

УДК 628.3

DOI 10.23968/1999-5571-2023-20-3-69-76

© А. П. Самодолов, аспирант

© A. P. Samodolov, post-graduate student

© Д. В. Ульрих, д-р техн. наук, доцент

© D. V. Ulrikh, Dr. Sci. Tech., Associate Professor

© Т. М. Лонзингер, канд. техн. наук, доцент

© T. M. Lonzinger, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

© С. Е. Денисов, д-р техн. наук, профессор

© S. E. Denisov, Dr. Sci. Tech., Professor

(Южно-Уральский государственный университет,
Челябинск, Россия)

(South Ural State University,
Chelyabinsk, Russia)

E-mail: ulrikhdv@susu.ru

E-mail: ulrikhdv@susu.ru

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДОМЕННОГО ШЛАКА ДЛЯ ОЧИСТКИ КИСЛЫХ СТОКОВ ПРЕДПРИЯТИЙ ГОРНО-ПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

EFFECTIVENESS OF USING BLAST-FURNACE SLAG FOR TREATMENT OF ACID EFFLUENTS OF MINING AND INDUSTRIAL COMPLEX ENTERPRISES

Рассмотрена возможность применения доменного шлака для очистки кислых стоков горных предприятий от различных загрязнителей, в частности тяжелых металлов. Исследованы сорбционные способности доменного шлака по отношению к тяжелым металлам из кислых сточных вод, его физико-химические свойства и состав. Структура и состав поверхности исследуемого материала изучались на электронном микроскопе JEOL JSM-6460 LV с приставкой для микрорентгеноспектрального анализа, а химический состав сорбата и его изменения в зависимости от условий исследований — на атомно-эмиссионном спектрометре OPTIMA 2100DV с индуктивно связанной плазмой. Электронно-микроскопическим анализом установлено, что образцы шлака имеют пористую структуру с диаметром пор 0,15–0,88 мкм. Определена сорбционная способность доменного шлака в статических условиях при различных температурах. Установлено, что эффективность очистки сточных вод при использовании доменного шлака варьирует от 71 до 100 % в статических условиях и от 5 до 100 % в динамических условиях в зависимости от природы катионов металлов в стоке, температуры сорбата и скорости фильтрации. В процессе сорбции происходит подщелачивание сточных вод. Величина pH при динамическом режиме испытаний повышается от 2,38 до значений 3,33–3,39 при расходе сорбата 0,6–2,64 л/ч и до 5,62 при расходе сорбата 0,3 л/ч.

Ключевые слова: техногенные воды, доменный шлак, горно-обогатительное предприятие, сорбция, тяжелые металлы, техногенные подотвальные воды, AMD, загрязнители, фильтрующая загрузка.

The article considers the possibility of using blast-furnace slag to treat acid mine drainage of mining and industrial complex enterprises from various pollutants, and in particular, from heavy metals. There was studied sorption capacity of blast furnace slag with respect to heavy metals from acidic wastewater, its physical and chemical properties and composition. The structure and composition of the surface of the studied material were examined using a JEOL JSM-6460 LV electron microscope with an attachment for micro-X-ray spectral analysis, and the chemical composition of the sorbate and its changes depending on the research conditions were studied using atomic emission spectrometer OPTIMA 2100DV with inductively coupled plasma. Analysis on the electron microscope has shown that the blast-furnace slag samples have a porous structure with the pore diameter of 0.15–0.88 μm . There has been determined the sorption capacity of the blast-furnace slag in static conditions with varying temperatures. It has been found out that the effectiveness of wastewater treatment with the use of blast-furnace slag varies from 71 to 100 % in static conditions and from 5 to 100% in dynamic conditions depending on the nature of the cations of the metals in the wastewater, the sorbate temperature, and filtration speed. In the process of sorption, there occurs alkalization of wastewater. In the dynamic testing mode, the pH index raises from 2.38 to 3.33–3.39 at consumption of sorbate of 0.6–2.64 l/per hour and up to 5.62 at the at sorbate consumption of 0.3 l/per hour.

Keywords: technogenic water, blast-furnace slag, mining-and-processing integrated enterprise, sorption, heavy metals, technogenic underspoil water, AMD, pollutants, filter medium.

