

СТОЧНЫЕ ВОДЫ ЛЕВИХИНСКОГО ХВОСТОХРАНИЛИЩА: ПОДБОР МЕТОДОВ ПЕРЕРАБОТКИ ДЛЯ ОЧИСТКИ И УТИЛИЗАЦИИ

В.В. Юрак^{1,2}, М.В. Аксенюшкина¹, С.С. Завьялов¹, И.А. Власов¹

¹ Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия,
e-mail: Sergey.Zavialov@m.ursmu.ru

² Институт экономики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Аннотация: С целью решения проблемы нейтрализации и рекуперации сточных вод Левихинского месторождения рассмотрены альтернативные методы их переработки. Описана недостаточность существующей на сегодняшний день технологии нейтрализации сточных вод Левихинского рудника и основные физико-химические способы переработки сточных вод. Цель исследования: провести обзор предлагаемых методов переработки сточных вод Левихинского хвостохранилища для решения проблемы нейтрализации и рекуперации сточных вод, и при этом определить перспективные технологии, комплексно удовлетворяющие критериям эффективности и применимости. Критерием эффективности очистной технологии с учетом специфики химического состава является возможность достижения предельно допустимой концентрации для сброса в рыбохозяйственный водоем, критерием применимости – утилизация содержащихся в них полезных компонентов, экологическая безопасность, небольшие капиталовложения и экономическая эффективность, непрерывность процесса, достаточная производительность, сочетаемость с существующей инфраструктурой хвостохранилища. По результатам анализа описанных в научной литературе технологий через призму обозначенных критериев эффективности и применимости детально исследуются методы ионной флотации, электрофлотации, ферритизации с точки зрения доведения содержания в очищенной воде вредных примесей до предельно допустимых концентраций рыбохозяйственного значения и дальнейшего использования полученных продуктов переработки. Другие методы переработки сточных вод применительно к ситуации на Левихинском хвостохранилище, такие как ионный обмен, мембранные технологии, экстракция, электродиализ, и т. д. не рассматривались ввиду технологической сложности, периодичности процесса и высоких эксплуатационных расходов. Предложены потенциально перспективные схемы переработки сточных вод Левихинского хвостохранилища.

Ключевые слова: Левихинский рудник, ионы тяжелых металлов, редкоземельные элементы, нейтрализация, гидратообразование, ионная флотация, электрофлотация, ферритизация, рекуперация.

Для цитирования: Юрак В. В., Аксенюшкина М. В., Завьялов С. С., Власов И. А. Сточные воды Левихинского хвостохранилища: подбор методов переработки для очистки и утилизации // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 12-1. – С. 67–86. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_121_0_67.

Levikha tailings dam wastewater: Selection of treatment and utilization methods

V.V. Yurak^{1,2}, M.V. Aksenyushkina¹, S.S. Zavialov¹, I.A. Vlasov¹

¹ Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia,
e-mail: Sergey.Zavialov@m.ursmu.ru

² Institute of Economics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

Abstract: Alternative methods of wastewater treatment are considered to solve the problem of Levikhinsky mine wastewater neutralization and recovery. The insufficiency of the currently existing technology of Levikhinsky mine wastewater neutralization and the main physical and chemical methods of wastewater treatment are described. The aim of the study: to review the proposed methods of wastewater treatment of the Levikhinsky tailings dam to solve the problem of neutralization and regeneration of wastewater and at the same time to identify promising technologies that comprehensively meet the criteria of efficiency and applicability. The criterion of effectiveness of treatment technology in our case, taking into account the specificity of chemical composition is the possibility of achieving the maximum permissible concentration for discharge into the fishery water body, the criterion of applicability – utilization of useful components contained in them, environmental safety, small capital investment and economic efficiency, continuity of the process, sufficient productivity, combinability with the existing infrastructure of the tailings pond. Based on the results of the analysis of available technologies in the scientific literature through the prism of these criteria of efficiency and applicability, the paper proposes the following.

Key words: Levikhinsky mine, heavy metal ions, rare earth elements, neutralization, hydrate formation, ion flotation, electroflotation, ferritization, recuperation.

For citation: Yurak V. V., Aksenyushkina M. V., Zavialov S. S., Vlasov I. A. Levikha tailings dam wastewater: Selection of treatment and utilization methods. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(12-1):67-86. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_121_0_67.

