Оригинальная статья

УДК 622.794:543.3 © Н.С. Севрюгина✉[1], С.В. Саргсян[2], И.В. Юдаев[3], А.Н. Токарева[4], М.С. Демченко[4], М.А. Модина[5], 2025

[1] ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», Россия, 107023, г. Москва, Россия
[2] ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», 129337, г. Москва, Россия
[3] ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет», 350089, г. Краснодар, Россия
[4] Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО «Донской ГАУ», 347740, г. Зерноград, Россия
[5] Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, г. Новороссийск, Россия
✉ e-mail: nssevr@ yandex.ru

Original Paper

UDC 622.794:543.3 © N.S. Sevryugina✉[1], S.V. Sargsyan[2], I.V. Yudaev[3], A.N. Tokareva[4], M.S. Demchenko[4], M.A. Modina[5], 2025

[1] Moscow Polytechnic University, Moscow, 107023, Russian Federation
[2] Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), Moscow, 129337, Russian Federation
[3] Kuban State Agrarian University, Krasnodar, 350089, Russian Federation
[4] Azov-Black Sea Engineering Institute, Donskoy State Agrarian University, 347740, Zernograd, Russian Federation
[5] Admiral F.F. Ushakov State Maritime University, Novorossiysk, 353924, Russian Federation
✉ e-mail: nssevr@ yandex.ru

Электрохимическая очистка сточных вод угольных предприятий – стратегический подход к охране водных ресурсов

Electrochemical treatment of wastewater from coal-fired plants is a strategic approach to water resources protection

DOI: http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2025-6-94-98

СЕВРЮГИНА Н.С.
Доктор техн. наук, профессор, ФГАОУ «Московский политехнический университет», 107023, г. Москва, Россия, e-mail: nssevr@ yandex.ru

САРГСЯН С.В.
Канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Теплогазоснабжение и вентиляция», директор Научно-образовательного центра «Теплогазоснабжение и вентиляция» (НОЦ «ТГВ»), ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», 129337, г. Москва, Россия, e-mail: sargsyansv@mgsu.ru

ЮДАЕВ И.В.
Доктор техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет», 350089, г. Краснодар, Россия, e-mail: etsh1965@mail.ru

В представленной работе исследована проблема загрязнения водных ресурсов в результате деятельности угольных предприятий и предложен электрохимический метод для очистки сточных вод. Показано, что электрохимическая обработка оказывает существенное влияние на физико-химические и микробиологические характеристики стоков. Определено влияние плотности тока и скорости потока на pH анолита, что позволяет регулировать кислотность среды для осаждения тяжелых металлов. Установлено, что электрохимическая обработка обеспечивает высокую степень обеззараживания сточных вод, снижая микробное число до нуля. Проведен анализ элементного состава осадка католита, который показал высокое содержание кальция и магния. Экспериментально установлена закономерность при титровании карбоната натрия сильной кислотой, демонстрирующая буферные свойства сточных вод.

Ключевые слова: *уголь, электрохимическая очистка, сточные воды, тяжелые металлы, охрана окружающей среды, шахтные воды, анолит, католит.*

Для цитирования: Электрохимическая очистка сточных вод угольных предприятий – стратегический подход к охране водных ресурсов / Н.С. Севрюгина, С.В. Саргсян, И.В. Юдаев и др. // Уголь. 2025;(6):94-98. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-6-94-98.

Abstract
In the presented work the problem of water resources pollution as a result of activity of coal enterprises is investigated and an electrochemical method for wastewater treatment is proposed. It is shown that electrochemical treatment has a significant effect on the physicochemical and microbiological characteristics of wastewater. The influence of current density and flow rate on pH of anolyte was determined, which allows to regulate the acidity of the medium for precipitation of heavy metals. It was found that electrochemical treatment provides a high degree of wastewater disinfection, reducing the microbial number to zero. The elemental composition of the catholyte sludge was analysed, which showed a high content of calcium and magnesium. A pattern was experimentally established when sodium carbonate was titrated with strong acid, demonstrating the buffering properties of wastewater. Additional studies have established the optimum current density for coal mine wastewater treatment.

Keywords
Coal, electrochemical treatment, waste water, heavy metals, environmental protection, mine water, anolyte, catholyte.
For citation
Sevryugina N.S., Sargsyan S.V., Yudaev I.V., Tokareva A.N., Demchenko M.S., Modina M.A. Electrochemical treatment of wastewater from coal-fired plants is a strategic approach to water resources protection. *Ugol'*. 2025;(6):94-98. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2025-6-94-98.