Введение

С развитием цивилизации возрастает проблема рациональной и безопасной утилизации отходов промышленности. Технический прогресс приводит к росту объемов производства и использованию в качестве сырьевой базы все большего количества невозобновляемых ресурсов планеты. Современный уровень технологического развития не позволяет полностью перерабатывать рудные материалы, поэтому количество отходов в зависимости от перерабатываемого сырья для металлургического производства составляет 45–98 %. Во всем мире отходы металлургических производств представляют собой одну из самых серьезных проблем для окружающей среды, так как именно металлургия производит миллионы тонн отходов. При неправильном управлении эти виды отходов могут нанести необратимый ущерб окружающей среде.

Анализ научных работ по утилизации и переработке отходов металлургического производства показывает, что основная их масса используется в дорожном строительстве и при изготовлении строительных материалов в качестве добавок [1–14]. Научных работ, посвященных использованию отходов металлургических производств для очистки техногенных вод, крайне мало [15–18], хотя развитие исследований в данном направлении позволило бы решить сразу две проблемы: утилизировать отходы производства и решить вопрос очистки промышленных сточных вод.

В нашей стране основной вклад в загрязнение гидросферы вносят предприятия угледобывающей промышленности, черной и цветной металлургии, которые сосредоточены в европейской части, в Сибири и на Урале. Наибольшее опасения вызывают загрязнения от предприятий горнопромышленного производства, где основной особенностью технологического процесса при добыче медноколчеданных руд является образование большого количества де-

балансных загрязненных вод: дренажных и инфильтрационных [19]. Последствиями добычи полезных ископаемых являются образование поверхностных и подземных сточных вод в результате осушения кислых шахт, понижение уровня грунтовых вод, оседание грунтов, нарушение гидрологического цикла и выпадение осадков. Кислые стоки горных предприятий, в мировой практике именуемые «кислотный дренаж шахт» (acid mine drainage (AMD)), считаются одной из самых серьезных угроз для водных ресурсов в горнодобывающей промышленности. AMD способны оказывать долгосрочное разрушительное воздействие на реки, ручьи и водную флору и фауну [20–25].

Когда AMD попадают в поверхностные водные объекты, они оказывают биологическое воздействие на речные и озерные организмы из-за изменения кислотности и химического состава среды обитания, присутствия тяжелых металлов, ухудшения органолептических свойств водных объектов (повышения показателя мутности и цветности), оранжевого или желтого окрашивания речных отложений, нарушения круговорота питательных веществ. На территориях, прилегающих к горнодобывающим предприятиям, водоемы становятся непригодными для бытовых, сельскохозяйственных и промышленных целей.

Материалы и методы

Существует множество способов очистки AMD, содержащих тяжелые металлы. Они отличаются по своей эффективности и экономическим затратам. Большинство известных методов очистки не получили широкого распространения из-за необходимости капитальных вложений, высокой стоимости реагентов или сложности аппаратного оформления. Использование отходов производства — доменного шлака — в качестве сорбционного материала для очистки кислых сточных вод позволит значительно снизить эксплуатационные расходы, сделав

тем самым очистку сточных вод от тяжелых металлов более доступной и экономически целесообразной.

Доменный шлак относится к специфическому виду искусственных каменных масс. Он является побочным продуктом плавки железных руд для получения чугуна¹. На выходе из доменной печи шлак быстро охлаждается водой, а затем высушивается. Поэтому материал приобретает пористое строение.

Основные составляющие доменного шлака — углерод, кварц, оксиды алюминия, кальция и магния, на которые приходится 85 % всего состава шлака. Остальные 15 % — марганец, соединения железа и серы и следовое количество других элементов. Состав шлака на является постоянным, он зависит от параметров ведения плавки, поэтому для определения точного состава партии шлака проводится физико-химический анализ. В процессе сорбционного взаимодействия важным фак-

тором являются характеристики структуры и поверхностного слоя сорбента.

Для изучения структуры и состава поверхности доменного шлака использовали методы электронно-микроскопического и микрорентгенофазового анализа на микроскопе JEOL JSM-6460 LV. Химический состав сорбата и его изменения в зависимости от условий испытаний определяли на атомно-эмиссионном спектрометре OPTIMA 2100DV с индуктивно связанной плазмой.

В работе исследован доменный шлак ПАО «Челябинский металлургический комбинат» (Челябинск).

Результаты исследований

Результаты электронно-микроскопического анализа доменного шлака представлены на рис. 1. На микрофотографии отчетливо видна пористая структура исследуемого образца доменного шлака. Измерен диаметр пор, который варьируется в интервале 0,15–0,88 мкм.

Результаты микрорентгеноспектрального анализа поверхности доменного шлака представлены в табл. 1.