Введение

После мокрой консервации Леви-хинского рудника произошло поднятие кислых шахтных вод на поверхность. На сегодняшний день изливающиеся кислые шахтные воды вместе с подотвальными вследствие токсичного химического состава представляют собой экологическую опасность для прилегающих территорий, в том числе населенных пунктов и водных объектов [1]. Для очистки шахтных и подотвальных вод организована система их сбора и нейтрализации, для нейтрализации используется известковое молоко, связывающее

содержащиеся в них ионы металлов и сульфат-ионы в нерастворимый тонкодисперсный осадок в виде смешанных шламов гидроксидов металлов и сульфатов, с последующим отстаиванием в пруду-накопителе. Регенерация донных отложений в пруду-отстойнике невозможна. Идет их накопление (на сегодняшний день занята треть поверхности пруда, не считая донных отложений) [2], и можно сказать с определенной долей уверенности: формируется новый техногенный массив, у которого пока не существует никаких перспектив переработки. Очищенная вода самотеком по старому

руслу р. Левиха попадает в р. Нижний Тагил, с превышением предельно допустимых концентраций для водных объектов рыбохозяйственного значения (ПДКр/х) [44] в десятки и сотни раз по различным химическим элементам. Ущерб от сброса сточных вод после их очистки, по данным [3], составляет более 10 млрд руб. в год.

Для контроля параметров сточных вод ежедневно определяются общая минерализация, pH, содержания Cu^{2+} , Zn^{2+} , $\text{Fe}_{\text{общ}}$, Cl^- , SO_4^{2-} , As^{2+} и нефтепродуктов [4]. Нейтрализуется до 44–72% примесей по основным компонентам-загрязнителям, это медь, цинк, железо, сульфат-ионы, нефтепродукты. Но кроме измеряемых химических элементов, в них содержатся и другие [5], 2 и 3 класса опасности (бериллий, селен, кобальт, кадмий, никель, алюминий, редкоземельные элементы), представляющие не меньшую экологическую угрозу. Контроль за их содержанием отсутствует.

Данные по эффективности действующей технологии очистки разнообразны, удаление химических примесей по отдельным элементам доходит до 94% [4], но научные источники указывают [6, 7], что остаточные концентрации измеряемых химических элементов очищенной воды далеки от нормативных показателей.

Состав шахтных и подотвальных вод по данным технических отчетов станции нейтрализации за 2023–2024 гг. и результатам химического анализа по основным контролируемым элементам приведен в табл. 1.

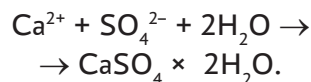
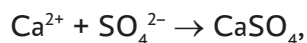
Следует рассмотреть процесс образования химических соединений в процессе существующей на сегодняшний день нейтрализации сточных вод Левихинского хвостохранилища.

При добавлении в них гидроксида кальция протекают следующие реакции:

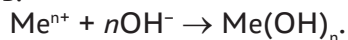
- В воде гидроксид кальция диссоциирует:



- Ионы кальция связываются с сульфат-ионами с образованием ангидрита и гипсовой взвеси:



- Ионы металлов в процессе нейтрализации реагируют с гидроксид-ионами, образуя нерастворимые гидроксиды металлов:



При анализе процесса нейтрализации важную роль играют значения pH среды начала и завершения процесса образования осадков. В табл. 2 представлены данные о значениях pH, при которых

Таблица 1

Концентрации загрязняющих веществ в шахтных водах

Левихинского медноколчеданного рудника, в том числе и ПДКр/х, мг/л

Concentrations of pollutants in mine waters of Levikhinsky copper and iron ore mine, mg/l

Параметр	ПДКр/х [8]	Шахтные воды	Подотвальные воды
pH	6,5 – 8,5	3,51 – 3,96	3,0
Cu^{2+}	0,001	7,53 – 17,5	6,48
Zn^{2+}	0,01	127 – 206,4	6,54
Fe^{3+}	0,1	992 – 1280	21,6
Mn^{2+}	0,01	44	1,2
SO_4^{2-}	100	5950 – 6050	4560

Таблица 2

***pH* начала осаждения и полного осаждения ионов металлов, их остаточные концентрации**
pH of hydrate formation and residual concentrations of heavy metal ions