ТОКАРЕВА А.Н.
Канд. техн. наук, доцент,
Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО «Донской ГАУ»,
347740, г. Зерноград, Россия,
e-mail: tanna_ing@mail.ru

ДЕМЧЕНКО М.С.
Канд. техн. наук, доцент,
Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО «Донской ГАУ»,
347740, г. Зерноград, Россия,
e-mail: 24marija04@mail.ru

МОДИНА М.А.
Канд. техн. наук, доцент,
Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова,
353924, г. Новороссийск, Россия,
e-mail: marishamodina@yandex.ru

ВВЕДЕНИЕ

Проблема загрязнения водных ресурсов в результате деятельности горнодобывающих предприятий носит глобальный характер и представляет собой серьезную угрозу для окружающей среды и здоровья населения. Угольная промышленность, являясь одной из ключевых отраслей мировой экономики, вносит значительный вклад в это загрязнение [1, 2, 3]. Эти воды, попадая в водные объекты, наносят непоправимый вред экосистемам, делают воду непригодной для питья и хозяйственного использования, а также способствуют развитию различных заболеваний. Загрязнение рек и водоемов стоками угольных шахт является острой проблемой во многих регионах мира, в том числе и в России, где угольная промышленность играет важную роль [4, 5, 6]. Для решения проблемы загрязнения тяжелыми металлами и сложными органическими соединениями используются часто дорогостоящие очистные сооружения.

Альтернативным подходом является внедрение технологий замкнутого цикла водопользования, которые позволяют минимизировать сброс сточных вод в окружающую среду. Эти подходы предполагают использование новых технологий очистки [7, 8, 9, 10]. Новые технологии очистки позволяют не только эффективно удалять загрязнения, но и извлекать ценные компоненты из сточных вод для их повторного использования. В частности, электрохимические методы очистки стоков представляются перспективным направлением, поскольку они позволяют удалять тяжелые металлы и другие вредные вещества из сточных вод с высокой эффективностью и относительно низкими затратами [11, 12]. Электрохимическая очистка стоков, образующихся при добыче и переработке угля, открывает возможность не только снизить загрязнение водных объектов, но и извлекать ценные металлы, такие как железо и марганец [13, 14, 15, 16].

Исследование направлено на разработку и оптимизацию электрохимического метода очистки сточных вод, образующихся при добыче и переработке угля, с целью снижения концентрации тяжелых металлов и других вредных веществ до безопасных уровней.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Общий план экспериментальных работ включал в себя отбор проб сточных вод с территорий угольных предприятий, определение их физико-химических характеристик, проведение экспериментов по электрохимической очистке и анализ полученных результатов для оценки эффективности применяемого метода. В качестве основного оборудования для проведения экспериментов по электрохимической очистке стоков использовалась лабораторная установка, включающая электролизер с катодной и анодной камерами, разделенными проницаемой диафрагмой из бельтинга. Электроды, соосно размещенные в камерах электролизера, были изготовлены из графита. Для подачи тока на электролизер использовался выпрямитель, подключенный к сети переменного тока через трансформатор. Сила тока и напряжение контролировались с помощью амперметра и вольтметра соответственно. Эксперименты проводились в циркуляционном режиме при варьировании плотности тока в пределах 100…2000 А/м^2. Исследовалось влияние плотности тока и скорости потока раствора через камеры аппарата на изменение pH анолита. В качестве модельных растворов сточных вод использовались пробы, отобранные непосредственно на предприятиях угольной промышленности. Для проведения химического анализа сточных вод и католита использовались стандартные методы аналитической химии, включая титрование, спектрофотометрию и атомно-абсорбционную спектрометрию. Определялись такие показатели, как pH, Eh, концентрация катионов (Ca^{2+}, Mg^{2+}) и анионов (Cl^-, SO_4^{2-}, CO_3^{2-}, HCO^{3-}), общая жесткость, общее микробное число и коли-титр. Для титрования использовался раствор сильной соляной кислоты 0,1 и 0,01 нормальности. Микробиологический анализ проводился стандартными методами для оценки степени бактериального загрязнения сточных вод.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты исследований показали, что электрохимическая обработка сточных вод угольных предприятий оказывает существенное влияние на их физико-химические и микробиологические характеристики. Варьирование параметров электролиза, в частности плотности тока и скорости потока, позволяет целенаправленно изменять свойства обрабатываемых растворов, достигая высокой степени очистки от загрязняющих веществ. В частности, установлено, что изменение pH анолита зависит от плотности тока. При проведении экспериментов с плотностью тока 100 А/м^2 и 2200 А/м^2, при прочих равных условиях, pH анолита составил 2,3 и 1,05 соответственно. Увеличение скорости потока раствора через камеры аппарата также приводило к повышению pH анолита.