¹ Все о доменном шлаке. URL: <https://stroy-podskazka.ru/materialy/vse-o-domennom-shlak/> (дата обращения: 05.03.2022).

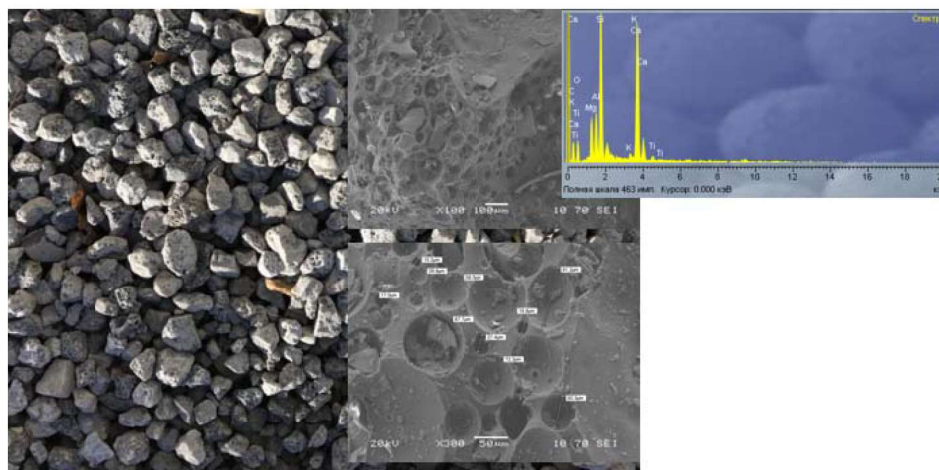


Рис. 1. Микрофотография поверхности доменного шлака и результаты микрорентгеноспектрального анализа

Таблица 1

Результаты микрорентгеноспектрального анализа доменного шлака

Элемент	C	O	Mg	Al	Si	Ca
Содержание элемента, мас. %	24,37	43,21	4,42	3,41	10,90	12,69

Как видно из табл. 1, основными химическими элементами в составе доменного шлака являются кислород, углерод, магний, алюминий, кремний и кальций.

Оценку эффективности сорбции доменным шлаком поллютантов проводили, используя в качестве сорбата смесь подотвальных вод Ново-Шемурского и Шемурского месторождений полиметаллических руд на Северном Урале. Сток является сильноокислым — величина pH равна 2,38, поэтому одновременно с очисткой от загрязнителей возникает проблема нейтрализации подотвальных вод. Состав сорбата представлен в табл. 2.

Как видно из табл. 2, основными загрязнителями подотвальных вод являются алюминий, мышьяк, кобальт, медь, железо, свинец и цинк. Взаимодействие сорбента (доменного шлака) с сорбатом исследовали статистическим и динамическим методами в лабораторных условиях методом ограниченного объема при статической сорбции, когда поллютанты находились в жидкой фазе и приводились в контакт с неподвижным сорбентом; и в динамическом режиме на специальной установке, где загрязнители в подвижной жидкой фазе фильтровались через слой сорбента. При проведении исследований варьировали время контакта сорбента с сорбатом (от 3 до 168 ч) и температуру окружающей среды (от 0 до 20 °C).

Эффективность очистки подотвальных вод доменным шлаком показана на рис. 2 и 3.

Как видно из представленных графиков, после очистки подотвальных вод доменным шлаком концентрация поллютантов снизилась в среднем на 80–90 %, наиболее опасный загрязнитель воды, вещество первого класса опасности — мышьяк, удален полностью.

Полученные зависимости позволяют определить механизм сорбции катионов тяжелых металлов доменным шлаком. Высокая удельная поверхность доменного шлака, обусловленная его пористой структурой, обеспечивает протекание сорбционного процесса по типу физической адсорбции. Но физическая адсорбция — экзотермический процесс, который протекает самопроизвольно. Сорбируемые ионы стремятся занять всю поверхность адсорбента, этому препятствует процесс, противоположный адсорбции, — десорбция (эндотермический процесс). Поэтому чем выше температура, тем меньше должна быть физическая адсорбция. Возрастание с повышением температуры эффективности сорбции доменным шлаком катионов тяжелых металлов позволяет предположить, что процесс идет не только по механизму физической адсорбции, но присутствуют и химические процессы, поэтому поллютанты при использовании доменного шлака будут прочно удерживаться на поверхности. При данном механизме исключается опасность залпового выброса загрязнителей в сорбат после достижения предела насыщения поверхностных центров сорбента.

