

ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ ОТ ФЕНОЛОВ

Т.А. Панфилова^{1,2}, В.А. Кукарцев¹, В.С. Тынченко^{1,2,3}, А.С. Михалев¹, Сяоган Ву⁴

¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия, e-mail: vadimond@mail.ru

² МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

³ Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнёва,
Красноярск, Россия,

⁴ Хэбэйский технологический университет, Тяньцзинь, Китай

Аннотация: Одной из важных проблем, с которой сталкиваются предприятия горной промышленности, является загрязнение сточных вод фенолами. Рассмотрен метод адсорбционной очистки, в качестве сорбционного материала используется шлам. Исследованы сорбционные свойства шлама химической водоподготовки. Получены сорбционные материалы, в том числе порошкообразный и гранулированный варианты. Определены технологические характеристики порошкового материала и детализирован механизм адсорбции фенола. Предложена общая схема и последовательность операций по очистке сточных вод горнодобывающих предприятий от фенолов. Рассмотрена возможность утилизации продуктов очистки. Показано, что это последовательный ступенчатый процесс, состоящий из нескольких операций. В результате такого процесса получается гранулированный модифицированный карбонатный шлам. Этот карбонатный шлам пригоден в качестве энергетического ресурса для водогрейных котлов и их аналогов. Показано, что проникающие в поры сорбента молекулы обладают энергией активации, величина которой определяется графически решением уравнения Аррениуса. Описаны возможности получения гранулированного сорбента – карбонатного шлама с различной величиной пор. Определен класс опасности отходов очистки и показана возможность снижения техногенной нагрузки на экосистемы окружающей среды за счет вовлечения использованного шлама в процесс водоочистки с последующим сжиганием.

Ключевые слова: сточные воды, очистка, адсорбция, фенолы, карбонатный шлам, технологическая схема, утилизация, отходы, окружающая среда.

Для цитирования: Панфилова Т. А., Кукарцев В. А., Тынченко В. С., Михалев А. С., Сяоган Ву Очистка сточных вод горнопромышленных предприятий от фенолов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 7-1. – С. 72–82. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_71_0_72.

Treatment of wastewater from mining industrial enterprises from phenols

T.A. Panfilova^{1,2}, V.A. Kukartsev¹, V.S. Tynchenko^{1,2,3}, A.S. Mikhalev¹, Xiaogang Wu⁴

¹ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia, e-mail: vadimond@mail.ru

² Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

³ Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia

⁴ Hebei University of Technology, Tianjin, China

Abstract: One of the important problems faced by mining enterprises is the contamination of wastewater with phenols. The article discusses the adsorption purification method and uses sludge as a sorption material. The sorption properties of chemical water treatment sludge have been studied. Sorption materials were obtained, including powdered and granular versions. The technological characteristics of the powder material are determined and the mechanism of phenol adsorption is detailed. An analysis of the economic and operational efficiency of the proposed scheme was carried out. The possibility of disposal of cleaning products has been considered. The work shows that this is a sequential step process consisting of several operations. The result of this process is granular modified carbonate slurry. This carbonate sludge is suitable as an energy resource for hot water boilers and their analogues. It is shown that molecules penetrating into the pores of the sorbent have an activation energy, the value of which is determined graphically by solving the Arrhenius equation. The hazard class of waste treatment has been determined and the possibility of reducing the technogenic load on environmental ecosystems by involving used sludge in the water treatment process with subsequent combustion has been shown.

Key words: wastewater, treatment, adsorption, phenols, carbonate sludge, technological scheme, recycling, waste, environment.

For citation: Panfilova T. A., Kukartsev V. A., Tynchenko V. S., Mikhalev A. S., Xiaogang Wu Treatment of wastewater from mining industrial enterprises from phenols. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(7-1):72-82. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_71_0_72.

Введение

Горная промышленность как одна из наиболее развивающихся отраслей промышленности обладает значительным влиянием на окружающую среду. Одной из основных проблем, с которой сталкиваются предприятия горной промышленности, является загрязнение сточных вод фенолами. Отходы деятельности горнодобывающих предприятий являются источниками загрязнения окружающей среды фенолами, которые относятся к группе II по степени опасности [1, 2]. Фенолы являются химическими веществами, широко применяемыми в процессах переработки руд и других природных ресурсов. Однако они обладают токсическими свойствами и могут нанести серьезный вред окружающей среде и человеческому здоровью [3, 4]. Выпуск фенолов в сточные воды предприятий горной промышленности может привести к загрязнению водных ресурсов, от-

равлению рыб и других водных организмов, а также к загрязнению почвы и воздуха. Кроме того, фенолы могут накапливаться в организмах животных и растений, вызывая дальнейшие экологические проблемы [5].

