

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОТХОДОВ В ЦЕЛЯХ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ОТ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

А.В. Собенин<sup>1</sup>, Н.Ю. Антонинова<sup>1,2</sup>, А.В. Горбунов<sup>2</sup>, Д.Р. Якупов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт горного дела Уральского отделения РАН,  
Екатеринбург, Россия, e-mail: natal78@list.ru

<sup>2</sup> Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

**Аннотация:** Рассмотрены традиционные методы очистки сточных вод от тяжелых металлов, такие как химическое осаждение, флотация, ионный обмен, фильтрация и сорбция. Для каждого метода анализируются преимущества, недостатки и ограничения. Подчеркивается необходимость дополнительных исследований для совершенствования существующих методов и разработки новых технологий, обеспечивающих низкие затраты на обработку, высокую эффективность и минимальное воздействие на окружающую среду. Адсорбция представлена как эффективный метод, благодаря своей простоте, универсальности, высокой скорости удаления загрязнений и возможности многократного использования сорбентов. Однако подчеркивается важность использования недорогих материалов с высокой поглощающей способностью и разработки эффективных методов регенерации для продления срока службы адсорбентов и снижения затрат. Химическое осаждение, несмотря на экономическую выгоду за счет независимости от дополнительных факторов, таких как электроды или мембраны, характеризуется образованием большого количества осадка, требующего дополнительной обработки. Особое внимание уделяется возможностям использования отходов в этих процессах. Представлены исследования, посвященные использованию материалов для очистки сточных вод от металлов, в состав которых в основном входят отходы производств, такие как зола уноса, красные шламы, сталеплавильный шлак и другие. Отмечаются экологические и экономические преимущества такого подхода, но подчеркивается необходимость дополнительных исследований по оптимизации их использования в реальных сточных водах с многоэлементным составом.

**Ключевые слова:** тяжелые металлы, горнодобывающая промышленность, сточные воды, очистка, реагенты, сорбция, отходы производства, флотация.

**Благодарность:** Статья подготовлена в рамках Госзадания № 075-00412-22 ПР. Тема 2 (2022–2024). Разработка геоинформационных технологий оценки защищенности горнопромышленных территорий и прогноза развития негативных процессов в недропользовании (FUWE-2022-0002), пер. №1021062010532-7-1.5.1.

**Для цитирования:** Собенин А. В., Антонинова Н. Ю., Горбунов А. В., Якупов Д. Р. Использование производственных отходов в целях очистки сточных вод от тяжелых металлов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 12-1. – С. 47–66. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_121\_0\_47.

---

## The use of industrial waste in removal of heavy metals from wastewater

A.V. Sobenin<sup>1</sup>, N.Yu. Antoninova<sup>1,2</sup>, A.V. Gorbunov<sup>2</sup>, D.R. Yakupov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia, e-mail: natal78@list.ru

<sup>2</sup> Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia, e-mail:

---

**Abstract:** Traditional methods of wastewater treatment from heavy metals, such as chemical precipitation, flotation, ion exchange, filtration and sorption, are considered. Advantages, disadvantages and limitations are analyzed for each method. The need for additional research is emphasized to improve existing methods and develop new technologies that ensure low processing costs, high efficiency and minimal environmental impact. Adsorption is presented as an effective method due to its simplicity, versatility, high pollution removal rate and the possibility of repeated use of sorbents. However, the importance of using inexpensive materials with high absorption capacity and developing effective regeneration methods to extend the service life of adsorbents and reduce costs is emphasized. Chemical deposition, despite the economic benefit due to independence from additional factors such as electrodes or membranes, is characterized by the formation of a large amount of sediment requiring additional treatment. Special attention is paid to the possibilities of using waste in these processes. Research is presented on the use of materials for wastewater treatment from metals, which mainly include industrial waste such as fly ash, red sludge, steelmaking slag and others. The environmental and economic advantages of this approach are noted, but the need for additional research to optimize their use in real wastewater with a multi-element composition is emphasized.

**Key words:** heavy metals, mining, wastewater, purification, reagents, sorption, industrial waste, flotation.

**Acknowledgements:** The article was prepared within the framework of State Assignment No. 075-00412-22 PR. Topic 2 (2022-2024). Development of geoinformation technologies for assessing the security of mining areas and forecasting the development of negative processes in subsoil use (FUWE-2022-0002), reg. No. 1021062010532-7-1.5.1.

**For citation:** Sobenin A. V., Antoninova N. Yu., Gorbunov A. V., Yakupov D. R. The use of industrial waste in removal of heavy metals from wastewater. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(12-1):47-66. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_121\_0\_47.

---

### Введение

Предприятия минерально-сырьевого комплекса являются источниками крупнотоннажных отходов, представляющих собой, как правило, экономически не востребуемые материалы, и оказывающих негативное воздействие на окружающую среду при их размещении. Кроме того, все этапы добычи и обогащения полезных ископаемых связаны с обра-

зованием сточных вод, состав которых неразрывно связан с элементным составом месторождений. Среди них особую опасность представляют тяжелые металлы, такие как медь, кадмий, цинк, свинец и т.д. Кадмий — это токсичный металл, который может оказывать негативное воздействие на организм человека. Его острое воздействие связано с серьезными нарушениями функционирования раз-

личных систем, в частности, нервной системы, печени, почек и сосудов. При попадании кадмия в организм он накапливается в этих органах, что может привести к различным заболеваниям и нарушению их нормальной работы [1]. Цинк является важным микроэлементом, необходимым для нормального функционирования организма. Он играет ключевую роль во многих биохимических процессах, таких как синтез белков и поддержание иммунной функции. Однако избыточное содержание цинка также может вызвать негативные последствия для здоровья. Симптомы отравления цинком включают тошноту, рвоту, головную боль и расстройство желудочно-кишечного тракта [1]. Медь в больших количествах также может оказывать токсическое воздействие на печень [1]. Поэтому очистка сточных вод — это неотъемлемая часть технологического процесса, целью которого является снижение уровня загрязнения воды до степени, соответствующей санитарно-гигиеническим нормативам [2–4]. В связи с этим разработка экологически эффективных и экономически целесообразных технологий очистки воды достаточно актуальна [5–7].

## **Материалы и методы**

### *Сточные воды*

Согласно Водному кодексу РФ [47], сточные воды — это воды, которые попадают в водные объекты после использования. В эту категорию входят как дождевые, талые, инфильтрационные, поливомоечные и дренажные воды, так и сточные воды централизованной системы водоотведения, а также другие виды вод. Отведение (сброс) этих вод в водные объекты происходит после их использования, или, в случае дождевых, талых, инфильтрационных и дренажных вод, после стока с водосборной площади.

В статье рассматриваются сточные промышленные воды — это загрязнен-

ные воды, которые образуются во время производственных процессов на предприятиях. Количество таких вод варьируется в зависимости от вида производства и его масштабов [2–4].

### *Материалы*

В работе рассматриваются возможности использования в качестве материалов для очистки сточных вод от металлов:

- золы-уноса, являющейся отходом теплоэлектростанций (ТЭЦ) и государственных районных электростанций (ГРЭС);
- шлаков металлургического производства, которые образуются при переработке металлов;
- красных шламов, являющихся побочным продуктом производства алюминия.

### *Методы*

В обзоре рассматриваются различные способы очистки сточных вод от металлов, таких как медь, цинк, кадмий, никель, хром, свинец и железо.

Статья анализирует следующие методы удаления металлов:

- Ионный обмен: метод основан на использовании ионообменных смол для удаления ионов металлов из сточных вод.
- Флотация: метод, основанный на прикреплении частиц металла к пузырькам воздуха, что позволяет извлечь их из сточной воды.
- Сорбция: метод, основанный на поглощении металлов различными сорбентами (например, активированным углем).
- Химическое осаждение: метод, основанный на добавлении реагентов в сточную воду, которые вызывают осаждение металлов в виде нерастворимых соединений.
- Коагуляция: метод, основанный на добавлении реагентов, которые способ-

ствуют слипанию мелких частиц металла в более крупные, которые затем легче удалить.

- Мембранная очистка: метод, основанный на использовании мембран для разделения воды и растворенных в ней металлов.

- Фильтрация: метод, основанный на пропускании сточных вод через фильтрующие материалы для удаления твердых частиц металлов.

Обзор предоставляет конкретные примеры использования этих методов как в лабораторных, так и в опытно-промышленных условиях, опираясь на данные отечественных и зарубежных литературных источников.

### **Обзор способов очистки сточных вод от металлов**

При очистке сточных вод от тяжелых металлов (ТМ) прежде всего необходимо устранить их токсичность и минимизировать негативное воздействие на окружающую среду в соответствии с допустимыми нормами. Как правило, традиционные технологии очистки сточных вод от тяжелых металлов включают несколько методов, каждый из которых имеет свои особенности и применяется в зависимости от конкретных условий и характеристик сточных вод.

Метод ионного обмена основан на переходе ионов между твердой и жидкой фазами. В процессе обмена ионы тяжелых металлов, находящиеся в сточных водах, замещаются ионами применяемого материала [8]. В процессе флотации тяжелые металлы приводят в состояние, в котором они могут прилипнуть к пузырькам газа, который затем поднимается к поверхности жидкости, где образуется пена, содержащая эти металлы, и собирающаяся в конце процесса в специальные емкости [9]. Металлы также могут удаляться из сточных вод при помощи сорбентов, различной природы,

которые обычно разделяют на природные и синтетические [10].