Эффективность очистки исходного стока доменным шлаком в динамических условиях в зависимости от расхода сорбата исследовали на специальной лабораторной установке с регулируемым объемом подаваемой жидкости. Расход сорбата устанавливали равным 0,3, 0,6, 1,2, 2,64 л/ч. Пробы сорбата при заданном расходе отбирали в течение 1 ч через каждые 10 мин, перемешивали и в усредненной пробе определяли концентрацию загрязнителей. Полученные результаты представлены на рис. 3.

Таблица 2

Химический состав сорбата

№ п/п	Элемент	Концентрация, мг/л
1	Алюминий	216,29
2	Мышьяк	2,17
3	Кобальт	2,43
4	Медь	59,95
5	Железо	614,41
6	Свинец	0,98
7	Цинк	106,7

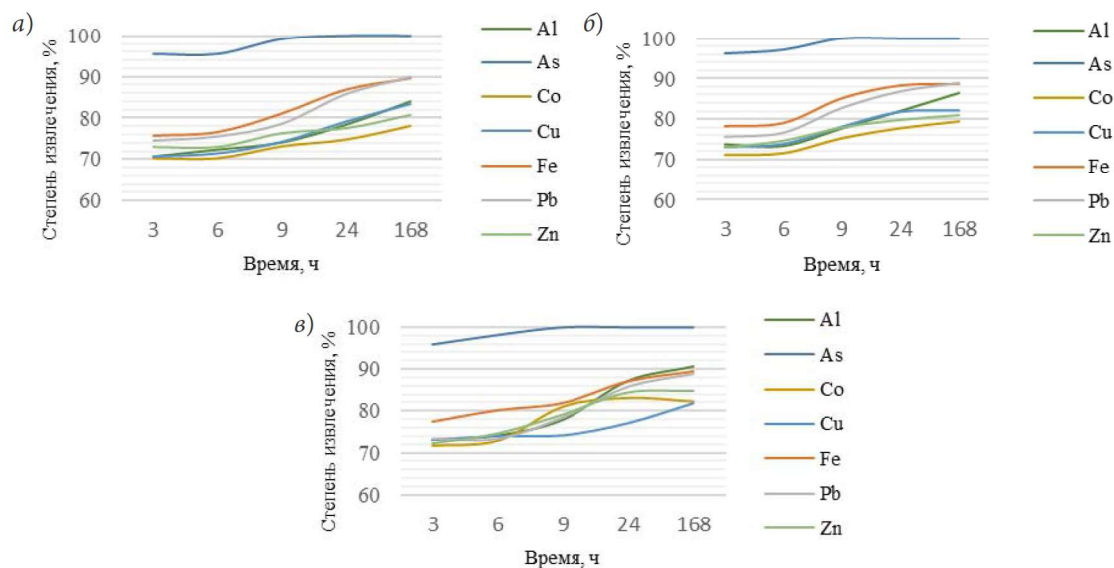


Рис. 2. Эффективность очистки поллютантов доменным шлаком в статических условиях в зависимости от температуры и времени: а — при 0 °С; б — при 10 °С; в — при 20 °С

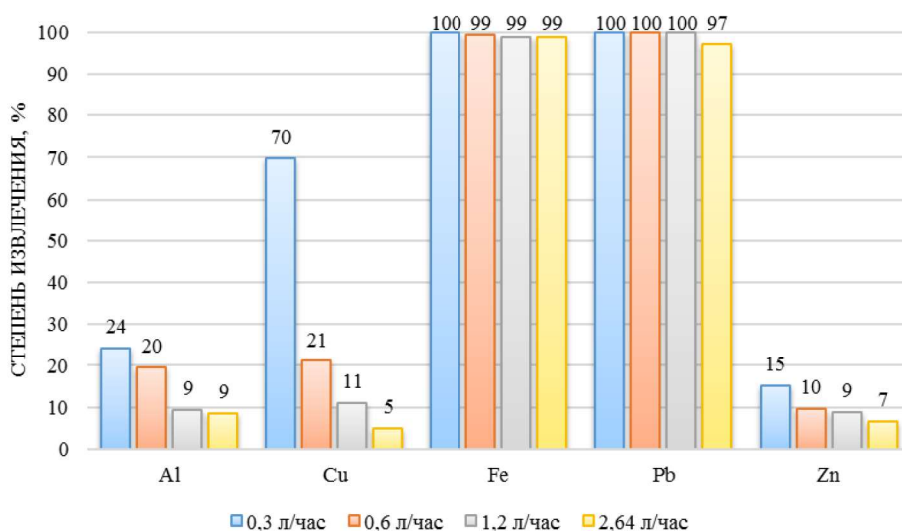


Рис. 3. Эффективность очистки поллютантов доменным шлаком в динамических условиях