Для уменьшения загрязнения сточных вод фенолами предприятия горной промышленности должны соблюдать строгие экологические стандарты, использовать современные технологии очистки сточных вод и контролировать выбросы вредных веществ в окружающую среду. Также важно проводить мониторинг качества воды в водоемах и принимать меры по устранению загрязнений в случае их обнаружения.

Эффективная очистка сточных вод, выпускаемых предприятиями горной промышленности, является критически важной мерой для минимизации негативного воздействия на окружающую среду [6]. Фенолы, которые часто встре-

чаются в отходах производства горнодобывающих предприятий, являются сильными токсинами и имеют вредные последствия для водных экосистем и живых организмов. Очистка сточных вод от фенолов требует разработки специальных методов и технологий, способных эффективно улавливать и разлагать эти вредные соединения, прежде чем они попадут в водные источники [7–9]. Для очистки сточных вод чаще всего применяется метод адсорбционной очистки [10–13].

Объектом исследования являются сточные воды, образующиеся при работе горнодобывающих предприятий. Разработка эффективных технологий очистки сточных вод является актуальной задачей, имеющей важное научно-практическое значение.

Материалы и методы

Очистку содержащих фенолы сточных вод методом адсорбции осуществляют с использованием вместо обычного сорбционного материала модифицированного карбонатного шлама, образу-

ющегося в процессе предварительной очистки природной воды для горнодобывающих предприятий. Карбонатных шлам брали из отходов работы систем химической водоочистки тепловых электростанций. Этот шлам после высушивания превращается в порошок с мелкодисперсной структурой [14–17]. Исследуемый диапазон изменения размера частиц составляет 0,05... 0,09 мм.

Определенный в ходе рентгенографического анализа прибором P8 ADVANCE состав карбонатного шлама (Bruker, США) включает кальцит (75%), брусит (4%) и другие вещества (14%) [18–20]. В шламе содержится до 9% органических веществ, состав которых определен на хромато-масс-спектрометре (DFSThermoFisherSci.Co, США).

Рентгенографический анализ и другие виды анализа проводились по аттестованным методикам на сертифицированном оборудовании: Флюорат-02, P8 ADVANCE, UNICO 1000, Thermo FisherSci.Co, Хроматэк-Кристалл 5000, МетЭксперт.

Таблица 1

Характеристика карбонатного шлама Characteristics of carbonate sludge

№	Показатели	Единицы	Значение
1	Насыпная плотность	кг /м ³	512
2	Влажность	%	3,2
3	Влагоемкость	%	64
4	Зольность	%	83
5	Гранулометрический состав, мм 1,4 1,4–1,0 0,5–1,0 0,09–0,5 0,09	%	33 ≤7 8,2 57,3 ≤7,4
6	Органические вещества	%	8,8
7	Водопоглощение	%	56
8	Суммарный объем пор	см ³ /г	0,28
9	pH	—	7

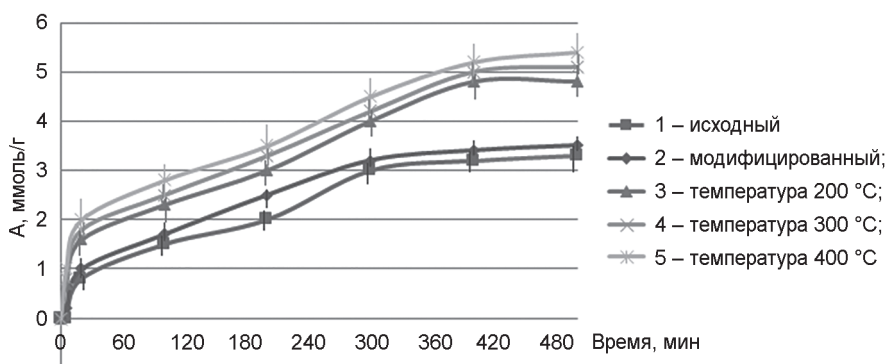


Рис. 1. Зависимость сорбционной емкости шлама от времени термообработки по отношению к фенолу
 Fig. 1. Dependence of the sorption capacity on the time of sludge in relation to phenol

Эксперименты

Технологические данные карбонатного шлама сведены в табл. 1.