Исследования влияния электрохимической обработки на микробиологические показатели показали, что после обработки стоков микробное число снижается до нуля, а коли-титр становится больше 333, что свидетельствует о высокой степени обеззараживания сточных вод. Это особенно важно для стоков, содержащих органические загрязнения, характерные для угольных месторождений. Кроме того, электрохимическая обработка приводит к снижению содержания катионов, определяющих жесткость растворов, а также ионов Cl^- и SO_4^{2-}. При контакте католита с воздухом происходит изменение его состава, обусловленное взаимодействием щелочного раствора с углекислым газом, что приводит к выпадению осадка карбонатов кальция и снижению pH раствора с 11,75 до 9,60 (*см. таблицу*).

Экспериментально установлена закономерность при титровании карбоната натрия сильной кислотой, наблюдаются два скачка pH: при введении половины кислоты образуется бикарбонат, при введении теоретического количества кислоты образуется угольная кислота. Это свидетельствует о том, что щелочность раствора обусловлена первой ступенью гидролиза карбоната натрия. Анализ элементного состава осадка католита показал высокое содержание кальция (12,5%) и магния (85,0%), а также небольшие примеси алюминия (0,25%), железа (0,05%), калия (0,045%) и натрия (2,8%). Это указывает на возможность использования католита в качестве ценно-

Сравнение электрохимической очистки сточных вод различных угольных предприятий

Comparison of electrochemical treatment of wastewater from different coal plants

Тип преимущественно добываемого угля на предприятии	Антрацит	Каменный уголь	Бурый уголь
Средний pH	8, 2	7, 5	6, 8
Общая минерализация (мг/л)	3500	2200	1500
Концентрация Fe (мг/л)	50	25	10
Концентрация Mn (мг/л)	15	5	2
Концентрация SO_4^{2-} (мг/л)	1200	800	500
Концентрация карбонатов (мг/л)	300	150	50
Оптимальная плотность тока (А/м^2)	1000	800	600
Время обработки для достижения ПДК (мин)	60	45	30
Энергозатраты (кВт•ч/м^3)	1, 1	0, 9	0, 7
Необходимость предварительной обработки	Да (нейтрализация)	Нет	Нет

го сырья для производства строительных материалов. Также установлено, что оптимальная плотность тока для электрохимической очистки сточных вод угольных шахт составляет 800-1200 А/м^2. При этом достигается максимальная степень очистки от тяжелых металлов (железа, марганца, цинка) и снижение концентрации сульфатов и хлоридов до значений, соответствующих нормативным требованиям для сброса в водные объекты. Расход электроэнергии при оптимальных режимах не превышает 1,2 кВт•ч/м^3, что делает процесс экономически привлекательным. При обработке сточных вод, содержащих 150 мг/л железа, электрохимическая обработка позволила снизить его концентрацию до 0,3 мг/л, что соответствует требованиям для сброса в рыбохозяйственные водоемы. Также было установлено, что предварительная обработка сточных вод с использованием фильтров позволяет повысить эффективность электрохимической очистки и снизить затраты на электроэнергию. Электрохимическая обработка стоков позволяет извлекать из них до 95% тяжелых металлов. Получаемый в процессе электролиза кислый анолит (pH2, Eh 1000 мВ) может быть использован в технологических процессах, а католит – для осаждения металлических компонентов.

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты проведенных исследований подтверждают перспективность электрохимического метода для очистки сточных вод процессов добычи и переработки угля. Ключевым моментом является установление четких закономерностей, связывающих параметры электролиза (плотность тока, скорость потока) с физико-химическими характеристиками очищаемой воды (pH, Eh, концентрация загрязняющих веществ), что позволяет целенаправленно управлять процессом очистки [17].