Как видно из представленных графиков, после фильтрования подотвальных вод через доменный шлак концентрация поллютантов сократилась, причем эффективность фильтрования снижается с увеличением расхода фильтрата. Наиболее значительный эффект наблюдается при очистке стоков от железа и свинца (97–100 %). Из представленных данных можно сделать вывод, что доменный шлак можно использовать для сорб-

ции тяжелых металлов из стоков сложного химического состава, где загрязнители присутствуют в очень высоких и низких концентрациях, но необходимо регулировать расход сорбата для получения наилучшего эффекта. Замечено, что эффективность очистки в динамических условиях понижается по мере увеличения расхода сорбата, что связано с определенной скоростью физического и химического взаимодействия сорбента

с сорбатором. Оптимальный расход сорбатора составляет 0,3–1,2 л/ч. В процессе сорбции доменным шлаком тяжелых металлов происходит нейтрализация стока. Это еще один положительный эффект от применения материала. Величина рН при динамическом режиме испытаний повышается от 2,38 до 3,33–3,39 при расходе сорбатора 0,6–2,64 л/ч и до величины 5,62 при расходе сорбатора 0,3 л/ч.

Результаты исследований, представленные в данной статье, указывают на то, что доменный шлак позволяет эффективно удалить из подотвального стока значительную часть загрязнений как в статических, так и динамических условиях при одновременной нейтрализации рН стока.

Выводы

1. Исследована возможность применения доменного шлака для очистки кислых подотвальных стоков рудников Северного Урала от тяжелых металлов.

2. Изучены состав и структура доменного шлака.

3. Определена сорбционная способность доменного шлака в статических условиях в зависимости от температуры и вида поллютанта. Концентрация поллютантов снизилась в среднем на 80–90 %, наиболее опасный загрязнитель воды — мышьяк — удален полностью.

4. При динамическом режиме после фильтрования исходного стока доменным шлаком концентрация поллютантов снизилась в меньшей степени, чем при статическом. Наиболее значительный эффект наблюдается при очистке стоков от железа и свинца (97–100 %), поэтому доменный шлак можно использовать для сорбции тяжелых металлов из стоков сложного химического состава, где загрязнители присутствуют как в очень высоких, так и в низких концентрациях.

5. Результаты исследований указывают на то, что доменный шлак является перспективным материалом для сорбционных технологий, так как позволяет эффективно удалить

из подотвального стока значительную часть загрязнений в статических и динамических условиях при одновременной нейтрализации рН стока.

Библиографический список

1. Долгорев А. В. Вторичные сырьевые ресурсы в производстве строительных материалов: (физико-химический анализ). М.: Стройиздат, 1990. 456 с.
2. Дячок Н. Г., Пермяков А. А., Борискин И. К., Волюнкина Е. П. и др. К вопросу утилизации отходов алюминиевого производства в агломерации // Известия вузов. Черная металлургия. 1996. № 6. С. 1–7.
3. Волюнкина Е. П., Кудашкина С. А., Долгополов В. П., Дударев Ю. А. Система управления отходами доменного производства // Экология и промышленность России. 2000. № 3. С. 11–14.
4. Петров И. В. Вторичные ресурсы, образующиеся в горнодобывающей промышленности // Энциклопедия технологий. Эволюция и сравнительный анализ ресурсной эффективности промышленных технологий / гл. ред. Д. О. Скобелев. М.; СПб.: Реноме, 2019. С. 671–705.
5. Скобелев Д. О., Марьев В. А., Шубов Л. Я., Иванков С. И., Доронкина И. Г. Отходы горно-металлургической отрасли: систематизация технологических решений экологических задач. Часть I // Экологические системы и приборы. 2018. № 12. С. 29–37.
6. Зайнуллин Х. Н., Бабков В. В., Иксанова Е. М. Гальваношламы в керамзитовый гравий // Экология и промышленность России. 2000. № 1. С. 18–21.
7. Борисова В. Ю., Завальев В. Э., Кондакова Н. В., Хайсеров Л. Я. Анализ сорбционных свойств материалов природного и промышленного происхождения // Фундаментальные исследования. 2016. № 9-2. С. 233–237.
8. Воробьев А. Е., Каргинов К. Г., Ананикян С. А., Одинова Е. С. Оценка воздействия на окружающую среду предприятий горной промышленности // Экологическая экспертиза. 2002. № 3. С. 96–104.
9. Касиков А. Г. Эколого-экономический подход к решению задачи утилизации металлургических отходов медно-никелевого производства // Инженерная экология. 2002. № 4. С. 52–60.
10. Гельманова З. С., Филатов А. В. Проекты эффективного применения отходов промышленных предприятий, снижающие нагрузку на окружающую среду // Металлург. 2015. № 9. С. 16–19.
11. Леонтьев Л. И., Дюбанов В. Г. Техногенные отходы черной и цветной металлургии и проблемы окружающей среды // Экология и промышленность России. 2011. № 4. С. 32–35.
12. Emery J. J. Use of Mining and Metallurgical Wastes in Construction // Minerals and the Environment, Symposium. June 1974, London. Paper No. 18. 12 p.