Карбонатный шлам характеризуется высокой гидрофильностью и низкой смачиваемостью, поэтому целесообразна обработка жидкостью «Силор» [10].

Для получения сорбционного материала используется жидкое натриевое стекло [11].

Результаты и обсуждение

Результаты термообработки карбонатного шлама отражены на графиках (рис. 1, 2). При термической обработке образуются поры различного объема (рис. 2). На основе карбонатного шлама получен сорбционный материал, сорб-

ционная емкость которого по отношению к фенолу характеризуется изотермой адсорбции (рис. 3).

Графики адсорбции фенола из растворов представлены на рис. 4.

Параметры адсорбции фенола сведены в табл. 2.

Кинетика адсорбции фенола ПрМКШ представлена на рис. 5.

Сведения о скорости адсорбции в зависимости от температуры фенола сведены в табл. 3.

Для неактивированной адсорбции характерно уменьшение константы скорости адсорбции фенола с повышением температуры. Проникающие в поры сорбента молекулы обладают энергией активации, величина которой определя-

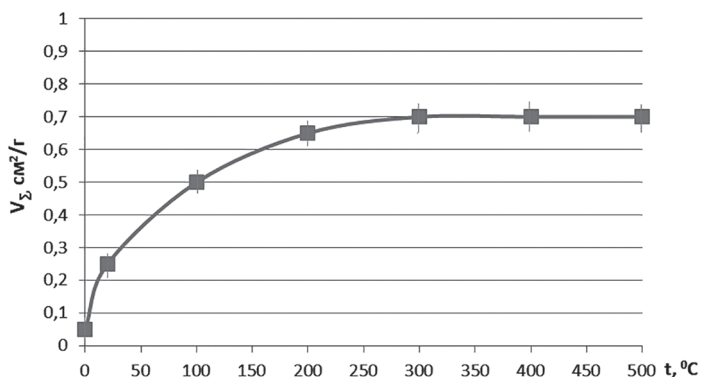


Рис. 2. Зависимость доли пор шлама от температуры
 Fig. 2. Dependence of the proportion of sludge pores on temperature

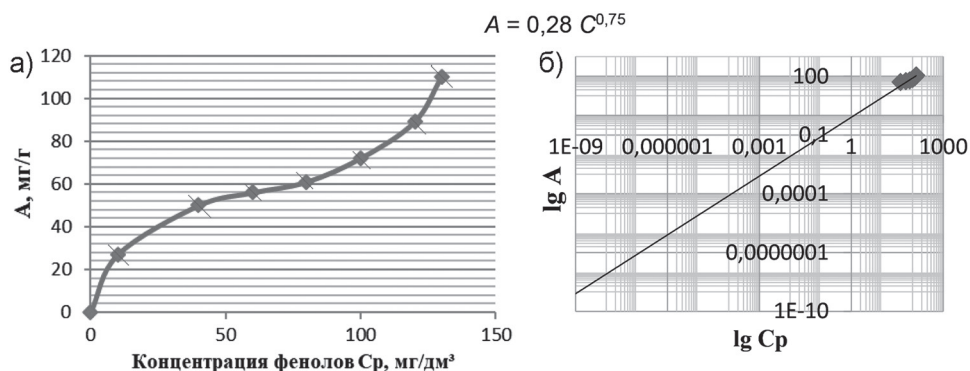


Рис. 3. Адсорбция фенола в линейных (а) и логарифмических (б) координатах
 Fig. 3. Adsorption of phenol in linear (a) and logarithmic coordinates (b)

ется графически решением уравнения Аррениуса и иллюстрируется графиком на рис. 6.

Обработкой с добавкой жидкого стекла и водной эмульсии «Силор» получен гранулированный материал (см. табл. 4). Динамическая и полная сорб-

ционная емкость гранул представлена в табл. 5. Общая схема и последовательность операций очистки стоков от фенолов при производительности $120 \text{ м}^3/\text{ч}$ показана на рис. 7.