Одними из наиболее применяемых методов являются химическое осаждение и коагуляция. Эти методы основаны на добавлении определенных химических реагентов, которые способствуют образованию осадка, содержащего тяжелые металлы [11]. В этом случае металлы становятся частью образовавшегося осадка, и в дальнейшем могут быть удалены с помощью фильтрации.

Метод фильтрации включают использование мембран для задерживания частиц из сточных вод. Он может быть довольно эффективен для удаления ТМ, особенно если они находятся в коллоидной форме [12].

Электрохимические методы — электроосаждение, электрофлотация и электросорбция, основанные на использовании электрической энергии для удаления ТМ из сточных вод [13]. Эти методы могут применяться как отдельно, так и в комбинации друг с другом, в зависимости от конкретных характеристик сточных вод, степени загрязнения и требований по очистке.

Химическое осаждение — это важный процесс, применяемый для удаления тяжелых металлов из сточных вод и систем водоснабжения. Суть этого метода заключается в превращении растворимых ионов металлов в нерастворимые соединения с использованием различных осаждающих агентов [14 — 16]. Однако эффективность химического осаждения зависит от различных факторов, таких как типы металлов, концентрация загрязнения и условия окружающей среды [14 — 16].

Результаты, представленные коллективом авторов [15], доказывают возможность очистки сточных вод от ТМ гидроксикарбонатом магния в качестве осадителя. Применяемая доза для успешного процесса удаления составила 0,30 г

на 50 мл сточных вод (что составляет 6000 мг/л). Стоит отметить, что реакции осаждения проходили полностью в течение 20 мин, и в этот интервал времени эффективность удаления ТМ превышала 99,9%. Полученный осадок, состоящий в основном из веществ, таких как  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$  и  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , далее может быть переработан в качестве вторичного сырья для металлургической промышленности.

Как известно, одним из наиболее важных параметров, регулирующих химическое осаждение, является pH. В работе авторов [16] эффективность удаления ТМ достигается путем осаждения их гидроксидами и сульфидами. Оптимальные условия, включая pH и дозировку, были определены с использованием теста «jaq». С этой целью было проведено испытание на двух различных видах химического осаждения: осаждение гидроксидом с использованием гидроксида натрия ( $\text{NaOH}$ ) и осаждение сульфидом с использованием сульфида натрия ( $\text{Na}_2\text{S}$ ). Эксперимент продемонстрировал, что оптимальное значение pH для удаления Cr, Cu и Ni при осаждении гидроксидами было равно 8,5, в то время как для осаждения сульфидами оптимальное значение pH составило 10. Дозировка материала (хлорид железа =  $\text{FeCl}_3$ ) для обеих форм осаждения составляла 0,8 мл. По итогам эксперимента было установлено, что при осаждении гидроксидом удаление ТМ составило Cr = 98,65%, Cu = 2,81% и Ni = 99,90%, в то время как при осаждении сульфидом достигнутые результаты составили Cr = 91,29%, Cu = 99,99% и Ni = 99,97%. Эти результаты показали успешность осаждения сульфидами хрома, меди и никеля по сравнению с осаждением гидроксидами, поскольку сульфиды имеют способность удалять ТМ в более широком диапазоне значений pH.

Авторами работы [17] изучается применение химического осаждения для од-

новременного удаления ТМ (Cu (II) и Zn (II)) из промышленных сточных вод. Эксперименты проводились в лабораторных условиях с использованием извести ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), каустической соды ( $\text{NaOH}$ ) и кальцинированной соды ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ). Результаты указывают на значительное повышение эффективности удаления меди и цинка при увеличении дозы осадочных реагентов в диапазоне 10 – 400 мг/л, что в итоге может привести к достижению эффективности более 90%. Очистка зависит от pH, и при высоких значениях pH ( $8 < \text{pH} < 10$ ) эффективность удаления меди для каждого осадочного агента чуть выше, чем для цинка, а концентрация соответствует нормативам. В результате образуется осадок, включающий аморфные гидроксиды цинка и меди ( $\text{Zn(OH)}_2$  и  $\text{Cu(OH)}_2$ ) – их присутствие подтверждено рентгеноструктурным анализом. Очистка сточных вод кальцинированной содой приводит к получению осадка большего размера, что может облегчить последующие этапы сушки и снизить общие затраты.

Таким образом, химическое осаждение представляет собой один из основных методов в процессе удаления ТМ из воды.

Ионная флотация – способ извлечения металлов из сточных вод с использованием поверхностно-активных веществ. В результате образуется концентрация ионов металлов на поверхности воды, что позволяет их удалять, так как они уже сконцентрированы на поверхности воды в виде пены [14]. Исследование [18] осуществлялось с целью определения оптимальных условий флотации Zn(II) путем проведения экспериментов в трубке Халлимонта.

В ходе работы было достигнуто удаление ионов Zn(II) более чем на 92%. Полученные результаты показали, что удаление ионов Zn(II) зависит от уровня скорости перемешивания и времени

флотации. Оказалось, что присутствие других ионов соли в растворе уменьшало удаление и снижало постоянную скорость флотации ионов  $Zn(II)$ .

Статья [19], опубликованная в *Journal of Environmental Health Science and Engineering* в 2013 г., представляет исследование, направленное на оптимизацию параметров ионной флотации для удаления кадмия из растворов сточных вод в лабораторных условиях. В ходе исследований была установлена высокая эффективность удаления  $Cd$  из растворов, достигшая 84%. Этот результат был достигнут при использовании реагента этанола в концентрации 0,4% и в соотношении 3:1. Важной составляющей процесса также стал оптимальный расход реагента, который составил 150 мл/мин.

Следовательно, ионная флотация является методом очистки сточных вод, который имеет ряд преимуществ, включая низкое энергопотребление, небольшие требования к площади, небольшой объем осадка и избирательное действие.

Мембранное разделение — усовершенствованный метод очистки воды. Этот метод основан на пропускании потока воды через полупроницаемые мембраны с определенными свойствами, такими как размер пор или электрический заряд, что позволяет проникать молекулам воды, но задерживает растворенные ионы металлов [14, 20–22].

В статье [21] представлено исследование, в ходе которого удалось создать фотокаталитическую мембрану на основе графитного углерода. Эта мембрана  $g-C_3N_4$  обладает многочисленными свойствами, которые включают большую удельную поверхность, хорошую гидрофильность, функциональные группы и, что особенно важно, фотокаталитическую способность. Исследователи использовали образец для фильтрации сточных вод, содержащих ионы меди. Результаты показали, что мембрана  $g-C_3N_4$  толщиной

около 310 нм обладает эффективностью при удалении ионов меди, превосходящей показатели коммерческих мембран. Она показала среднюю водопроницаемость  $47,82 \text{ л/м}^2 \text{ ч}^{-1} \text{ бар}^{-1}$  и средний коэффициент отбраковки 98,03% при концентрации ионов меди 2500 мг/л. Авторы также выделили три фактора, влияющих на скорость удаления ионов тяжелых металлов: адсорбцию за счет функциональных аминогрупп —  $C_3N_4$ , электростатическое отталкивание и стерический эффект.

Ультрафильтрация — это особый вид процессов фильтрации, где используется особая мембрана, чтобы разделить тяжелые металлы, большие молекулы и взвешенные твердые частицы с использованием различных сил, таких как давление или градиенты концентрации. В отличие от обычной фильтрации, ультрафильтрация работает на более мелком уровне. Обычно, поры в ультрафильтрационных мембранах имеют размеры от 5 до 20 нм [21].

Авторы работы [22] фокусируют свое исследование на влиянии pH и органических лигандов, таких как этилендиаминтетрауксусная кислота (ЭДТА), нитрилотриуксусная кислота (НТА) и лимонная кислота, на удаление и извлечение  $Cd(II)$  в процессе ультрафильтрации с применением полиэлектролита (PEUF). В данном исследовании полиэтиленимин (PEI) был использован в качестве хелатирующего полимера, способного взаимодействовать как с положительно заряженными ионами металлов через координационное связывание, так и с отрицательно заряженными комплексами лиганд-металл за счет притяжения заряда. Результаты исследования показывают, что удаление и извлечение  $Cd$  в значительной степени зависят от химического состава органических лигандов в зависимости от уровня pH раствора, особенно в контексте распределения

комплексов Cd-лиганд при различных уровнях pH. Также было отмечено, что в присутствии ЭДТА преобладающими видами Cd являются отрицательно заряженные  $\text{Cd}(\text{ЭДТА})^{2-}$  и  $\text{CdH}(\text{ЭДТА})^-$  в изученном диапазоне уровней pH, образуя взаимодействие с PEI путем электростатического притяжения, которое в меньшей степени зависит от уровня pH. С другой стороны, влияние pH как для систем NTA, так и для систем с лимонной кислотой подобно воздействию pH для системы без органических лигандов. Это связано с тем, что свободные ионы Cd преобладают в кислом диапазоне pH как в системах NTA, так и в системах с лимонной кислотой.