13. Berseneva M. L., Vasilovskaya G. V., Klindukh N. Y., Terekhova I. I., Gumennaya E. Yu. Metallurgical Waste in Construction Industry // *Key Engineering Materials*. 2020. Vol. 839. Pp. 155–159. 10.4028/www.scientific.net/KEM.839.155.

14. Matinde E., Simate G. S., Ndlovu S. Mining and metallurgical wastes: A review of recycling and re-use practices // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2018. Vol. 118. No. 8. Pp. 825–844. 10.17159/2411-9717/2018/v118n8a5.

15. Кудрявский Ю. Т., Казанцев В. П., Трапезников Ю. Ф. и др. Очистка и обезвреживание сточных вод при переработке ванадийсодержащих отходов, продуктов и полиметаллического техногенного сырья. Проблемы и перспективы развития химических технологий на Западном Урале // *Сб. науч. тр. Пермского гос. ун-та*. Пермь: Изд-во Перм. гос. ун-та, 2001. С. 121–127.

16. Касиков А. Г. Очистка промышленных сточных вод с использованием отходов производства (обзор) // *Экология промышленного производства*. 2006. № 4. С. 28–36.

17. Кирюшина Н. Ю., Тарасова Г. И., Свергузова С. В. Шлаковые отходы в водоочистке // *Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова*. 2010. № 4. С. 140–145.

18. Morozova A. G., Lonzingier T. M., Skotnikov V. A., Sahu J. N., Mikhailov G. G., Schenk J. L., Bhattacharyya A., Kapelyushin Yu. E. Utilization of metallurgical slag with presence of novel $\text{CaO-MgO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ as a composite sorbent for wastewater treatment contaminated by cerium // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 255. 120286. ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120286>.

19. Жданкин Н. А. Инновационный подход к решению экологических проблем в металлургии // *Социально-экономические и экологические аспекты развития регионов и муниципальных образований: проблемы и пути их решения: материалы междунар. науч.-практ. конф. Москва, 31 марта 2016 г. Правдинский: Российский НИИ информации и техн.-экон. исследований по инж.-техн. обеспечению агропромышленного комплекса*, 2016. С. 166–177.

20. Ugya A. Y., Ajibade F. O., Ajibade T. F. Water pollution resulting from mining activity: an overview // *Proceedings of the 2018 Annual Conference of the School of Engineering & Engineering Technology (SEET). The Federal University of Technology, Akure, Nigeria*. 17–19 July 2018. Vol. 3. Pp. 703–718.

21. Akabzaa T. M., Banoeng-Yakubo B. K., Seyire J. S. Impact of Mining Activities on Water Resources in the Vicinity of the Obuasi mine // *West African Journal of Applied Ecology*. 2009. Vol. 11 (1). 10 p.

22. Bench D. W. PCBs, Mining, and Water Pollution // *Mine Design, Operations & Closure Conference, Polson, Montana*. April 27 — May 1 2003. 12 p.

23. Akcil A., Koldas S. Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and case studies // *Journal of Cleaner Production*. 2006. Vol. 14. Pp. 1139–1145.

24. Skousen J., Ziemkiewicz P., McDonald L. Acid mine drainage formation, control and treatment: Approaches and strategies // *The Extractive Industries and Society*. 2019. Vol. 6 (1). Pp. 241–249.