Очистка в смесителе позволяет извлечь 96% фенола, а в адсорбционном

Таблица 2

Параметры адсорбции фенолов
Phenol adsorption parameters

Дифференциальная теплота, кДж/моль	Адсорбционная способность, $A \cdot 10^{-5}$, моль/г	Температура, К
10,25	1,1	293
4,66	1,4	313
3,80	2,1	323
0,14	2,6	333

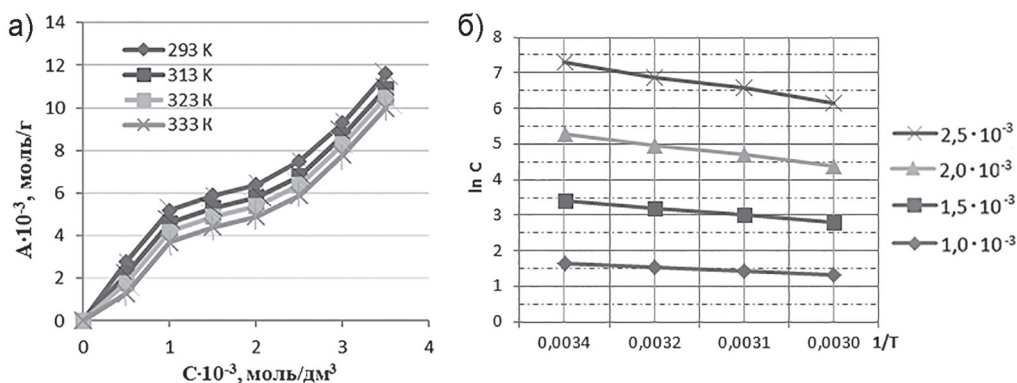


Рис. 4. Изотермы (а) и изостеры (б) адсорбции фенола
 Fig. 4. Isotherms (a) and isosters (b) of phenol adsorption

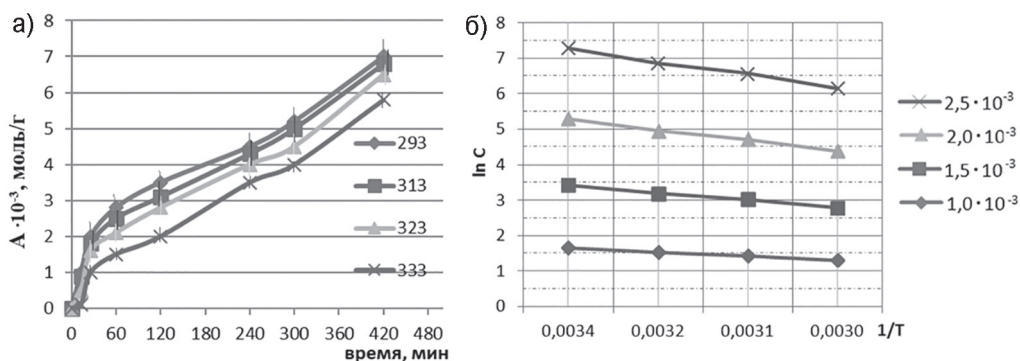


Рис. 5. Зависимость параметров адсорбции фенола от температуры (линейный вид (а) и логарифмический вид (б))

Fig. 5. Dependence of phenol adsorption parameters on temperature (linear form (a) and logarithmic form (b))

Таблица 3

Зависимость скорости адсорбции от температуры

Dependence of adsorption rate on temperature

Температура, К	$K \cdot 10^3, c^{-1}$
293	0,37
313	0,34
323	0,35
333	0,32

фильтре — 99,2%. До 99,3% фенола извлекается при соотношении эфир : вода — 1:3. Расход циркулирующего в системе фенола составляет 1%. Таким образом, эти результаты показали, что использование карбонатного шлама в качестве адсорбен-

та для очистки сточных вод от фенолов дает хорошие результаты. Это позволяет почти полностью удалить фенолы из сточных вод. При этом встает следующий вопрос — утилизация этого отработанного сорбента (карбонатного шлама).

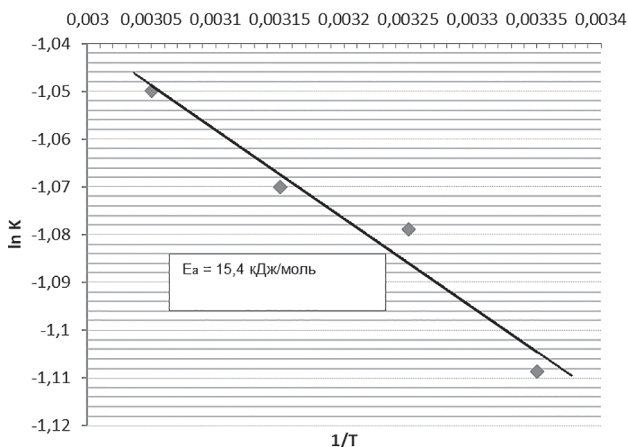


Рис. 6. График активизации процесса адсорбции

Fig. 6. Adsorption process activation schedule

Таблица 4

Характеристика гранул
Characteristics of granules

Характеристика	Значение
Средний размер гранул, мм	0,5–2,5
Насыпная плотность полученного материала, кг/м ³	676
Влажность, %	2,82
Водопоглощение, %	1,24
Зольность, %	80

