очистки.

В случае моделируемой смеси катионов и анионов в растворе можно отметить, что присутствие в растворе ионов железа снижает адсорбцию ионов марганца из смеси для сорбентов марок КАУ, АС и ОДМ-2Ф по сравнению с раствором индивидуального компонента, адсорбция железа при этом на КАУ возрастает, а в случае АС и ОДМ-2Ф снижается [5–8]. Для сорбентов марки Пуролат-стандарт, СКД-515 наблюдается взаимное увеличение сорбционной способности для ионов железа и марганца. Совместное присутствие катионов и анионов увеличивает степень очистки от сульфат-ионов для сорбентов Пуролат-стандарт в 3,8 раза,

Таблица 2
Степень очистки сточных вод, %

Table 2
Efficiency of the drain water purification, %

Сорбент	Fe^{3+}		Mn^{2+}		SO_4^{2-}		NO^{2-}	
	Монораствор	Моделируемая смесь	Монораствор	Моделируемая смесь	Монораствор	Моделируемая смесь	Монораствор	Моделируемая смесь
Пуролат-стандарт	87	90	29	58	6	23	32	12
КАУ	94	100	55	49	5	11	32	68
АС	94	55	100	86	4	12	6	20
ОДМ-2Ф	90	87	93	73	9	16	37	30
СКД-515	85	90	32	65	14	10	4	58

КАУ – в 2 раза, АС – в 3 раза, ОДМ-2Ф – в 1,8 раз в сравнении с адсорбцией индивидуального вещества в растворе. В случае адсорбции ионов из модельной смеси наблюдается увеличение степени очистки по нитрит-ионам для сорбентов марки КАУ – в 2,1 раза, АС – в 3,3 раз и СКД-515 – в 14 раз.

Определение проскока и точки насыщения (концентрация ионов в фильтрате составляет 99% от исходной) с помощью выходных кривых адсорбции поможет определить время работы колонны до регенерации сорбционного слоя или его обновления [1]. На рис. 1–5 представлены выходные кривые, характеризующие зависимость времени работы фильтрующего слоя адсорбционной колонны до проскока ионов железа, марганца, сульфатов и нитратов из модельного раствора в фильтрат.

Представление процесса адсорбции модельной смеси

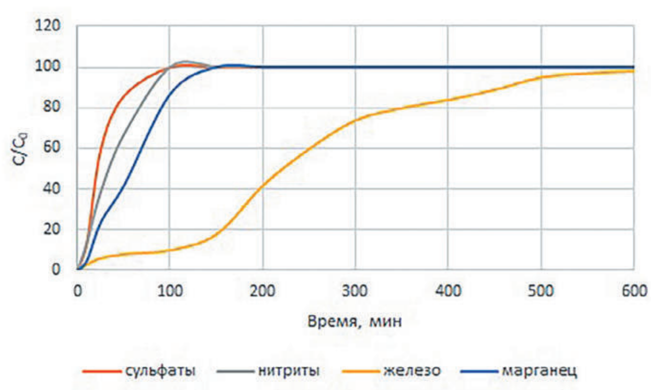

Рис. 1
Выходные кривые динамики адсорбции ионов из модельной смеси на сорбенте Пуролат-стандарт

Fig. 1
Elution curves of the ion adsorption dynamics from a model mixture using the Purolate-standard sorbing agent

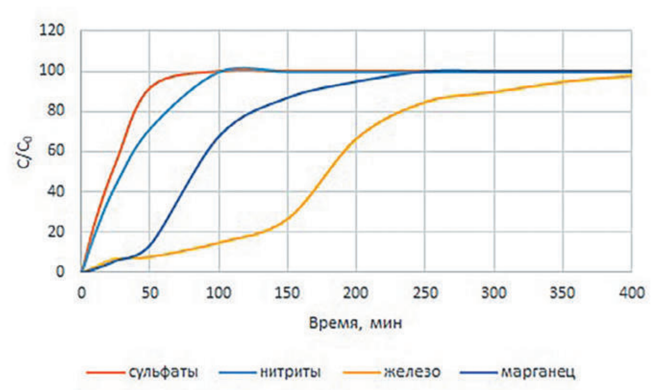

Рис. 3
Выходные кривые динамики адсорбции ионов из модельной смеси на сорбенте АС