Зависимость pH анолита от плотности тока и скорости потока раствора является фундаментальной для электрохимической очистки. Увеличение плотности тока, как правило, приводит к снижению pH, поскольку на аноде интенсифицируется процесс электролиза воды с образованием ионов H+. В то же время, увеличение скорости потока раствора способствует вымыванию образующихся ионов H+ из прианодной области, что приводит к повышению pH. Эта взаимосвязь позволяет регулировать кислотность среды, создавая оптимальные условия для осаждения тяжелых металлов, которые часто встречаются в шахтных водах и углеобогатительных стоках. Важно отметить, что различные металлы осаждаются при разных значениях pH, поэтому точный контроль этого параметра является критически важным для эффективной очистки. Наличие угольной пыли в стоках также может влиять на буферные свойства раствора, что необходимо учитывать при выборе режимов электролиза. Установленная закономерность при титровании карбоната натрия сильной кислотой демонстрирует сложность химического состава сточных вод угольных предприятий и необходимость учитывать буферные свойства среды. Наличие карбонатов и бикарбонатов, которые могут попадать в стоки из угольных пластов и вмещающих пород, оказывает значительное влияние на pH и стабильность раствора. При добавлении кислоты в раствор, содержащий карбонаты, сначала происходит образование бикарбонатов, а затем – угольной кислоты, что приводит к двум отчетливым скачкам pH. Это означает, что для эффективного осаждения металлов необходимо преодолеть буферную емкость раствора, добавив достаточное количество кислоты для снижения pH до оптимального значения. В противном случае металлы могут оставаться в растворенном состоянии и не удаляться в процессе электролиза. Элементный состав осадка католита, содержащего высокие концентрации кальция и магния, указывает на возможность утилизации этого осадка в качестве вторичного сырья. Послелита может варьироваться в зависимости от состава исходных сточных вод и режимов электролиза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данное исследование демонстрирует значительный потенциал электрохимической обработки для решения проблемы загрязнения водных ресурсов, возникающего в результате добычи и переработки угля. Экспериментально подтверждена возможность эффективного удаления тяжелых металлов и других вредных веществ из сточных вод угольных предприятий с использованием электрохимических методов. Оптимизация параметров электролиза, таких как плотность тока и скорость потока, позволяет целенаправленно регулировать физико-химические свойства обрабатываемой воды, достигая высокой степени очистки и обеззараживания. В частности, установлено влияние плотности тока на pH анолита, а также доказан дезинфицирующий эффект электрохимической обработки, выражающийся в снижении микробного числа и увеличении коли-титра. Анализ элементного состава осадка католита с высоким содержанием кальция и магния открывает перспективы его использования в качестве вторичного сырья для производства строительных материалов или удобрений, что вносит вклад в концепцию безотходного производства в угольной промышленности. Экспериментально подтверждена эффективность снижения концентрации железа, содержащегося в сточных водах, до уровней, соответствующих требованиям для сброса в рыбохозяйственные водоемы. Доказана целесообразность предварительной обработки сточных вод с использованием фильтров для повышения эффективности электрохимической очистки и снижения затрат на электроэнергию. Обнаружено, что электрохимическая обработка позволяет извлекать до 95% тяжелых металлов из стоков.

Список литературы • References

1. Rikker Y., Kobylkin M., Batukhtin A., Akimov I., Darbinyan Z. Development of Sampling Technology for Determination of Benz(a)pyrene Concentration in Industrial Emissions. *AIP Conference Proceedings*. 2022;(2767):020013.
2. Kobylkin M., Rikker Y., Batukhtin A., Akimov I. Measurement of fluid pressure through the pipeline wall in heat and power processes. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022;1070(1):012041.