Таблица 5

Значение сорбционной емкости
Sorption capacity value

Показатель	Значение показателя, мг/г	Объем воды пропущенной через материал, дм ³
Динамическая емкость	4,7	174,3
Полная емкость	6,8	250,5

Процесс утилизации карбонатного шлама — это последовательный ступенчатый процесс. Данный процесс состоит из операции прокаливания и гранулирования. Также здесь идет пропитка жидкостью «Силор» и последующая сушка гранул фильтрующего материала. Гранулированный модифицированный кар-

бонатный шлам пригоден в качестве энергетического ресурса для водогрейных котлов и их аналогов.

Состав сорбционного материала: углерод $C^p = 39,8\%$, сера $S^p = 0,2\%$, водород $H^p = 11,6\%$, кислород $O^p = 18,7\%$, азот $N^p = 0,1\%$, зольность $A^p = 27,1\%$, влажность $W^p = 2,5\%$.

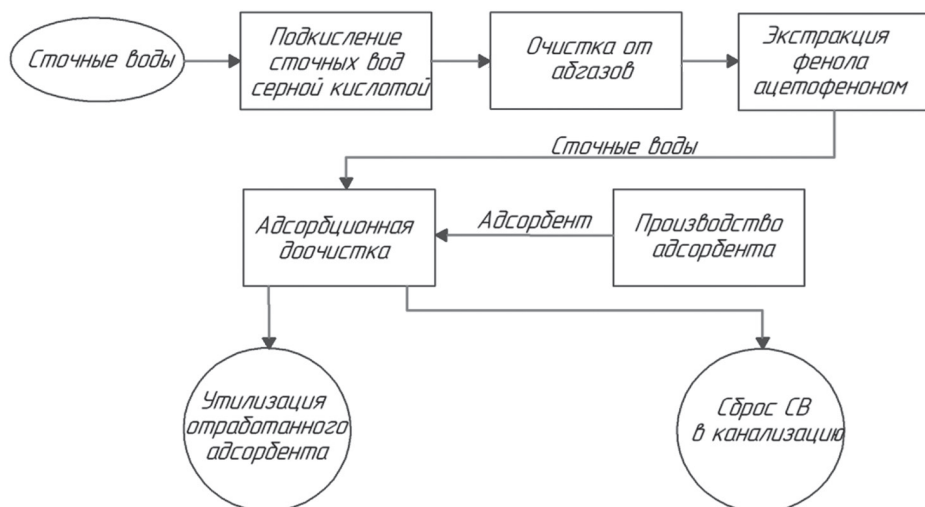


Рис. 7. Блок-схема очистки от фенолов сточных вод

Fig. 7. Flow diagram of wastewater treatment from phenols

Состав золы при сжигании порошка, массовая доля, 100%: кальций — 78; калий — 6; марганец — 3; магний — 3; фосфор — 3; кремний — 3; цинк — 1; свинец — 0,01%; рубидий — 0,01%; ртуть — 0,01%; хром — 0,008%; никель — 0,006%; медь — 0,006% и др.

Выводы

По результатам работы получены зависимости адсорбции фенола, содержащегося в отходах горнопромышленных предприятий, от температуры. Показано, что проникающие в поры сорбента молекулы обладают энергией активации, величина которой определяется графически решением уравнения Аррениуса.

Описаны возможности получения гранулированного сорбента — карбонат-

ного шлама с различной величиной пор. В работе показан процесс утилизации карбонатного шлама. Отражено, что это последовательный ступенчатый процесс, состоящий из нескольких операций.

В результате такого процесса получается гранулированный модифицированный карбонатный шлам. Такой карбонатный шлам пригоден в качестве энергетического ресурса для водогрейных котлов и их аналогов.

Результаты работы говорят о возможности реализации безотходных технологий, когда отработанный сорбционный материал (карбонатный шлам) используется снова.