Наночистка представляет собой высокоэффективный метод очистки, основанный на воздействии давления и используемый в различных сферах промышленности, таких как химическая и биотехнологическая промышленность. Этот процесс является промежуточным между ультрафильтрацией и обратным осмосом. Обычно мембраны делают из синтетических полимеров, которые могут иметь положительный или отрицательный заряд на поверхности. Это помогает в диссоциации и удалении тяжелых металлов благодаря электростатическому взаимодействию между мембраной и ионами металлов [21].

В работе [23] представлены результаты успешной конструкции и тестирования новой положительно заряженной наночисточной (NF) мембраны. Мембрана создавалась совместным осаждением дубильной кислоты (ТА) и поливиниламина (PVAM) на своей поверхности, обеспечивая положительный заряд. Комбинация  $\text{Fe}^{3+}$  и  $\text{H}_2\text{O}_2$  ускорила этот процесс, что позволило регулировать структуру поверхности мембраны. Мембрана продемонстрировала значительные показатели удержания ионов ТМ, таких как  $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$  и  $\text{Ni}^{2+}$ ,

а также редкоземельных металлов, включая  $\text{Ce}^{3+}$ .

Осмоз — это физико-химический процесс, который наблюдается при наличии полупроницаемой мембраны, которая позволяет проходить только молекулам растворителя (например, воды), но не растворенным веществам. Процесс идет до тех пор, пока концентрированные и разбавленные растворы не достигнут равновесия, или разность концентраций не станет достаточно мала. В случае обратного осмоса этот процесс происходит наоборот. Мембраны обратного осмоса имеют размер пор от 0,1 до 1,0 нм и традиционно применяются в процессе опреснения. В настоящее время обратный осмос все шире используется для очистки сточных вод от ТМ, хотя его применение требует высокой энергии и давления [14]. Эффективность мембраны обратного осмоса зависит от материала и характеристик мембраны, pH, температуры и давления. Часто для предотвращения загрязнения мембраны проводят предварительную обработку сточных вод для удаления коллоидных частиц [14, 24].

В целях очистки модельных растворов сточных вод, загрязненных ионами меди (II), с применением метода обратного осмоса авторы [24] использовали мембранный тестер SEPA. Результаты исследования показали, что как поток пермеата, так и количество удаляемого Cu (II) были прямо пропорциональны рабочему давлению и температуре подачи, но обратно пропорциональны концентрации исходного сырья. Однако скорость подачи показала лишь незначительное влияние на поток пермеата и количество удаляемого Cu (II). На основе полученных данных были разработаны математические модели как для потока пермеата, так и для удаления Cu (II). Оказалось, что модель потока пермеата соответствовала экспериментальным

данным, в то время как модель удаления  $\text{Cu (II)}$  показала неидеальное соответствие.

Электрохимические методы очистки воды включают в себя три основных процесса: электрокоагуляцию, электрофлокуляцию и электроосаждение. Метод электрокоагуляции основан на использовании электрического тока для образования коагулянтов в воде. Это в свою очередь приводит к агломерации ионов металлов, что способствует их осаждению в виде флокул. Главное преимущество этого процесса заключается в том, что не требуется дополнительных реагентов, и коагулянт образуется непосредственно благодаря электрическому растворению расходующихся электродов. Образовавшийся осадок стабилен и легко удаляется. Однако существуют недостатки, включая необходимость периодической замены расходующегося анода [14].

В работе [25] проведено исследование, в котором анализировалось влияние различных параметров на эффективность удаления ионов цинка ( $\text{Zn}^{2+}$ ) и энергопотребление в процессе очистки. Авторы сосредоточили свое внимание на нескольких ключевых факторах: плотности тока, начальной концентрации ионов цинка, уровне pH раствора и электропроводности. Плотность тока изменялась в диапазоне от 2,1 до 12,5 мА/см<sup>2</sup>, начальная концентрация варьировала от 50 до 2000 мг/л, pH раствора от 2,9 до 7,4, электропроводность от 0,15 до 14,11 мкСм. При относительно низком энергопотреблении в 0,35 кВтч/м<sup>3</sup>, весь ион цинка ( $\text{Zn}^{2+}$ ) при начальной концентрации 50 мг/л был удален за 20 мин обработки методом электрокоагуляции при определенных условиях (плотность тока 8,3 мА/см<sup>2</sup> и pH 5,3). При более высоком потреблении энергии (0,88 кВтч/м<sup>3</sup>) весь ион цинка ( $\text{Zn}^{2+}$ ) при начальной концентрации 250 мг/л был удален за 50 мин.

Исследование также включало кинетический анализ скорости удаления иона цинка ( $\text{Zn}^{2+}$ ) при различных плотностях тока и начальных концентрациях. Были обнаружены различные механизмы удаления в зависимости от начальной концентрации: при низкой начальной концентрации ( $\leq 250$  мг/л) и высокой ( $\geq 500$  мг/л). В заключение авторы сделали вывод, что помимо эффекта осаждения при флокуляции гидроксида алюминия, электрохимическое восстановление иона цинка ( $\text{Zn}^{2+}$ ) на катоде также способствовало его удалению, особенно при высокой начальной концентрации.

Электрофлокуляция — метод удаления ионов тяжелых металлов из сточных вод, основанный на электрохимической коагуляции и образовании флокулянтов с помощью электрического тока. Для проведения процесса часто применяют алюминиевые или железные электроды, которые играют важную роль в формировании коагулянтов [14].

В работе [26] описано исследование, направленное на оценку эффективности технологии, называемой электрофлокуляцией с балластированием (BEF). Эта методика подразумевает использование алюминиевых (Al) электродов для удаления тяжелых металлов, таких как кадмий и цинк, из промышленных сточных вод, возникающих в процессе деятельности горнодобывающей отрасли. Процесс BEF основывается на оригинальном сочетании микропорошка и полимера, что значительно способствует увеличению массы образуемых хлопьев и ускоряет их осаждение. Результаты демонстрируют, что скорость потока и плотность тока оказывают преимущественное влияние на изменчивость качества отстаившейся воды.

Электроосаждение представляет собой метод удаления ионов тяжелых металлов из сточных вод, основанный на использовании электрического тока для



стимулирования осаждения загрязняющих веществ [14].

В работе [27] был предложен метод для очистки сточных вод, содержащих кадмий (Cd), с использованием мультиконцентрического цилиндрического электродного вращающегося слоя (МССЕ-РВ), способного создавать поля высокой силы тяжести. При оптимальных условиях эксплуатации, включая определенные значения параметров, таких как плотность тока, скорость циркуляции сточных вод, концентрация NaCl, значение pH и начальная концентрация Cd<sup>2+</sup>, эффективность удаления Cd<sup>2+</sup> составила 99,4% после 120-минутного электроосаждения.

Сорбционные методы основаны на способности специальных материалов (сорбентов) адсорбировать ионы металлов из водных растворов, что позволяет очищать сточные воды от загрязнений. Сорбенты для удаления ионов металлов могут быть как природного, так и синтетического происхождения. Природные сорбенты включают глины, торф, цеолиты, а также растительные и животные отходы. Синтетические сорбенты представлены полимерами, адсорбентами на основе углерода, оксидами металлов и функциональными сорбентами, разработанными специально для удаления тяжелых металлов из воды [28–30].

В работе [31] было проведено изучение эффективности двух пористых адсорбентов ZIF-8 и ZIF-67 в процессе удаления ионов свинца (Pb<sup>2+</sup>) и меди (Cu<sup>2+</sup>) из сточных вод. Результаты исследования показали, что адсорбционная способность ZIF-8 и ZIF-67 для Pb<sup>2+</sup> составляет 1119,80 и 1348,42 мг/г в насыщенном состоянии, соответственно, в то время как для Cu<sup>2+</sup> она составляет 454,72 и 617,51 мг/г, что оказалось значительно выше, чем у большинства других пористых материалов. Дополнительно было отмечено, что использование избыточ-

ного количества адсорбентов ZIF-8 и ZIF-67 способствует удалению более 99,4% Pb<sup>2+</sup> и 97,4% Cu<sup>2+</sup> из сточных вод. Установлено, что оба адсорбента демонстрируют быструю кинетику адсорбции, требуя всего несколько десятков минут для достижения адсорбционного равновесия. Эти результаты свидетельствуют о том, что ZIF-8 и ZIF-67 имеют высокую адсорбционную емкость и способны эффективно удалять ионы ТМ из сточных вод.

В работе [32] был представлен способ приготовления эмульсии каолинита с использованием песчаных отложений из Свейле (Западный Амман, Иордания). Полученный порошок нанокаолинита был использован в качестве адсорбента для удаления ионов металлов Cu(II), Zn(II) и Ni(II) из водных растворов. Термодинамические параметры подтвердили эндотермическую теплоту адсорбции, благоприятную при повышенных температурах. Дополнительно, кинетические данные исследования показали, что адсорбция ионов меди (Cu II), никеля (Ni II) и цинка (Zn II) на поверхности нанокаолинита наилучшим образом описывается уравнением псевдо-второго порядка.