25. Skousen J. Overview of acid mine drainage treatment with chemicals // *Acid Mine Drainage, Rock Drainage, and Acid Sulfate Soils: Causes, Assessment, Prediction, Prevention, and Remediation*. Ed. by J. A. Jacobs, J. H. Lehr, S. M. Testa. Hoboken: Wiley, 2014. Pp. 325–337.

References

1. Dolgorev A. V. *Vtorichnye syr'evye resursy v proizvodstve stroitel'nykh materialov: (fiziko-khimicheskiy analiz)* [Secondary raw materials in the production of building materials: (physico-chemical analysis)]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1990, 456 p.

2. Dyachok N. G., Permyakov A. A., Boriskin I. K., Volynkina E. P., et al. *K voprosu utilizatsii otkhodov alyuminievogo proizvodstva v aglomeratsii* [On the issue of aluminum production waste recycling in agglomeration]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya – Bulletin of Higher Schools. Ferrous metallurgy*, 1996, no. 6, pp. 1–7.

3. Volynkina E. P., Kudashkina S. A., Dolgoplov V. P., Dudarev Yu. A. *Sistema upravleniya otkhodami domennogo proizvodstva* [Blast furnace waste management system]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii – Ecology and Industry of Russia*, 2000, no. 3, pp. 11–14.

4. Petrov I. V. *Vtorichnye resursy, obrazuyushchiesya v gornodobyvayushchey promyshlennosti* [Secondary resources formed in the mining industry]. *Entsiklopediya tekhnologiy. Evolyutsiya i sravnitel'nyy analiz resursnoy effektivnosti promyshlennykh tekhnologiy* [In: Encyclopedia of technology. Evolution and comparative analysis of the resource efficiency of industrial technologies]. Ed. by Skobelev D. O. Moscow, St. Petersburg, Renome Publ., 2019, pp. 671–705.

5. Skobelev D. O., Mar'ev V. A., Shubov L. Ya., Ivankov S. I., Doronkina I. G. *Otkhody gornometallurgicheskoy otrasli: sistematizatsiya tekhnologicheskikh resheniy ekologicheskikh zadach* [Waste of the mining and metallurgical industry: systematization of technological solutions to environmental problems]. Pt. I. *Ekologicheskie sistemy i pribory – Ecological systems and devices*, 2018, no. 12, pp. 29–37.

6. Zaynullin Kh. N., Babkov V. V., Iksanova E. M. *Gal'vanoshlamy v keramzitoviy graviy* [Galvanoslims in keramsite gravel]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii – Ecology and Industry of Russia*, 2000, no. 1, pp. 18–21.

7. Borisova V. Yu., Zavalyuev V. E., Kondakova N. V., Khayserova L. Ya. *Analiz sorbtsionnykh svoystv materialov*

prirodnogo i promyshlennogo proiskhozhdeniya [Analysis of sorption properties of materials of natural and industrial origin]. *Fundamental'nye issledovaniya – Fundamental Research*, 2016, no. 9-2, pp. 233–237.

8. Vorob'ev A. E., Karginov K. G., Ananikyan S. A., Odintsova E. S. *Otsenka vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu predpriyatiy gornoy promyshlennosti* [Environmental impact assessment of mining enterprises]. *Ekologicheskaya ekspertiza – Ecological expertise*, 2002, no. 3, pp. 96–104.

9. Kasikov A. G. *Ekologo-ekonomicheskiy podkhod k resheniyu zadachi utilizatsii metallurgicheskikh otkhodov medno-nikelevogo proizvodstva* [Ecological-economic approach to the solution of the metallurgical wastes utilization problem of copper-nickel production]. *Inzhenernaya ekologiya – Engineering Ecology*, 2002, no. 4, pp. 52–60.

10. Gel'manova Z. S., Filatov A. V. *Proekty effektivnogo primeneniya otkhodov promyshlennykh predpriyatiy, snizhayushchie nagruzku na okruzhayushchuyu sredu* [Projects of effective use of waste from industrial enterprises reducing the load on the environment]. *Metallurg – Metallurgist*, 2015, no. 9, pp. 16–19.

11. Leon'tev L. I., Dyubanov V. G. *Tekhnogennyye otkhody chyornoy i tsvetnoy metallurgii i problemy okruzhayushchey sredy* [Technogenic wastes of ferrous and non-ferrous metallurgy and environmental problems]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii – Ecology and Industry of Russia*, 2011, no. 4, pp. 32–35.

12. Emery J. J. Use of Mining and Metallurgical Wastes in Construction. *Minerals and the Environment, Symposium*, 1974, June, London. Paper no. 18, 12 p.