Данный шлам используется для очистки сточных вод от фенолов, а также от органических поллютантов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Michałowicz J., Duda W.* Phenols — sources and toxicity // *Polish Journal of Environmental Studies*. 2007, vol. 16, no. 3, pp. 347 — 362.
2. *Kulkarni S. J., Kaware J. P.* Review on research for removal of phenol from wastewater // *International Journal of Scientific and Research Publications*. 2013, no. 3, pp. 1 — 4.
3. *Yang Y.* Solvent extraction process development and on-site trial-plant for phenol removal from industrial coal-gasification wastewater // *Chemical Engineering Journal*. 2006, vol. 117, no. 2, pp. 179 — 185. DOI: 10.1016/j.cej.2005.12.011.
4. *Sun X.* Treatment of phenolic wastewater by combined UF and NF/RO processes // *Desalination*. 2015, vol. 355, pp. 68 — 74. DOI: 10.1016/j.desal.2014.10.018.
5. *Mukherjee R., De S.* Adsorptive removal of phenolic compounds using cellulose acetate phthalate — alumina nanoparticle mixed matrix membrane // *Journal of Hazardous Materials*. 2014, vol. 265, pp. 8 — 19. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2013.11.012.
6. *Куликова Е. Ю., Баловцев С. В., Скопинцева О. В.* Комплексная оценка геоэкологических рисков при ведении открытых и подземных горных работ // *Устойчивое развитие горных территорий*. — 2024. — Т. 16. — № 1. — С. 205 — 216. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-205-216.
7. *Nadavala S. K., Che M. H., Woo H. S.* Biosorption of phenolic compounds from aqueous solutions using pine (*Pinus densiflora* Sieb) bark powder // *Bio Resources*. 2014, vol. 9, no. 3, pp. 5155 — 5174.
8. *Khusnutdinova E. M., Nikolaeva L. A., Khusnutdinov A. N.* An adsorption technique applied by plants and factories for purifying gas emissions using modified wastes available at power plants // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020, vol. 941, no. 1, article 012006. DOI: 10.1088/1757-899X/941/1/012006.
9. *Семячков А. И., Семячков К. А.* Цифровая модель техногенеза подземных вод как элемент устойчивого развития городской среды // *Устойчивое развитие горных территорий*. — 2022. — Т. 14. — № 3. — С. 362 — 369. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-3-362-369.
10. *Nikolaeva L. A., Aikenova N. E.* The study of adsorption processes of wastewater treatment of industrial enterprises from phenols / IV Всероссийский научный симпозиум с международным участием «Актуальные проблемы теории и практики гетерогенных катализаторов и адсорбентов». — Иваново-Суздаль, 2019. — С. 122 — 124.

11. Nikolaeva L. A., Aikenova N. E. Purification of industrial wastewater from phenols with modified sludge / Safety, protection and environmental protection: fundamental and applied research. – Belgorod. 2019, pp. 88 – 91.

12. Айкенова Н. Е. Использование модифицированного карбонатного шлама для очистки сточных вод от фенолов на промышленных предприятиях / XXV Всероссийский аспирантско-магистерский научный семинар, посвященный дню энергетика. Материалы конференции. – Казань, 2021. – С. 447 – 449.

13. Накусов А. Т., Хайманов С. А., Wei Wang, Цидаева Н. И. Очистка промышленных сточных вод адсорбционными материалами на основе редкоземельных ферритов-гранатов $\text{Sm}_2\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, // Устойчивое развитие горных территорий. – 2021. – Т. 13. – № 4. – С. 629–636. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-4-629-636.

14. Vaiano V. Influence of the photoreactor configuration and of different light sources in the photocatalytic treatment of highly polluted wastewater // International Journal of Chemical Reactor Engineering. 2014, vol. 12, no. 1, pp. 63 – 75. DOI: 10.1515/ijcre-2013-0090.

15. Jin X. Coking wastewater treatment for industrial reuse purpose: combining biological processes with ultrafiltration, nanofiltration and reverse osmosis // Journal of Environmental Sciences. 2013, vol. 25, no. 8, pp. 1565 – 1574. DOI: 10.1016/S1001-0742(12)60212-5.

16. Shirazi M. A, Kargari A. A review on application of membrane distillation (MD) process for wastewater treatment // Journal of Membrane Science and Research. 2015, no. 1, pp. 101 – 112.

17. Mohammadi T., Kazemi P. Taguchi optimization approach for phenolic wastewater treatment by vacuum membrane distillation // Desalination and Water Treatment. 2015, no. 52, pp. 1341 – 1349.