Металл	Значение <i>pH</i> начала осаждения при $C_{исх} 0,01M$	Величина <i>pH</i> полного осаждения $C_{ост}$ менее $10^{-5}M$	Остаточная концентрация металлов, наблюдаемая при <i>pH</i> 8,5–9,0 мг/л
Fe ³⁺	2,3	4,1	0,3 – 0,5
Al ³⁺	4,0	5,2	0,1 – 0,5
Cr ³⁺	4,9	6,8	0,4 – 0,05
Cu ²⁺	5,5	8,0 – 10,0	0,1 – 0,15
Zn ²⁺	6,4	8,0	0,1 – 0,05
Fe ²⁺	7,5	9,7	0,3 – 0,1
Cd ²⁺	8,2	9,7 – 10,5	2,5
Ni ²⁺	7,7	9,5 – 10,0	0,25 – 0,75
Mn ²⁺	8,8	10,4	1,8 – 2,0

pH образования гидроокисей редкоземельных металлов, за исключением церия, лежит в пределах от 6,3 до 7,82.

происходит образование гидроксидов тяжелых металлов, и практические сведения об остаточных концентрациях ионов металлов после их осаждения в виде гидроксидов [8, с. 164].

Как видно из табл. 2, остаточные концентрации осаждаемых металлов выше нормативных ПДК объектов рыбохозяйственного назначения. Остаточная концентрация металлов свидетельствует, что даже несмотря на большую эффективность осаждения в виде гидроксидов нескольких металлов одновременно по сравнению с индивидуальным осаждением, достигнуть установленных нормативов ПДК не представляется возможным. Поэтому, независимо от эффективности осаждающих реагентов, нейтрализация путем образования гидроксидов металлов как единственная технологическая операция не обеспечит требуемой степени очистки. В очищенных сточных водах будут содержаться остаточные ионы металлов в количестве, превышающем ПДК.

На Левихинском руднике *pH* сбрасываемых в р. Левиха очищенных сточных

вод доводится до 3,9 – 6,6. Это ниже величины полного осаждения для таких ионов металлов, как хром, медь, двухвалентное железо, кадмий, никель, марганец. Недоосажденные металлы — еще одна причина загрязненности сточных вод после их нейтрализации, которая приводит к необходимости усовершенствования существующего процесса очистки внедрением дополнительных технологических операций очистки из числа известных на современном этапе: механических, физико-химических, биологических методов очистки сточных вод и их комбинаций.

По данным химического анализа минерализованные сточные воды Левихинского хвостохранилища, помимо контролируемых компонентов, содержат алюминий, магний, марганец в концентрациях $10n$ — $1000n$ мг/л, а также кадмий, кобальт, хром, никель, свинец, фосфор в концентрациях $0,1n$ — $1n$ мг/л. Кроме того, там содержатся и редкоземельные металлы, причем их концентрации в десятки раз превышают промышленные содержания [1, 5]. Это позволяет рас-

смаатривать сточные воды как потенциальный источник гидроминерального сырья. Среднегодовой суммарный вынос ионов металлов шахтными водами Левихинского рудника по данным на 2014 г. составляет: по меди — 9 т/год, по цинку — 427, по марганцу — 103, по общему железу — 2123, по никелю — 0,43, по кобальту — 1,57, по кадмию — 0,44, по редкоземельным металлам — 7,8 т/год [4]. Упущенная прибыль составляет более 500 млн руб. в год, что превысило бы затраты на обеспечение полноценной очистки и величину экологического ущерба, в том числе предотвращенного. Основная доля ценности приходится на редкоземельные элементы [2].

Все это способствует возникновению необходимости разработки комплексной технологии очистки шахтных вод с невысокой себестоимостью очистки, позволяющей с помощью малогабаритных установок осуществить снижение содержания вредных веществ до приемлемых концентраций народно-хозяйственного назначения и извлечения ценных компонентов (рекуперации), интересных с экономической точки зрения. Несмотря на уже существующие исследования по нейтрализации и утилизации сточных вод [9–12], проблематика не теряет своей остроты, так как выбор технологии до сих пор не определен, а территория Левихинского рудника относится к объектам накопленного экологического ущерба, т.е. зоне экологического бедствия.