Fig. 3
Elution curves of the ion adsorption dynamics from a model mixture using the AC sorbing agent

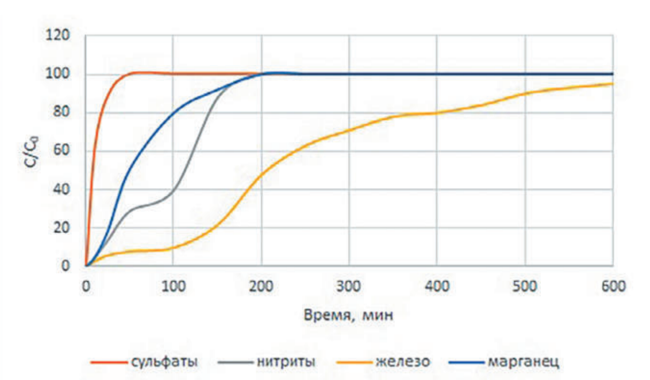

Рис. 2
Выходные кривые динамики адсорбции ионов из модельной смеси на сорбенте КАУ

Fig. 2
Elution curves of the ion adsorption dynamics from a model mixture using the КАУ sorbing agent

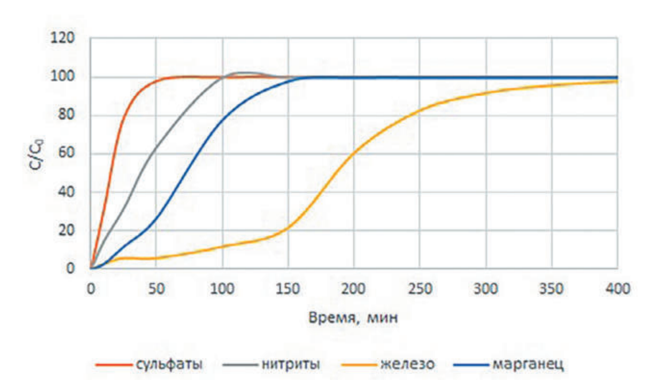

Рис. 4
Выходные кривые динамики адсорбции ионов из модельной смеси на сорбенте ОДМ-2Ф

Fig. 4
Elution curves of the ion adsorption dynamics from a model mixture using the ODM-2F sorbing agent

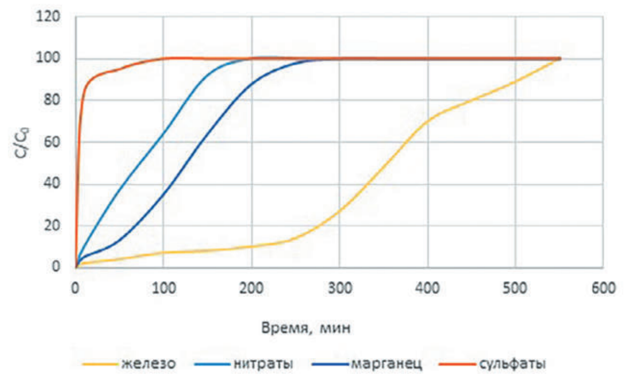

Рис. 5
Выходные кривые динамики адсорбции ионов из модельной смеси на сорбенте СКД-515

Fig. 5
Elution curves of the ion adsorption dynamics from a model mixture using the SKD-515 sorbing agent

в динамических условиях в виде выходных кривых позволяет сделать вывод, что время проскока у всех рассматриваемых сорбентов по иону железа больше от 2–6 раз в сравнении с другими ионами, хуже всего по времени появления проскока сорбируются сульфат-ионы. Сопоставляя полученные выходные кривые, можно расположить исследуемые сорбенты по увеличению времени работы колонны до проскока из моделируемой смеси в ряд:

$Fe^{3}+$: КАУ > Пуролат-стандарт > СКД-515 > ОДМ-2Ф > АС;
Mn^{2+}: АС > ОДМ-2Ф > СКД-515 > Пуролат-стандарт > КАУ;
SO_4^{2-}: Пуролат-стандарт > АС > СКД-515 > КАУ > ОДМ-2Ф;
NO_2^{--}: КАУ > СКД-515 > ОДМ-2Ф > АС > Пуролат-стандарт.