13. Berseneva M. L., Vasilovskaya G. V., Klindukh N. Y., Terekhova I. I., Gumennaya E. Yu. Metallurgical Waste in Construction Industry. *Key Engineering Materials*, 2020, vol. 839, pp. 155–159. 10.4028/www.scientific.net/KEM.839.155.

14. Matinde E., Simate G. S., Ndlovu S. Mining and metallurgical wastes: A review of recycling and re-use practices. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2018, vol. 118, no. 8, pp. 825–844. 10.17159/2411-9717/2018/v118n8a5.

15. Kudryavskiy Yu. T., Kazantsev V. P., Trapeznikov Yu. F., et al. *Ochistka i obezvrezhivanie stochnykh vod pri pererabotke vanadiysoderzhashchikh otkhodov, promproduktov i polimetallicheskogo syr'ya* [Wastewater treatment and neutralization in processing of vanadium-containing wastes, intermediate products and polymetallic technogenic raw materials]. *Trudy Permskogo gos. un-ta "Problemy i perspektivy razvitiya khimicheskikh tekhnologiy na Zapadnom Urale"* [Proceedings of the Perm State University "Problems and perspectives of chemical technologies development in Western Urals"]. Perm, Perm. gos. un-t Publ., 2001, pp. 121–127.

16. Kasikov A. G. *Ochistka promyshlennykh stochnykh vod s ispol'zovaniem otkhodov proizvodstva (obzor)* [Industrial wastewater treatment using industrial wastes (review)]. *Ekologiya promyshlennogo proizvodstva – Ecology of industrial production*, 2006, no. 4, pp. 28–36.

17. Kiryushina N. Yu., Tarasova G. I., Sverguzova S. V. *Shlakovyye otkhody v vodoochistke* [Slag wastes in water treatment]. *Vestnik BGTU im. V. G. Shukhova – Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov*, 2010, no. 4, pp. 140–145.

18. Morozova A. G., et al. Utilization of metallurgical slag with presence of novel CaO-MgO-SiO₂-Al₂O₃ as a composite sorbent for wastewater treatment contaminated by cerium. *Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 255, 120286. ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120286>

19. Zhdankin N. A. *Innovatsionniy podkhod k resheniyu ekologicheskikh problem v metallurgii* [Innovative approach to solving environmental problems in metallurgy]. *Trudy mezhdunar. nauch.-prakt. konf. "Sotsial'no-ekonomicheskie i ekologicheskie aspekty razvitiya regionov i munitsipal'nykh obrazovaniy: problemy i puti ikh resheniya"* Moskva, 31 marta 2016 g. [Proceedings of the sci.-practical conference "Socio-economic and environmental aspects of the development of regions and municipalities: problems and solutions" Moscow, March 31, 2016]. *Pravdinskiy Rossiyskiy NII informatsii i tekhn.-ekon. issledovaniy po inzh.-tekhn. obespecheniyu agropromyshlennogo kompleksa Publ.*, 2016, pp. 166–177.

20. Ugya A. Y., Ajibade F. O., Ajibade T. F. Water pollution resulting from mining activities: an overview. *Proceedings of the 2018 Annual Conference of the School of Engineering & Engineering Technology (SEET). The Federal University of Technology, Akure, Nigeria*. 2018, July 17–19, vol. 3, pp. 703–718.

21. Akabzaa T. M., Banoeng-Yakubo B. K., Seyire J. S. Impact of Mining Activities on Water Resources in the Vicinity of the Obuasi mine. *West African Journal of Applied Ecology*, 2009, vol. 11 (1), 10 p.

22. Bench D. W. PCBs, Mining, and Water Pollution. *Mine Design, Operations & Closure Conference*, Polson, Montana, 2003, April 27 - May 1, 12 p.

23. Akcil A., Koldas S. Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and case studies. *Journal of Cleaner Production*, 2006, vol. 14, pp. 1139–1145.

24. Skousen J., Ziemkiewicz P., McDonald L. Acid mine drainage formation, control and treatment: Approaches and strategies. *The Extractive Industries and Society*, 2019, vol. 6 (1), pp. 241–249.

25. Skousen J. Overview of acid mine drainage treatment with chemicals. *Acid Mine Drainage, Rock Drainage, and Acid Sulfate Soils: Causes, Assessment, Prediction, Prevention, and Remediation*. Ed. by J. A. Jacobs, J. H. Lehr, S. M. Testa. Hoboken: Wiley, 2014, pp. 325–337.