В исследовании [33] был представлен метод синтеза нового адсорбента, основанного на магнитных наночастицах диоктилфталата триэтилентетрамина (DOP-ТЕТА-MNP). Этот адсорбент предназначен для эффективного удаления ионов цинка (Zn(II)) из водных растворов. Примечательно, что этот адсорбент может быть легко отделен от водного раствора с помощью магнитной сепарации при слабом магнитном поле. Равновесные данные сорбции ионов Zn(II) хорошо описываются моделью изотермы Ленгмюра. Эта модель предполагает образование монослоя адсорбированных ионов, в котором все активные места адсорбента покрыты частицами вещества, что обеспечивает эффективное удаление

ионов из раствора. Максимальная сорбционная способность монослоя для Zn(II) была оценена на уровне 24,21 мг/г при температуре 333 К. Термодинамические анализы подтвердили, что процесс адсорбции является экзотермическим и самопроизвольным. Это говорит о том, что адсорбция происходит с выделением тепла, что делает процесс более эффективным при повышении температуры. Таким образом, полученные данные подчеркивают эффективность и термодинамическую целесообразность использования адсорбента для удаления ионов цинка из водных растворов [33].

Преимущества сорбционных методов включают высокую эффективность удаления ионов металлов, широкий выбор сорбентов для различных условий и типов загрязнений, возможность использования как на малых, так и на крупных очистных сооружениях, а также возможность регенерации сорбентов для повторного использования. Среди недостатков можно выделить ограниченную емкость сорбентов, необходимость постоянной регенерации или утилизации использованных сорбентов, а также потенциальное образование вторичных загрязнений при обработке и утилизации отработанных сорбентов [28–30].

### **Использование производственных отходов в целях очистки сточных вод от тяжелых металлов**

Несмотря на то, что перечисленные методы имеют свои преимущества и ограничения, в настоящее время наблюдается значительный рост исследований, посвященных оценке возможности использования недорогих материалов, основанных на неиспользованных ресурсах в виде отходов различных производств.

В настоящее время большой интерес в качестве потенциального сырья стали

вызывать отходы производства [34, 35]. Зола-уноса, представляющая собой существенную часть отходов, образуемых тепловыми электростанциями (ТЭС) и государственными районными электростанциями (ГРЭС), часто размещается в золоотвалах без последующего применения, что негативно влияет на состояние окружающей среды [36].

Исследование [37] посвящено использованию модифицированной ультразвуком золы-уноса от твердых бытовых отходов (MSWI) для адсорбции ионов меди Cu (II). Авторы работы осуществили систематическое изучение влияния различных параметров на процесс адсорбции ионов меди. К числу исследуемых в целях оценки эффективности модифицированной золы-уноса MSWI факторов относятся pH среды, время адсорбции, начальная концентрация и температура. Особенно важным является вывод о повышенной адсорбционной способности при низких значениях pH. Анализ псевдо-кинетической модели второго порядка и использование модели Ленгмюра позволили оценить и спрогнозировать адсорбционные свойства модифицированной золы-уноса MSWI для ионов меди.

Статья [38] посвящена исследованию адсорбции свинца (II) и цинка (II) из бинарной системы с использованием модифицированного NaOH CFA (MCFA). Исследование включало ряд испытаний на адсорбцию для оценки влияния pH и времени контакта. Результаты эксперимента показали, что химическая обработка CFA NaOH привела к увеличению объема пор вещества, адсорбирующего металлы, что дало значительный прирост — от 0,021 до 0,223 см<sup>3</sup>/г. Такая модификация также способствовала повышению доступности функциональных групп как в минералах, так и в несгоревшем углероде, что, в свою очередь, позволило адсорбировать почти 100%

свинца (II) и 97% цинка (II). Оптимальным значением pH для адсорбционной системы оказалось  $\text{pH} = 3$ , а квазиравновесие наступало через 240 мин.

Исследование [39] было сконцентрировано на разработке эффективного метода удаления  $\text{Cd}^{2+}$  из сточных вод. Для этой цели был использован новый адсорбент — низкотемпературная летучая зола, модифицированная гидроксидом натрия (SHM-FA). Анализы SHM-FA показали, что адсорбент обладает пористой структурой и значительной удельной поверхностью. Также обнаружено, что SHM-FA обладает аморфной структурой, а Si-O и Al-O в золе растворены, что значительно улучшает его адсорбционную способность для  $\text{Cd}^{2+}$ . Результаты исследования показали, что SHM-FA обладает высокой эффективностью удаления  $\text{Cd}^{2+}$ , а эффективность адсорбции существенно зависит от дозировки, pH, концентраций  $\text{Cd}^{2+}$  и температуры. Таким образом, SHM-FA представляет собой перспективный и недорогой адсорбент для удаления  $\text{Cd}^{2+}$  из сточных вод.

В процессе выплавки стали, осуществляемом в доменных печах, электродуговых печах или конвертерных печах, образуются шлаки, представляющие собой побочный продукт данного производства. Шлаки, такие как CaO,  $\text{SiO}_2$ , FeO,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , MgO, являются результатом взаимодействия различных материалов, используемых в процессе выплавки, и играют важную роль в металлургическом цикле. Большие объемы шлака создают проблему с его утилизацией и окончательной обработкой, несмотря на потенциальную возможность использования в строительстве и при укладке автомобильных дорог. Исследования в области утилизации и переработки стального шлака достаточно актуальны, а одним из направлений является возможность вовлечения в хозяйственный оборот в качестве добавки в строительных

материалах или при производстве цемента [40].

В настоящее время шлак активно исследуется как потенциально недорогой и эффективный материал для удаления ионов тяжелых металлов из водных растворов и сточных вод. Это направление в использовании шлаков открывает возможности для решения проблем загрязнения окружающей среды и управления отходами. Химический состав шлака, который включает оксиды различных элементов, таких как кальций (CaO), кремний ( $\text{SiO}_2$ ), железо (FeO,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), алюминий ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) и магний (MgO), также играют важную роль в связывании ионов тяжелых металлов и улучшают физико-химические свойства шлака [40, 41].

В статье [41] обосновывается применение модифицированного шлака электродуговой печи в качестве адсорбента для удаления никеля и цинка из промышленных сточных вод. Ученые провели экспериментальные и термодинамические оценки эффективности удаления тяжелых металлов при различных условиях, включая температуру. Для промышленных испытаний они оптимизировали время контакта, концентрацию ионов металла, количество адсорбента, размер частиц адсорбента, температуру, pH и т.д. Кинетические исследования указали на то, что адсорбция, скорее всего, коррелирует с псевдопервопорядковой моделью и с моделью адсорбции Фрейндлиха.

Статья [42] представляет интересное исследование по использованию шлаков металлургической промышленности, активированных щелочью для создания монолитных пен. Исследование показывает, что эти монолиты демонстрируют высокую эффективность улавливания ионов металлов, таких как Cu(II), Fe(III), Ni(II) и Mn(II) на уровне до 80–100% для одноионных и до 98–100% — для

многоионных растворов, имитирующих концентрации металлов в шахтных сточных водах. Авторы подчеркивают, что металлы улавливаются в нейтральной форме путем осаждения на поверхности монолита и удерживания их в его пористой структуре.

В [43] было протестировано влияние термической обработки шлака на удаление кадмия из водного раствора с помощью трех типов обработанных шлаков (SA, SN и SF) при различных температурах (500—1000 °C). Результаты доказывают, что термическая обработка шлака приводит к изменениям его характеристик, а именно формированию кристаллических фаз  $\text{SiO}_2$ , клинопирексена, ларнита,  $\text{CaSiO}_3$ ,  $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$ ,  $\text{Ca}_8\text{Si}_5\text{O}_{18}$  и оливина. Результаты исследования указали на сложный механизм адсорбции  $\text{Cd(II)}$  на шлаковых материалах, включая как химическую адсорбцию (псевдо-второго порядка), так и диффузию внутри частиц. Адсорбция  $\text{Cd(II)}$  была описана согласно моделям Ленгмюра, Темкина или Фрейндлиха.

Красные шламы представляют собой побочный продукт, который образуется в процессе производства алюминия. Они являются результатом переработки бокситов — основных руд, из которых добывается алюминий. Одной из ключевых особенностей красных шламов является высокое содержание в них оксидов железа. Это свойство делает их весьма перспективными в экологических технологиях, особенно в сфере очистки сточных вод [44].

В статье [44] авторы разработали новый метод улучшения характеристик хемосорбции ионов  $\text{Cd(II)}$  с использованием композитов, полученных из красного шлака (red mud) и полиакриловой кислоты (PAA). В ходе исследования провели периодические измерения равновесия  $\text{RM/PAA}$  и анализ их характеристик с помощью различных методов, вклю-

чая сканирующую электронную микроскопию, метод Брунауэра–Эммета–Теллера, рентгеновскую дифракцию, инфракрасное преобразование Фурье и рентгенофотонную спектроскопию. Установлено, что максимальная адсорбционная способность композитов  $\text{RM/PAA}$  составила  $96,15 \text{ мг г}^{-1}$ . Скорость адсорбции  $\text{Cd(II)}$  увеличивалась с повышением температуры раствора, и адсорбция следовала кинетике псевдо-второго порядка. Экспериментальные данные согласуются с моделью изотермы Ленгмюра, указывая на монослойный адсорбционный механизм. Эти результаты позволяют считать композиты  $\text{RM/PAA}$  недорогими и эффективными адсорбентами для удаления ионов  $\text{Cd(II)}$  из водных растворов.