Таким образом, для достижения оптимального результата по извлечению ионов из модельной смеси рекомендуем использовать сорбент марки Пуролат – стандарт, СКД-515 и КАУ. Для достижения наилучшего результата по степени извлечения из сточных вод смеси ионов целесообразно рекомендовать комбинировать сорбционную загрузку или использовать последовательно батарею из адсорбционных колонн, заполняя их сорбентами различной природы.

Заключение

Изучение сорбционных свойств исследованных сорбентов в динамических условиях свидетельствует об их высокой адсорбционной емкости из модельной смеси по отношению к железу и позволяет расположить их по эффективности извлечения в ряд: КАУ > Пуролат-стандарт > СКД-515 > ОДМ-2Ф > АС, что связано с различной структурой исследуемых сорбентов. Динамическая емкость сорбентов по сульфат-ионам ниже в сравнении с ионами железа в 3–6 раз, что позволяет предложить предварительно использовать на очистных сооружениях реагентную обработку сточных вод от сульфат- и нитрит-ионов с последующим отстаиванием в отстойниках-флокуляторах, фильтрацию на фильтрах с песчаной загрузкой. Из вышепроведённого анализа можно сделать вывод, что каждый сорбент, используемый для очистки сточных вод, представляющих собой смеси анионов и катионов, не является полностью предпочтительным, что, в свою очередь, требует формирования комплексной загрузки из разных сорбентов.

Список литературы / References

1. Иванова Л.А., Тимощук И.В., Горелкина А.К., Михайлова Е.С., Голубева Н.С., Неверов Е.Н., Утробина Т.А. Выбор сорбента для элиминации ионов железа из сточных и природных вод. *Техника и технология пищевых производств.* 2024;54(2):398–411. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-2-2516
   Ivanova L.A., Timoshchuk I.V., Gorelkina A.K., Mikhaylova E.S., Golubeva N.S., Neverov E.N., Utrobina T.A. Removing excess iron from sewage and natural waters: Selecting optimal sorbent. *Food Processing: Techniques and Technology.* 2024;54(2):398–411. (In Russ.) https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-2-2516

2. Иванова Л.А., Голубева Н.С., Тимощук И.В., Горелкина А.К., Просеков А.Ю., Сапурин З.П., Медведев А.В. Оценка эффективности очистки сточных вод угледобывающего предприятия и ее влияние на загрязнение малых рек. *Экология и промышленность России.* 2023;27(1):60–65. https://doi.org/10.18412/1816-0395-2023-1-60-65
   Ivanova L.A., Golubeva N.S., Timoshchuk I.V., Gorelkina A.K., Prosekov A.Yu., Sapurin Z.P., Medvedev A.V. Evaluation of the Efficiency of Wastewater Treatment of a Coal Mining Enterprise and its Impact on the Pollution of Small Rivers. *Ecology and Industry of Russia.* 2023;27(1):60–65. (In Russ.) https://doi.org/10.18412/1816-0395-2023-1-60-65

3. Просеков А.Ю., Тимощук И.В., Горелкина А.К., Михайлова Е.С., Голубева Н.С., Иванова Л.А. Сравнительная оценка содержания загрязняющих примесей в карьерных сточных водах угольных предприятий Кузбасса. *Уголь.* 2023;(4):69–73. https://doi.org/10.18796/0041-5790-2023-4-69-73
   Prosekov A.Yu., Timoshchuk I.V., Gorekina A.K., Mikhaylova E.S., Golubeva N.S., Ivanova L.A. Comparative assessment of the content of pollutants in quarry wastewater of Kuzbass coal enterprises. *Ugol'.* 2023;(4):69–73. (In Russ.) https://doi.org/10.18796/0041-5790-2023-4-69-73