18. Yates B. J., Zboril R., Sharma V. K. Engineering aspects of ferrate in water and wastewater treatment-a review // Journal of Environmental Science and Health Part A Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering. 2014, vol. 49, no. 14, pp. 1603 – 1614. DOI: 10.1080/10934529.2014.950924.

19. Sulyman M., Namiesnik J., Gierak A. Low-cost adsorbents derived from agricultura by-products/wastes for enhancing contaminant uptakes from wastewater: A review // Polish Journal of Environmental Studies. 2017, vol. 26, no. 2, pp. 479 – 510. DOI: 10.15244/pjoes/66769.

20. Zwain H. M., Vakili M., Dahlan I. Waste material adsorbents for zinc removal from wastewater: A comprehensive review // International Journal of Chemical Engineering. 2014, article 347912, pp. 1 – 13. DOI: 10.1155/2014/347912. **IAS**

REFERENCES

1. Michałowicz J., Duda W. Phenols – sources and toxicity. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2007, vol. 16, no. 3, pp. 347 – 362.

2. Kulkarni S. J., Kaware J. P. Review on research for removal of phenol from wastewater. *International Journal of Scientific and Research Publications*. 2013, no. 3, pp. 1 – 4.

3. Yang Y. Solvent extraction process development and on-site trial-plant for phenol removal from industrial coal-gasification wastewater. *Chemical Engineering Journal*. 2006, vol. 117, no. 2, pp. 179 – 185. DOI: 10.1016/j.cej.2005.12.011.

4. Sun X. Treatment of phenolic wastewater by combined UF and NF/RO processes. *Desalination*. 2015, vol. 355, pp. 68 – 74. DOI: 10.1016/j.desal.2014.10.018.

5. Mukherjee R., De S. Adsorptive removal of phenolic compounds using cellulose acetate phthalate – alumina nanoparticle mixed matrix membrane. *Journal of Hazardous Materials*. 2014, vol. 265, pp. 8 – 19. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2013.11.012.

6. Kulikova E. Yu., Balovtsev S. V., Skopintseva O. V. Comprehensive assessment of geocological risks in conducting open and underground mining. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024, vol. 16, no. 1, pp. 205 – 216. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-205-216.

7. Nadavala S. K., Che M. H., Woo H. S. Biosorption of phenolic compounds from aqueous solutions using pine (*Pinus densiflora* Sieb) bark powder. *Bio Resources*. 2014, vol. 9, no. 3, pp. 5155 – 5174.

8. Khusnutdinova E. M., Nikolaeva L. A., Khusnutdinov A. N. An adsorption technique applied by plants and factories for purifying gas emissions using modified wastes available at power plants. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020, vol. 941, no. 1, article 012006. DOI: 10.1088/1757-899X/941/1/012006.

9. Semyachkov Al. I., Semyachkov K. Al. Digital model of groundwater technogenesis as an element of sustainable development of the urban environment. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022, vol. 14, no. 3, pp. 362 – 369. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-3-362-369.

10. Nikolaeva L. A., Aikenova N. E. The study of adsorption processes of wastewater treatment of industrial enterprises from phenols. *IV Vserossiyskiy nauchnyy simpozium s mezhdunarodnym uchastiem «Aktual'nye problemy teorii i praktiki geterogennykh katalizatorov i adsorbentov»* [IV All-Russian scientific symposium (with international participation): Actual problems of the theory and practice of heterogeneous catalysts and adsorbents], Ivanovo-Suzdal, 2019, pp. 122 – 124.

11. Nikolaeva L. A., Aikenova N. E. Purification of industrial wastewater from phenols with modified sludge. *Safety, protection and environmental protection: fundamental and applied research*. Belgorod. 2019, pp. 88 – 91.

12. Aikenova N. E. The use of modified carbonate sludge for wastewater treatment from phenols at industrial enterprises. *XXV Vserossiyskiy aspirantsko-magisterskiy nauchnyy seminar, posvyashchenny dnyu energetika. Materialy konferentsii* [XXV Postgraduate: Master's Scientific Seminar Dedicated to the Day of the Power Engineer. Conference materials], Kazan, 2021, pp. 447 – 449.

13. Nakusov A. T., Khaimanov S. A., Wei Wang, Tsidaeva N. I. Industrial wastewater purification adsorption materials based on rare-earth ferrite garnets $\text{Sm}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2021, vol. 13, no. 4, pp. 629 – 636. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-4-629-636.