В этом исследовании [45] авторы применили модифицированный перманганатом калия красный шлам (MRM) в качестве адсорбента для эффективного удаления ионов кадмия ( $\text{Cd}^{2+}$ ) из водных растворов. Для изучения влияния различных факторов на процесс удаления  $\text{Cd}^{2+}$  с помощью MRM, таких как дозировка, начальный pH и начальная концентрация ионов  $\text{Cd}^{2+}$ , были проведены эксперименты по адсорбции. Результаты анализов [45] показали, что MRM имеет более шероховатую поверхность, большую удельную поверхность и объем пор ( $38,91 \text{ м}^2 \text{ г}^{-1}$ ,  $0,02 \text{ см}^3 \text{ г}^{-1}$ ) по сравнению с  $\text{RM}$  ( $10,22 \text{ м}^2 \text{ г}^{-1}$ ,  $0,73 \text{ см}^3 \text{ г}^{-1}$ ). Эксперименты показали, что равновесная адсорбционная способность MRM для  $\text{Cd}^{2+}$  значительно увеличилась до  $46,36 \text{ мг г}^{-1}$ , что почти в три раза превышает показатели для  $\text{RM}$ . Согласно результатам моделирования, кинетическая модель псевдо-второго порядка описывала процесс адсорбции лучше, чем модель псевдо-первого порядка. Модель Ленгмюра хорошо соответствовала изотермам адсорбции, указывая, что процесс адсорбции представляет собой адсорбцию на

одномолекулярный слой, и максимальная емкость составляет 103,59 мг г<sup>-1</sup>. Термодинамические параметры показали, что процесс адсорбции улавливает тепло и происходит спонтанно.

В работе [46] авторы акцентируют внимание на сложности процесса отделения красного шлама после его адсорбции из водных растворов. Традиционные методы, такие как центрифугирование и фильтрация, не всегда эффективны, и могут быть затруднительными. В связи с этим исследователи предлагают альтернативный подход к переработке красного шлама – гидротермальный метод. Структурный анализ красного шлама показал, что он слабо намагничен и состоит из андрадита, мусковита, гематита и канкринита. После гидротермальной обработки андрадит был восстановлен и преобразован в магнетит и моримтоит. С увеличением гидротермальной температуры происходило ускоренное растворение андрадита, а размер кристаллитов магнетита увеличивался. При гидротермальной температуре 200°C адсорбент P-200 оказался магнитным и демонстрировал желаемую намагниченность насыщения, что позволяет легко отделять его от воды магнитным путем после адсорбции. Эксперименты по адсорбции показали, что максимальная адсорбционная способность P-200 по Zn<sup>2+</sup> составила 89,6 мг/г, что в 8 раз выше, чем у необработанного красного шлама. Адсорбция Zn<sup>2+</sup> P-200 соответствовала модели Ленгмюра, что указывает на катионный обмен как основной механизм адсорбции. Это означает, что P-200 обладает наилучшей адсорбционной способностью по Zn<sup>2+</sup>, и может использоваться в качестве практического адсорбента для реальных применений [46].

### **Заключение**

Из обзора литературы можно сделать вывод, что каждый метод удаления ме-

таллов имеет как преимущества, так и недостатки. Выбор оптимального метода очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов обусловлен комплексом факторов, среди которых: стоимость эксплуатации, начальная концентрация ионов металлов, воздействие на окружающую среду, значения pH, добавляемые химические вещества, эффективность удаления и экономическая целесообразность.

Адсорбция – это один из наиболее перспективных методов очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов. Ее выбор объясняется рядом преимуществ: простота применения, широкая сфера использования, высокая скорость удаления загрязнений и возможность многократного использования материалов. Однако эффективность адсорбции зависит от нескольких факторов. Прежде всего, необходимо использовать недорогие материалы с высокой поглощающей способностью. Важно также разработать эффективные методы регенерации адсорбентов, чтобы максимально продлить их срок службы и снизить затраты на очистку.

Химические методы, в особенности химическое осаждение, считаются многими авторами экономически выгодными, поскольку их эффективность зависит от типа используемого химического вещества, а не от дополнительных факторов, таких как электроды, мембраны или электроэнергия. Однако они производят большое количество осадка, что требует дополнительной обработки.

Рассмотренные материалы имеют ряд преимуществ:

- Экологическая устойчивость: использование отходов производства для очистки воды способствует уменьшению их объемов и снижению негативного воздействия на окружающую среду.

- Экономическая эффективность: использование невостребованных ресур-

сов снижает затраты на закупку и производство природных материалов, а также логистику, так как большинство из них возможно применять непосредственно на участке их образования, что позволит акцентировать внимание на безотходности производства.

Однако, существуют и недостатки:

- Как правило, отходы имеют различные состав и свойства в зависимости от их происхождения и методов обработки, что может затруднять их повсеместное использование.
- Предварительная обработка отходов/модификация увеличивает трудоемкость процесса и, как следствие, экономические затраты.

Несмотря на множество исследований по очистке сточных вод от ионов тяжелых металлов, существует серьез-

ный пробел в знаниях о том, как эффективно удалять эти загрязнители из реальных сточных вод. Большинство исследований проводилось на модельных растворах, созданных из химических реактивов, которые содержали один или несколько видов металлов.

Таким образом, актуальность исследований по использованию промышленных отходов для очистки воды не вызывает сомнения, поскольку это позволяет снизить негативное воздействие на окружающую среду. Особое внимание необходимо уделить изучению реальных сточных вод, содержащих разнообразные загрязнители. Разработка эффективных методов очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов требует дополнительных исследований с использованием реальных стоков.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Габараева З. Г., Макиева Д. Ч.* Действие тяжелых металлов на организм человека // Образование и право. — 2020. — № 11. — С. 302–304. DOI: 10.24411/2076-1503-2020-11146.
2. *Лин М. М., Фарносова Е. Н., Каграманов Г. Г.* Очистка сточных вод от тяжелых металлов методами нанофильтрации и ионного обмена // Химическая промышленность сегодня. — 2017. — № 8. — С. 30–35.
3. *Фадеев А. Б., Кузин Е. Н., Кручинина Н. Е., Носова Т. И., Костылева Е. В.* Оценка эффективности методов очистки сточных вод гальванического производства от аммиачно-тарtratных комплексов меди (II) // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Естественные науки. — 2020. — № 5(92). — С. 97–108. DOI: 10.18698/1812-3368-2020-5-97-108.
4. *Мухамедов К. Г., Насирова Н. К., Мухамедов Ж. К., Абдурахманов О. Х.* Очистка сточных вод гальванических производств реагентным методом // Universum: технические науки. — 2023. — № 7-3(112). — С. 51–56.
5. *Овчинников А. С., Бочарников В. С., Денисова М. А., Бочарников О. В., Козинская О. В.* Сравнительная экономическая оценка различных природных сорбентов для очистки сточных вод // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. — 2020. — № 2(58). — С. 65–72. DOI: 10.32786/2071-9485-2020-02-06.
6. *Степанов С. В., Авдеенков П. П., Пономаренко О. С., Морозова К. М.* Оптимизация и технико-экономическая оценка технологических схем очистки сточных вод предприятия глубокой переработки куриных яиц // Водоснабжение и санитарная техника. — 2023. — № 5. — С. 37–47. DOI: 10.35776/VST.2023.05.05.
7. *Хорохорина И. В., Лазарев С. И., Филимонова О. С., Брянкин К. В.* Технологическое оформление и экономическая оценка электромембранных методов очистки промышленных сточных вод от тяжелых металлов и АПАВ // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. — 2023. — № 2(88). — С. 19–28. DOI: 10.17277/voprosy.2023.02.pp.019-028.
8. *Натареев С. В., Бакин М. А., Снегирев Д. Г.* Разработка математической модели ионообменной очистки воды от солей тяжелых металлов в емкостном аппарате // Пожарная и аварийная безопасность. — 2021. — № 1(20). — С. 27–31.