4. Ларин А.В. Новые закономерности в линейной динамике адсорбции. *Физикохимия поверхности и защита материалов.* 2020;56(5):467–470. https://doi.org/10.31857/S0044185620050186
   Larin A.V. New regulations in linear dynamics of adsorption. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces.* 2020;56(5):882–885. https://doi.org/10.1134/S2070205120050184

5. Асякина Л.К., Дышлюк Л.С., Просеков А.Ю. Мировой опыт в области рекультивации посттехногенных ландшафтов. *Техника и технология пищевых производств*. 2021;51(4):805–818. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021- 4-805-818
Asyakina L.K., Dyshlyuk L.S., Prosekov A.Yu. Reclamation of post-technological landscapes: International experience. *Food Processing: Techniques and Technology.* 2021;51(4):805–818. (In Russ.) https://doi.org/10.21603/2074- 9414-2021-4-805-818

6. Исмагилов З.Р., Созинов С.А., Попова А.Н., Запорин В.П. Комплексное исследование игольчатых коксов методами рентгеноструктурного анализа и сканирующей электронной микроскопии. *Кокс и химия*. 2019;(4):10–18.
Ismagilov Z.R., Sozinov S.A., Popova A.N., Zaporin V.P. Structural analysis of needle coke. *Coke and Chemistry*. 2019;62(4):135–142. https://doi.org/10.3103/S1068364X19040021

7. Свешникова Д.А., Гафуров М.М., Шабанова З.Э., Асваров А.Ш., Рамазанов А.Ш., Юсупова А.А., Алиева Н.А. Адсорбция сульфат-ионов на активированных углях. *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология*. 2009;52(4):38–41.
Sveshnikova D.A., Gafurov M.M., Shabanova Z.E., Asvarov A.Sh., Ramazanov A.Sh., Yusupova A.A., Alieva N.A. Adsorption of sulfate ions on activated carbons. *ChemChemTech.* 2009;52(4):38–41. (In Russ.)

8. Глушанкова И.С., Калинина Е.В., Демина Е.Н. Модифицированные сорбенты на основе шлама содового производства для извлечения ионов тяжёлых металлов из водных растворов и сточных вод. *Теоретическая и прикладная экология*. 2018;(3):100–108. https://doi.org/10.25750/1995-4301-2018-3-100-108
Glushankova I.S., Kalinina E.V., Demina E.N. Modified sorbents based on soda production sludge for extracting ions of heavy metals from aqueous solutions waste water. *Theoretical and Applied Ecology*. 2018;(3):100–108. (In Russ.) https://doi.org/10.25750/1995-4301-2018-3-100-108

Информация об авторах
Иванова Людмила Анатольевна – кандидат технических наук, доцент кафедры техносферной безопасности, Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0002-4103-8780; e-mail: lyuda_ivan@mail.ru
Тимощук Ирина Вадимовна – доктор технических наук, профессор кафедры техносферной безопасности, Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0002-1349-2812; e-mail: irina_190978@mail.ru
Иванов Павел Петрович – кандидат технических наук, доцент кафедры мехатроники и автоматизация технологических систем, Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0002-8086-3273; e-mail: ipp7@yandex.ru
Горелкина Алена Константиновна – доктор технических наук, профессор кафедры техносферной безопасности, Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0002-3782-2521; e-mail: alengora@yandex.ru

Информация о статье
Поступила в редакцию: 02.09.2025
Поступила после рецензирования: 23.10.2025
Принята к публикации: 27.10.2025

Information about the authors
Ludmila A. Ivanova – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Technosphere Safety, Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-4103-8780; e-mail: lyuda_ivan@mail.ru
Irina V. Timoshchuk – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Technosphere Safety, Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-1349-2812; e-mail: irina_190978@mail.ru
Pavel P. Ivanov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Mechatronics and Automation of Technological Systems, Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-8086-3273; e-mail: ipp7@yandex.ru
Alena K. Gorelkina – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Technosphere Safety, Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-3782-2521; e-mail: alengora@yandex.ru

Article info
Received: 02.09.2025
Revised: 23.10.2025
Accepted: 27.10.2025