14. Vaiano V. Influence of the photoreactor configuration and of different light sources in the photocatalytic treatment of highly polluted wastewater. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*. 2014, vol. 12, no. 1, pp. 63 – 75. DOI: 10.1515/ijcre-2013-0090.

15. Jin X. Coking wastewater treatment for industrial reuse purpose: combining biological processes with ultrafiltration, nanofiltration and reverse osmosis. *Journal of Environmental Sciences*. 2013, vol. 25, no. 8, pp. 1565 – 1574. DOI: 10.1016/S1001-0742(12)60212-5.

16. Shirazi M. A, Kargari A. A review on application of membrane distillation (MD) process for wastewater treatment. *Journal of Membrane Science and Research*. 2015, no. 1, pp. 101 – 112.

17. Mohammadi T., Kazemi P. Taguchi optimization approach for phenolic wastewater treatment by vacuum membrane distillation. *Desalination and Water Treatment*. 2015, no. 52, pp. 1341 – 1349.

18. Yates B. J., Zboril R., Sharma V. K. Engineering aspects of ferrate in water and wastewater treatment—a review. *Journal of Environmental Science and Health Part A Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*. 2014, vol. 49, no. 14, pp. 1603 – 1614. DOI: 10.1080/10934529.2014.950924.

19. Sulyman M., Namiesnik J., Gierak A. Low-cost adsorbents derived from agricultura by-products/wastes for enhancing contaminant uptakes from wastewater: A review. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2017, vol. 26, no. 2, pp. 479 – 510. DOI: 10.15244/pjoes/66769.

20. Zwain H. M., Vakili M., Dahlan I. Waste material adsorbents for zinc removal from wastewater: A comprehensive review. *International Journal of Chemical Engineering*. 2014, article 347912, pp. 1 – 13. DOI: 10.1155/2014/347912.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Панфилова Татьяна Александровна¹ — канд. техн. наук, доцент, Институт нефти и газа; МГТУ им. Н.Э. Баумана, e-mail: t_pan80@mail.ru, ORCID ID: 0009-0003-9537-8128,

Кукарцев Виктор Алексеевич¹ — канд. техн. наук, доцент, Политехнический институт,

Тынченко Вадим Сергеевич¹ — канд. техн. наук, доцент, e-mail: vadimond@mail.ru, Институт нефти и газа;

НОЦ Технологии искусственного интеллекта, МГТУ им. Н.Э. Баумана; Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнёва,

Михалев Антон Сергеевич¹ — старший преподаватель, Институт космических и информационных технологий;

Центр искусственного интеллекта, e-mail: asmikhalev@sfu-kras.ru,

Сяоган Ву – Школа электротехники,
Хэбэйский технологический университет,
Тяньцзинь, Китай, e-mail: xgwu@hrbust.edu.cn,
ORCID ID: 0000-0002-1830-0437,

¹ Сибирский федеральный университет.

Для контактов: Тынченко В.С., e-mail: vadimond@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*T.A. Panfilova*¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
School of Petroleum and Natural Gas Engineering;
Bauman Moscow State Technical University,
105005, Moscow, Russia, e-mail: t_pan80@mail.ru,
ORCID ID: 0009-0003-9537-8128,

*V.A. Kukartsev*¹, Cand. Sci. (Eng.),
Assistant Professor, Polytechnical Institute,
*V.S. Tynchenko*¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
School of Petroleum and Natural Gas Engineering;
Artificial Intelligence Technology Scientific
and Education Center, Bauman Moscow State
Technical University, 105005, Moscow, Russia;
Institute of Computer Science and Telecommunications,
Reshetnev Siberian State University of Science
and Technology, 660037, Krasnoyarsk, Russia,
e-mail: vadimond@mail.ru,

*A.S. Mikhalev*¹, Senior Lecturer,
Institute of Space and Information Technologies;
Artificial Intelligence Center,
e-mail: asmikhalev@sfu-kras.ru,

Xiaogang Wu, School of Electrical Engineering,
Hebei University of Technology,
Tianjin, 300401, China, e-mail: xgwu@hrbust.edu.cn,
ORCID ID: 0000-0002-1830-0437,

¹ Siberian Federal University, 660041, Krasnoyarsk, Russia.

Corresponding author: V.S. Tynchenko, e-mail: vadimond@mail.ru.

Получена редакцией 01.04.2024; получена после рецензии 27.04.2024; принята к печати 10.06.2024.

Received by the editors 01.04.2024; received after the review 27.04.2024; accepted for printing 10.06.2024.