9. Медяник Н. Л., Тусупбаев Н. К., Варламова И. А. Гиревая Х. Я., Калугина Н. Л. Удаление тяжелых металлов из растворов методом ионной флотации // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2016. – Т. 14. – № 1. – С. 18–26. DOI: 10.18503/1995-2732-2016-14-1-18-26.
10. Дагаева Е. В., Валинурова Э. Р. Сорбция ионов меди (II) на природном и модифицированных цеолитах месторождения Хонгуруу // Вестник Башкирского университета. – 2019. – Т. 24. – № 1. – С. 71–75.
11. Смирнова Н. Н., Небукина И. А., Шиганова Е. А. Сравнительная эффективность применения реагентных методов в процессах очистки сточных вод гальванических производств от ионов меди (II) // Вода: химия и экология. – 2016. – № 8(98). – С. 32–37.
12. Ates N., Uzal N. Removal of heavy metals from aluminum anodic oxidation wastewaters by membrane filtration // Environmental Science and Pollution Research. 2018, vol. 25, no. 22, pp. 22259–22272. DOI: 10.1007/s11356-018-2345-z.
13. Мейрамкулова К. С., Аубакирова К. М., Усербаев М. Т., Саябаев К. М. Эффективность очистки сточных вод убойного цеха птицефабрики электрохимическим методом // Известия Международной академии аграрного образования. – 2018. – № 42-2. – С. 55–60.
14. Lavinia L., Cocheci L. Heavy metals removal from water and wastewater / Heavy Metals – Recent Advances. Intech Open, 2023. DOI: 10.5772/intechopen.110228.
15. Zhang Y, Duan X. Chemical precipitation of heavy metals from wastewater by using the synthetic magnesium hydroxy carbonate // Water Science and Technology. 2020, vol. 81, no. 6, pp. 1130–1136. DOI: 10.2166/wst.2020.208.
16. Mohd Yatim S. R., Kasmuri S. N. H., Syahjidan H. N., Mokhtar N. S., Zainuddin N. A. Removing copper, chromium and nickel in industrial effluent using hydroxide precipitation versus sulphide precipitation // Health Scope. 2020, vol. 3, pp. 54–60.
17. Benalia M. C., Youcef L., Bouaziz M. G. Achour S. Menasra H. Removal of heavy metals from industrial wastewater by chemical precipitation: Mechanisms and sludge characterization // Arabian Journal for Science and Engineering. 2022, vol. 47, pp. 5587–5599. DOI: 10.1007/s13369-021-05525-7.
18. Hoseinian F. S., Irannajad M., Safari M. Effective factors and kinetics study of zinc ion removal from synthetic wastewater by ion flotation // Separation Science and Technology. 2016, vol. 52, no. 5, pp. 892–902. DOI: 10.1080/01496395.2016.1267216.
19. Salmani M. H., Davoodi M., Ehrampoush M. H. Ghaneian M. T., Fallahzadah M. H. Removal of cadmium (II) from simulated wastewater by ion flotation technique // Journal of Environmental Health Science and Engineering. 2013, vol. 10, no. 16. DOI: 10.1186/1735-2746-10-16.
20. Mulungulungu G. A., Mao T., Han K. Efficient removal of high-concentration copper ions from wastewater via 2D g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> photocatalytic membrane filtration // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2021, vol. 623, article 126714. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2021.126714.
21. Xiang H. Min X., Tang Chong-Jian, Sillanpää M. Recent advances in membrane filtration for heavy metal removal from wastewater. A mini review // Journal of Water Process Engineering. 2022, vol. 49, no. 6, article 103023. DOI: 10.1016/j.jwpe.2022.103023.
22. Chi-Wang L., Chia-Hsien C., Kwang-Ho C., Wei-Shuen Y. Polyelectrolyte enhanced ultrafiltration (PEUF) for the removal of Cd(II): Effects of organic ligands and solution pH // Chemosphere. 2008, vol. 72, no. 4, pp. 630–635. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2008.02.036.
23. Jiao Y., Yang J., Zhang J., Li J., Qin S., Wu X., Cui Z. Removal of heavy metal ions from acidic wastewater by constructing positively charged hollow fiber nanofiltration separating-layer based on Fe (III)/co deposition-quaternization // Journal of Water Process Engineering. 2023, vol. 56, article 104450. DOI: 10.1016/j.jwpe.2023.104450.
24. Harharah R. H., Abdalla G. M. T., Elkhaleefa A., Shigidi I., Harharah H. N. A study of copper (ii) ions removal by reverse osmosis under various operating conditions // Separations. 2022, vol. 9, no. 6, article 155. DOI: 10.3390/separations9060155.
25. Chen X., Ren P., Li T., Tremblay J. P., Liu X. Zinc removal from model wastewater by electrocoagulation: Processing, kinetics and mechanism // Chemical Engineering Journal. 2018, vol. 349, pp. 358–367. DOI: 10.1016/j.cej.2018.05.099.
26. Brahmi K., Bouguerra W., Harbi S., Elaloui E., Loungou M., Hamrouni B. Treatment of heavy metal polluted industrial wastewater by a new water treatment process: ballasted electrofloccula-

tion // Journal of Hazardous Materials. 2018, vol. 15, no. 344, pp. 968–980. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2017.11.051.

27. Wu C., Gao J., Liu Y., Jiao W., Su G., Zheng R., Zhong H. High-gravity intensified electro-deposition for efficient removal of Cd<sup>2+</sup> from heavy metal wastewater // Separation and Purification Technology. 2022, vol. 289, article 120809.

28. Ahmed S., Aktar S., Zaman S. Jahan R. A., Bari M. L. Use of natural bio-sorbent in removing dye, heavy metal and antibiotic-resistant bacteria from industrial wastewater // Applied Water Science. 2020, vol. 10, article 107. DOI: 10.1007/s13201-020-01200-8.

29. Hamidi D., Honarasa F. Natural bitumen as an available low cost sorbent for remediation of heavy metal cations // Iranian Journal of Science and Technology Transactions a Science. 2020, vol. 44, pp. 687–694. DOI: 10.1007/s40995-020-00888-2.

30. Topka P., Soukup K., Hejtmánek V., Hlásenský I., Kaštánek F., Šolcová O. Remediation of brownfields contaminated by organic compounds and heavy metals: a bench-scale test of a sulfur/vermiculite sorbent for mercury vapor removal // Environmental Science and Pollution Research. 2020, vol. 27, pp. 42182–42188. DOI: 10.1007/s11356-020-10696-1.

31. Huang Y., Zeng X., Guo L., Lan J., Zhang L., Cao D. Heavy metal ion removal of wastewater by zeolite-imidazolate frameworks // Separation and Purification Technology. 2018, vol. 194, pp. 462–469. DOI: 10.1016/j.seppur.2017.11.068.

32. Alasadi A. M., Khaili F. I., Awwad A. M. Adsorption of Cu(II), Ni(II) and Zn(II) ions by nano kaolinite: Thermodynamics and kinetics studies // Chemistry International. 2019, vol. 5, no. 4, pp. 258–268. DOI: 10.5281/zenodo.2644985.

33. Ghasemi N., Ghasemi M., Moazeni S., Ghasemi P., Alharbi N. S., Gupta V. K., Agarwal S., Burakova I. V., Tkachev A. G. Zn (II) removal by amino-functionalized magnetic nanoparticles: Kinetics, isotherm, and thermodynamic aspects of adsorption // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2018, vol. 62, no. 1, pp. 302–310. DOI: 10.1016/j.jiec.2018.01.008.

34. Антонинова Н. Ю., Собенин А. В., Усманов А. И., Горбунов А. А. Обоснование возможности применения отходов производства гуминовых препаратов для очистки сточных вод от металлов (Cd<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>) с целью разработки эффективных мероприятий по экологической реабилитации // Записки Горного института. – 2024. – Т. 267. – С. 421–432. EDN NYTBJH.

35. Антонинова Н. Ю., Собенин А. В., Усманов А. И., Шепель К. В. Оценка возможности использования отходов железо-магниевого производства для очистки сточных вод от тяжелых металлов (Cd<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Co<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>) // Записки Горного института. – 2023. – Т. 260. – С. 257–265. DOI: 10.31897/PMI.2023.34.

36. Фоменко Е. В., Аншиц Н. Н., Соловьёв Л. А., Михайлова О. А., Аншиц А. Г. Состав и строение оболочки ценофосф золь-уноса от сжигания угля Кузнецкого бассейна // Химия твердого топлива. – 2014. – № 2. – С. 55. DOI: 10.7868/S0023117714020030.

37. Lin Sh., Lu Ya., Zheng L., Long L., Jiang X., Yan J. Mechanism study of Cu (II) adsorption from acidic wastewater by ultrasonic-modified municipal solid waste incineration fly ash // Chinese Journal of Chemical Engineering. 2023, vol. 67, pp. 157–165. DOI: 10.1016/j.cjche.2023.11.019.

38. Astuti W., Chafidz A., Wahyuni E. T., Prasetya A., Bendiyasa I. M., Abasaed A. E. Methyl violet dye removal using coal fly ash (CFA) as a dual sites adsorbent // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2019, vol. 7, no. 5, article 103262. DOI: 10.1016/j.jece.2019.103262.

39. Zhao H., Huang X., Zhang G., Li J., He Z., Ji P. Possibility of removing cadmium pollution from the environment using a newly synthesized material coal fly ash // Environmental Science and Pollution Research. 2020, vol. 27, pp. 4997–5008. DOI: 10.1007/s11356-019-07163-x.

40. Zheng R., Lü J., Song W., Liu M., Li H., Liu Y., Lü X., Ma Z. Metallurgical properties of CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-4.6wt%MgO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> slag system pertaining to spent automotive catalyst smelting // International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. 2023, vol. 30, pp. 886–896. DOI: 10.1007/s12613-022-2569-2.

41. Changalvaei M., Nilforoushan M. R., Arabmarkadeh A., Tayebi M. Removal of Ni and Zn heavy metal ions from industrial waste waters using modified slag of electric arc furnace // Materials Research Express. 2021, vol. 8, no. 5, article 055506. DOI: 10.1088/2053-1591/abf520.

42. Latorrata S., Balzarotti R., Adami M., Marino B., Mostoni S., Scotti R., Bellotto M., Cristiani C. Wastewater treatment using alkali-activated-based sorbents produced from blast furnace slag // Applied Sciences. 2021, vol. 11, no. 7, article 2985. DOI: 10.3390/app11072985.