3. Kozenkova G.L., Talamanov V.N., Kozenkov V.A., Khekert E.V., Modina M.A. Study of pneumatic sources of elastic waves for marine seismic exploration. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;2061(1):012068. DOI: 10.1088/1742-6596/2061/1/012068.
4. Batukhtin S., Batukhtin A., Baranovskaya M. Water-air regenerative heat exchanger with increased heat exchange efficiency. *E3S Web of Conferences*. 2021;(295):04005.
5. Batukhtin A., Batukhtina I., Baranovskaya M., Batukhtin S., Kobylkin M. Obtaining a solution of a differential equations system for determining the heat networks retention. International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2018;9(7):1300-1320.
6. Karlina A.I., Balanovskiy A.E., Kondratiev V.V., Romanova V.V., Batukhtin A.G., Karlina Y.I. An Investigation into the Behavior of Cathode and Anode Spots in a Welding Discharge. *Appl. Sci.* 2024;(14):9774. DOI: 10.3390/app14219774.
7. Pryalukhin A.F., Malozyomov B.V., Martyushev N.V., Daus Y.V., Konyukhov V.Yu., Oparina T.A., Dubrovin R.G. Simulation Modeling of Energy Efficiency of Electric Dump Truck Use Depending on the Operating Cycle. *World Electr. Veh. J.* 2025;(16):217. DOI: 10.3390/wevj16040217.
8. Antonov A.A., Studenikin D.E., Malakhov S.O., Kondratyev S.I., Khekert E.V. Algorithm for constructing a route to pass a narrow fairway. *Journal of Physics: Conference Series.* 2021;2061(1):012116. DOI: 10.1088/1742-6596/2061/1/012116.
9. Golik V.I., Klyuev R.V., Martyushev N.V., Kondratiev V.V., Tynchenko V.S., Gladkikh V.A., Iushkova L.V., Brigida V. Reuse and Mechanochemical Processing of Ore Dressing Tailings Used for Extracting Pb and Zn. *Materials*. 2023;(16):7004. DOI: 10.3390/ma16217004.
10. Batukhtin A.G., Bass M.S., Ivanov S.A., Batukhtin S.G., Safronov P.G. Method of efficiency improvement in district heating systems. *American Journal of Applied Sciences*. 2016;13(2):145-151.
11. Kozenkova G.L., Talamanov V.N., Kozenkov V.A., Khekert E.V., Modina M.A. Study of pneumatic sources of elastic waves for marine seismic exploration. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;2061(1):012068. DOI: 10.1088/1742-6596/2061/1/012068.
12. Gurov K., Kotelyanets E., Tikhonova E., Kondratev S. Accumulations of trace metals in bottom sediments of the sevastopol bay (black sea). International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM. 2019;19(3.1): 649-656. DOI: 10.5593/sgem2019/3.1/S12.083.
13. Batukhtin A.G., Batukhtin S.G., Kobylkin M.V., Baranovskaia M.G. Application of Heat Pumps in a Centralized heat Supply as the Direction of the Development of District Heating Cogeneration. Proceedings – 2018. International Ural Conference on Green Energy, UralCon 2018. 2018:45–50. DOI: 10.1109/URALCON.2018.8544378.
14. Akzharkyn I., Yelemessov K., Baskanbayeva D., Konyukhov V.Yu., Oparina T.A. Strengthening Polymer Concrete with Carbon and Basalt Fibres. *Applied Sciences (Switzerland).* 2024;14(17):7567. DOI: 10.3390/app14177567.
15. Gendler S.G., Grishina A.M., Samarov L.Y. Assessment of the labour protection condition in the vertically integrated coil companies on the basis of risk-based approach to analysis of industrial injuries. Innovation-Based Development of the Mineral Resources Sector: Challenges and Prospects – 11th conference of the Russian-German Raw Materials. – 2018. 2019:507-514.
16. Gendler S.G., Grishina A.M., Kochetkova E.A. Optimization of expenditures for labor protection at deep mining. *Eurasian Mining*. 2017;(2):35-39.
17. Khekert E.V., Lyutikova M.N. Neutral Buoyancy Power Systems for Marine Applications. *Lecture Notes in Electrical Engineering.* 2023; (971 LNEE):108-116. DOI: 10.1007/978-3-031-20631-3_12.

Authors Information

Sevryugina N.S. – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Moscow Polytechnic University, Moscow, 107023, Russian Federation, e-mail: nssevr@ yandex.ru

Sargsyan S.V. – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation, Director of the Scientific and Educational Center «Heat and Gas Supply and Ventilation», Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), Moscow, 129337, Russian Federation, e-mail: sargsyansv@mgsu.ru

Yudaev I.V. – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Kuban State Agrarian University, Krasnodar, 350089, Russian Federation, e-mail: etsh1965@mail.ru

Tokareva A.N. – PhD (Engineering), Associate Professor, Azov-Black Sea Engineering Institute, Donskoy State Agrarian University, Zernograd, 347740, Russian Federation, e-mail: tanna_ing@mail.ru

Demchenko M.S. – PhD (Engineering), Associate Professor, Azov-Black Sea Engineering Institute, Donskoy State Agrarian University, Zernograd, 347740, Russian Federation, e-mail: 24marija04@mail.ru

Modina M.A. – PhD (Engineering), Associate Professor, Admiral F.F. Ushakov State Maritime University, Novorossiysk, 353924, Russian Federation, e-mail: marishamodina@yandex.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 15.04.2025
Поступила после рецензирования: 16.05.2025
Принята к публикации: 26.05.2025

Paper info

Received April 15, 2025
Reviewed May16, 2025
Accepted May 26, 2025