43. Czech B., Hojamberdiev M., Bogusz A. Impact of thermal treatment of calcium silicate-rich slag on the removal of cadmium from aqueous solution // *Journal of Cleaner Production*. 2018, vol. 200, no. 1, pp. 369–379. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.07.309.
44. Liu J., Xie Y., Li C., Fang G., Chen Q., Ao X. Novel red mud/poly-acrylic composites synthesized from red mud and its performance on cadmium removal from aqueous solution // *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*. 2019, vol. 95, pp. 213–222. DOI: 10.1002/jctb.6223.
45. Pang Y., Zhao C., Li Y., Li Q., Bayongzhong X., Peng D. Cadmium adsorption performance and mechanism from aqueous solution using red mud modified with amorphous MnO<sub>2</sub> // *Scientific Reports*. 2022, vol. 12, article 4424. DOI: 10.1038/s41598-022-08451-2.
46. Dong W., Liang K., Qin Y., Ma H., Zhao X., Zhang L., Zhu S., Yu Y., Bian D., Yang J. Hydrothermal conversion of red mud into magnetic adsorbent for effective adsorption of Zn(II) in water // *Applied Sciences*. 2019, vol. 9, article 1519. DOI: 10.3390/app9081519.
47. Водный кодекс Российской Федерации: Федеральный закон РФ от 03.06.2006 г. — № 74-ФЗ: ред. от 01.05.2022 г. / Собрание законодательства Российской Федерации. — 2006. — № 23. Ст. 2380–2381. **ПАЛБ**

## REFERENCES

- Gabaraeva Z. G., Makieva D. Ch. Effect of heavy metals on the human body. *Education and Law*. 2020, no. 11, pp. 302–304. [In Russ]. DOI: 10.24411/2076-1503-2020-11146.
- Lin M. M., Farnosova E. N., Kagramanov G. G. Wastewater treatment from heavy metals by nanofiltration and ion exchange methods. *Chemical industry today*. 2017, no. 8, pp. 30–35. [In Russ].
- Fadeev A. B., Kuzin E. N., Kruchinina N. E., Nosova T. I., Kostyleva E. V. Evaluation of the efficiency of methods for treating wastewater from galvanic production from ammonium tartrate complexes of copper (II). *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences*. 2020, no. 5(92), pp. 97–108. [In Russ]. DOI: 10.18698/1812-3368-2020-5-97-108.
- Mukhamedov K. G., Nasirova N. K., Mukhamedov Zh. K., Abdurakhmanov O. Kh. Treatment of wastewater from galvanic industries by the reagent method. *Universum: technical sciences*. 2023, no. 7-3(112), pp. 51–56. [In Russ].
- Ovchinnikov A. S., Bocharnikov V. S., Denisova M. A. Bocharnikov O. V., Kozinskaya O. V. Comparative economic assessment of various natural sorbents for wastewater treatment. *Proceedings of Nizhnevolzskiy agrouniversity complex: science and higher vocational education*. 2020, no. 2(58), pp. 65–72. [In Russ]. DOI: 10.32786/2071-9485-2020-02-06.
- Stepanov S. V., Avdeenkov P. P., Ponomarenko O. S., Morozova K. M. Optimization and technical and economic assessment of process flow charts for wastewater treatment at an enterprise for deep processing of chicken eggs. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2023, no. 5, pp. 37–47. [In Russ]. DOI: 10.35776/VST.2023.05.05.
- Khorokhorina I. V., Lazarev S. I., Filimonova O. S., Bryankin K. V. Technological design and economic assessment of electromembrane methods for industrial wastewater treatment from heavy metals and APAV. *Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University*. 2023, no. 2(88), pp. 19–28. [In Russ]. DOI: 10.17277/voprosy.2023.02.pp.019-028.
- Natareev S. V., Bakin M. A., Snegirev D. G. Development of a mathematical model for ion-exchange water purification from heavy metal salts in a capacitive apparatus. *Fire and emergency safety*. 2021, no. 1(20), pp. 27–31. [In Russ].
- Medyanik N. L., Tusupbaev N. K., Varlamova I. A., Girevaya H. Ya., Kalugina N. L. Removal of heavy metals from solutions by ion flotation. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2016, vol. 14, no. 1, pp. 18–26. [In Russ]. DOI: 10.18503/1995-2732-2016-14-1-18-26.
- Dagaeva E. V., Valinurova E. R. Sorption of copper (II) ions on natural and modified zeolites of the Honguruu deposit. *Vestnik Bashkirskogo universiteta*. 2019, vol. 24, no. 1, pp. 71–75. [In Russ].
- Smirnova N. N., Nebukina I. A., Shiganova E. A. Comparative efficiency of using reagent methods in the processes of cleaning wastewater from galvanic industries from copper (II) ions. *Water: chemistry and ecology*. 2016, no. 8(98), pp. 32–37. [In Russ].
- Ates N., Uzal N. Removal of heavy metals from aluminum anodic oxidation wastewaters by membrane filtration. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018, vol. 25, no. 22, pp. 22259–22272. DOI: 10.1007/s11356-018-2345-z.

13. Meiramkulova K. S., Aubakirova K. M., Userbaev M. T., Sayabaev K. M. Efficiency of wastewater treatment of the slaughterhouse of a poultry farm by the electrochemical method. *Izvestiya Mezhdunarodnoy akademii agrarnogo obrazovaniya*. 2018, no. 42-2, pp. 55 – 60. [In Russ].
14. Lavinia L., Cochei L. Heavy metals removal from water and wastewater. *Heavy Metals – Recent Advances*. Intech Open, 2023. DOI: 10.5772/intechopen.110228.
15. Zhang Y, Duan X. Chemical precipitation of heavy metals from wastewater by using the synthetic magnesium hydroxy carbonate. *Water Science and Technology*. 2020, vol. 81, no. 6, pp. 1130 – 1136. DOI: 10.2166/wst.2020.208.
16. Mohd Yatim S. R., Kasmuri S. N. H., Syahjidan H. N., Mokhtar N. S., Zainuddin N. A. Removing copper, chromium and nickel in industrial effluent using hydroxide precipitation versus sulphide precipitation. *Health Scope*. 2020, vol. 3, pp. 54 – 60.
17. Benalia M. C., Youcef L., Bouaziz M. G. Achour S. Menasra H. Removal of heavy metals from industrial wastewater by chemical precipitation: Mechanisms and sludge characterization. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2022, vol. 47, pp. 5587 – 5599. DOI: 10.1007/s13369-021-05525-7.
18. Hoseinian F. S., Irannajad M., Safari M. Effective factors and kinetics study of zinc ion removal from synthetic wastewater by ion flotation. *Separation Science and Technology*. 2016, vol. 52, no. 5, pp. 892 – 902. DOI: 10.1080/01496395.2016.1267216.
19. Salmani M. H., Davoodi M., Ehrampoush M. H. Ghaneian M. T., Fallahzadah M. H. Removal of cadmium (II) from simulated wastewater by ion flotation technique. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*. 2013, vol. 10, no. 16. DOI: 10.1186/1735-2746-10-16.
20. Mulungulungu G. A., Mao T., Han K. Efficient removal of high-concentration copper ions from wastewater via 2D g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> photocatalytic membrane filtration. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2021, vol. 623, article 126714. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2021.126714.
21. Xiang H. Min X., Tang Chong-Jian, Sillanpää M. Recent advances in membrane filtration for heavy metal removal from wastewater. A mini review. *Journal of Water Process Engineering*. 2022, vol. 49, no. 6, article 103023. DOI: 10.1016/j.jwpe.2022.103023.
22. Chi-Wang L., Chia-Hsien C., Kwang-Ho C., Wei-Shuen Y. Polyelectrolyte enhanced ultrafiltration (PEUF) for the removal of Cd(II): Effects of organic ligands and solution pH. *Chemosphere*. 2008, vol. 72, no. 4, pp. 630 – 635. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2008.02.036.
23. Jiao Y., Yang J., Zhang J., Li J., Qin S., Wu X., Cui Z. Removal of heavy metal ions from acidic wastewater by constructing positively charged hollow fiber nanofiltration separating-layer based on Fe (III)/co deposition-quaternization. *Journal of Water Process Engineering*. 2023, vol. 56, article 104450. DOI: 10.1016/j.jwpe.2023.104450.
24. Harharah R. H., Abdalla G. M. T., Elkhaleefa A., Shigidi I., Harharah H. N. A study of copper (ii) ions removal by reverse osmosis under various operating conditions. *Separations*. 2022, vol. 9, no. 6, article 155. DOI: 10.3390/separations9060155.
25. Chen X., Ren P., Li T., Tremblay J. P., Liu X. Zinc removal from model wastewater by electrocoagulation: Processing, kinetics and mechanism. *Chemical Engineering Journal*. 2018, vol. 349, pp. 358 – 367. DOI: 10.1016/j.cej.2018.05.099.
26. Brahmi K., Bouguerra W., Harbi S., Elaloui E., Loungou M., Hamrouni B. Treatment of heavy metal polluted industrial wastewater by a new water treatment process: ballasted electroflocculation. *Journal of Hazardous Materials*. 2018, vol. 15, no. 344, pp. 968 – 980. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2017.11.051.
27. Wu C., Gao J., Liu Y., Jiao W., Su G., Zheng R., Zhong H. High-gravity intensified electrodeposition for efficient removal of Cd<sup>2+</sup> from heavy metal wastewater. *Separation and Purification Technology*. 2022, vol. 289, article 120809.
28. Ahmed S., Aktar S., Zaman S. Jahan R. A., Bari M. L. Use of natural bio-sorbent in removing dye, heavy metal and antibiotic-resistant bacteria from industrial wastewater. *Applied Water Science*. 2020, vol. 10, article 107. DOI: 10.1007/s13201-020-01200-8.
29. Hamidi D., Honarasa F. Natural bitumen as an available low cost sorbent for remediation of heavy metal cations. *Iranian Journal of Science and Technology Transactions a Science*. 2020, vol. 44, pp. 687 – 694. DOI: 10.1007/s40995-020-00888-2.
30. Topka P., Soukup K., Hejtmánek V., Hlásenský I., Kaštánek F., Šolcová O. Remediation of brownfields contaminated by organic compounds and heavy metals: a bench-scale test of a sulfur/ver-

- miculite sorbent for mercury vapor removal. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020, vol. 27, pp. 42182 – 42188. DOI: 10.1007/s11356-020-10696-1.
31. Huang Y., Zeng X., Guo L., Lan J., Zhang L., Cao D. Heavy metal ion removal of wastewater by zeolite-imidazolate frameworks. *Separation and Purification Technology*. 2018, vol. 194, pp. 462 – 469. DOI: 10.1016/j.seppur.2017.11.068.
32. Alasadi A. M., Khaili F. I., Awwad A. M. Adsorption of Cu(II), Ni(II) and Zn(II) ions by nano kaolinite: Thermodynamics and kinetics studies. *Chemistry International*. 2019, vol. 5, no. 4, pp. 258 – 268. DOI: 10.5281/zenodo.2644985.
33. Ghasemi N., Ghasemi M., Moazeni S., Ghasemi P., Alharbi N. S., Gupta V. K., Agarwal S., Burakova I. V., Tkachev A. G. Zn (II) removal by amino-functionalized magnetic nanoparticles: Kinetics, isotherm, and thermodynamic aspects of adsorption. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2018, vol. 62, no. 1, pp. 302 – 310. [In Russ]. DOI: 10.1016/j.jiec.2018.01.008.
34. Antoninova N. Yu., Sobenin A. V., Usmanov A. I., Gorbunov A. A. Justification of the possibility of using humic preparations production waste for wastewater treatment from metals ( $Cd^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ) in order to develop effective measures for environmental rehabilitation. *Journal of Mining Institute*. 2024, vol. 267, pp. 421 – 432. EDN NYTBHJ. [In Russ].
35. Antoninova N. Yu., Sobenin A. V., Usmanov A. I., Shepel K. V. Assessment of the possibility of using iron-magnesium production waste for wastewater treatment from heavy metals ( $Cd^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Co^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ). *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 260, pp. 257 – 265. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2023.34.
36. Fomenko E. V., Anshits N. N., Soloviev L. A., Mikhailova O. A., Anshits A. G. Composition and structure of the cenosphere shell of fly ash from coal combustion in the Kuznetsk Basin. *Chemistry of Solid Fuels*. 2014, no. 2, pp. 55. [In Russ]. DOI: 10.7868/S0023117714020030.
37. Lin Sh., Lu Ya., Zheng L., Long L., Jiang X., Yan J. Mechanism study of Cu (II) adsorption from acidic wastewater by ultrasonic-modified municipal solid waste incineration fly ash. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 2023, vol. 67, pp. 157 – 165. DOI: 10.1016/j.cjche.2023.11.019.
38. Astuti W., Chafidz A., Wahyuni E. T., Prasetya A., Bendiyasa I. M., Abasaeed A. E. Methyl violet dye removal using coal fly ash (CFA) as a dual sites adsorbent. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2019, vol. 7, no. 5, article 103262. DOI: 10.1016/j.jece.2019.103262.
39. Zhao H., Huang X., Zhang G., Li J., He Z., Ji P. Possibility of removing cadmium pollution from the environment using a newly synthesized material coal fly ash. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020, vol. 27, pp. 4997 – 5008. DOI: 10.1007/s11356-019-07163-x.
40. Zheng R., Lü J., Song W., Liu M., Li H., Liu Y., Lü X., Ma Z. Metallurgical properties of  $CaO-SiO_2-Al_2O_3-4.6wt\%MgO-Fe_2O_3$  slag system pertaining to spent automotive catalyst smelting. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2023, vol. 30, pp. 886 – 896. DOI: 10.1007/s12613-022-2569-2.
41. Changalvaei M., Nilforoushan M. R., Arabmarkadeh A., Tayebi M. Removal of Ni and Zn heavy metal ions from industrial waste waters using modified slag of electric arc furnace. *Materials Research Express*. 2021, vol. 8, no. 5, article 055506. DOI: 10.1088/2053-1591/abf520.
42. Latorrata S., Balzarotti R., Adami M., Marino B., Mostoni S., Scotti R., Bellotto M., Cristiani C. Wastewater treatment using alkali-activated-based sorbents produced from blast furnace slag. *Applied Sciences*. 2021, vol. 11, no. 7, article 2985. DOI: 10.3390/app11072985.
43. Czech B., Hojamberdiev M., Bogusz A. Impact of thermal treatment of calcium silicate-rich slag on the removal of cadmium from aqueous solution. *Journal of Cleaner Production*. 2018, vol. 200, no. 1, pp. 369 – 379. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.07.309.
44. Liu J., Xie Y., Li C., Fang G., Chen Q., Ao X. Novel red mud/poly-acrylic composites synthesized from red mud and its performance on cadmium removal from aqueous solution. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*. 2019, vol. 95, pp. 213 – 222. DOI: 10.1002/jctb.6223.
45. Pang Y., Zhao C., Li Y., Li Q., Bayongzhong X., Peng D. Cadmium adsorption performance and mechanism from aqueous solution using red mud modified with amorphous  $MnO_2$ . *Scientific Reports*. 2022, vol. 12, article 4424. DOI: 10.1038/s41598-022-08451-2.
46. Dong W., Liang K., Qin Y., Ma H., Zhao X., Zhang L., Zhu S., Yu Y., Bian D., Yang J. Hydrothermal conversion of red mud into magnetic adsorbent for effective adsorption of Zn(II) in water. *Applied Sciences*. 2019, vol. 9, article 1519. DOI: 10.3390/app9081519.

47. The Water Code of the Russian Federation: Federal Law of the Russian Federation dated 06/03/2006 No. 74-FZ: ed. from 05/01/2022. *Sobranie zakonodatel'stva Rossiyskoy Federatsii* [Collection of legislation of the Russian Federation], 2006. No. 23. St. 2380–2381. [In Russ].

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Собенин Артем Вячеславович*<sup>1</sup> — научный сотрудник,  
e-mail: [arsob@yandex.ru](mailto:arsob@yandex.ru),

ORCID ID: 0000-0001-5513-5680,

*Антонинова Наталья Юрьевна*<sup>1,2</sup> — канд. техн. наук,  
зав. лабораторией; доцент, e-mail: [natal78@list.ru](mailto:natal78@list.ru),

ORCID ID: 0000-0002-8503-639X,

*Горбунов Александр Викторович*<sup>2</sup> — канд. техн. наук,  
доцент, e-mail: [alexgorbunov72@mail.ru](mailto:alexgorbunov72@mail.ru),

ORCID ID: 0009-0008-3266-3585,

*Якупов Дамир Радифович*<sup>2</sup> — канд. техн. наук,  
доцент, e-mail: [damir.yakupov@m.ursmu.ru](mailto:damir.yakupov@m.ursmu.ru),

ORCID ID: 0000-0003-2678-2090,

<sup>1</sup> Институт горного дела Уральского отделения РАН,

<sup>2</sup> Уральский государственный горный университет.

**Для контактов:** Антонинова Н.Ю., e-mail: [natal78@list.ru](mailto:natal78@list.ru).

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*A. V. Sobenin*<sup>1</sup>, Researcher, e-mail: [arsob@yandex.ru](mailto:arsob@yandex.ru),

ORCID ID: 0000-0001-5513-5680,

*N. Yu. Antoninova*<sup>1,2</sup>, Cand. Sci. (Eng.),

Head of Laboratory;

Assistant Professor, e-mail: [natal78@list.ru](mailto:natal78@list.ru),

ORCID ID: 0000-0002-8503-639X,

*A. V. Gorbunov*<sup>2</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,

e-mail: [alexgorbunov72@mail.ru](mailto:alexgorbunov72@mail.ru),

ORCID ID: 0009-0008-3266-3585,

*D. R. Yakupov*<sup>2</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,

e-mail: [damir.yakupov@m.ursmu.ru](mailto:damir.yakupov@m.ursmu.ru),

ORCID ID: 0000-0003-2678-2090,

<sup>1</sup> Mining Institute of the Ural Branch of the Russian

Academy of Sciences, 620075, Ekaterinburg, Russia

<sup>2</sup> Ural State Mining University, 620144, Ekaterinburg, Russia.

**Corresponding author:** N. Yu. Antoninova, e-mail: [natal78@list.ru](mailto:natal78@list.ru).

Получена редакцией 16.07.2024; получена после рецензии 31.10.2024; принята к печати 10.11.2024.

Received by the editors 16.07.2024; received after the review 31.10.2024; accepted for printing 10.11.2024.