Отсюда цель текущего исследования — провести обзор предлагаемых методов переработки сточных вод Левихинского хвостохранилища для решения проблемы нейтрализации и рекуперации сточных вод, и при этом определить перспективные технологии, комплексно удовлетворяющие критериям эффективности и применимости. Критерием эффективности очистной технологии в на-

шем случае с учетом специфики химического состава является возможность достижения ПДК для сброса в рыбохозяйственный водоем (ПДК р/х), критерием применимости — утилизация содержащихся в сточных водах полезных компонентов, экологическая безопасность, небольшие капиталовложения и экономическая эффективность, небольшие эксплуатационные затраты, непрерывность процесса, достаточная производительность, сочетаемость с существующей инфраструктурой хвостохранилища.

Цель обусловила постановку следующих исследовательских задач:

- провести обзор предлагаемых методов переработки сточных вод Левихинского рудника и проанализировать их через призму критериев эффективности и применимости;
- предложить схемы переработки сточных вод Левихинского хвостохранилища потенциально эффективными и применимыми методами, обоснованными на первом этапе (при решении первой исследовательской задачи).

Объектом исследования являются методы переработки кислых многокомпонентных сточных вод, существующие на сегодняшний день, и возможности их применения относительно реального объекта.

Методическую базу исследования составили методы систематизации и контент-анализа в совокупности с эволюционным и региональным подходами. Анализ подлежал порядка 38 научных работ. Информационной базой исследования стали научные труды как отечественных, так и зарубежных ученых по данной проблематике, представленные в библиотеках и наукометрических базах Scopus, WoS (на базе ResearchGate), а также на портале eLibrary. Это позволило реализовать научный поиск в логике исследования развития методов нейтрализации и утилизации сточных вод

Таблица 3

Разновидности методов очистки кислых сульфатных многокомпонентных сточных вод

Varieties of treatment methods for acid sulphate multicomponent wastewaters

Разновидности	Принцип действия	Достоинства	Недостатки	Реализация
Механические				
фильтрация	разделение воды и нерастворенных примесей под действием гравитационных сил	простота конструкции, использование естественных рельефов	высокие капитальные затраты, многоэтапность, сложность очистки от осадка	фильтрующие дамбы, геохимические барьеры, песочные, гравийные фильтры, пористые фильтры
отстаивание		простота и надежность эксплуатации, возможность строительства сооружений значительной производительности	длительность отстаивания, низкий коэффициент очистки	шламоотстойники пруды-осветлители, песколовки, отстойники различных конструкций
очистка под действием центробежных сил		высокое качество разделения, компактность, низкая себестоимость, дешевизна эксплуатации установок	связано с большим потреблением электроэнергии, коррозионный износ деталей	гидроциклоны, центрифуги, сепараторы
Химические				
реагентная нейтрализация	химическая реакция между примесями и реагентом до перевода в нерастворимое соединение	простота, низкая себестоимость	недостаточное качество очистки, потребность в реагентном хозяйстве, безвозвратная потеря ценных компонентов	гашеная, негашеная известь, каустическая или кальцинированная сода, карбонатные, гидрокарбонатные суспензии щелочных металлов т.д.
окисление и восстановление	изменение формы вещества под действием окислителей или восстановителей до безвредных	высокая скорость процесса, возможность непрерывного действия	большой расход дорогостоящих реагентов, потребность в реагентном хозяйстве, невозможность утилизации компонентов	гипохлориты натрия и кальция: реже – пероксид водорода, оксиды марганца, перманганат и бихромат калия
фильтрация через нейтрализующие материалы	химическая реакция между примесями и ионами нейтрализующих материалов	простота, низкая себестоимость, непрерывность	недостаточное качество очистки, забивание фильтров, низкая скорость процесса, невозможность утилизации компонентов	известняк, мел, магнезит, доломит, мрамор

ферритизация	способность металлов к совместному осаждению с гидрозакисью железа	высокое качество очистки, одностадийность, возможность разделения осадков с помощью магнитной сепарации	введение дополнительных реагентов, время созревания ферритных комплексов, наличие реагентного хозяйства	резервуар-накопитель с мешалкой + железосодержащие реагенты, магнетит
Физико-химические				
коагуляция (флокуляция)	нейтрализация электрического заряда поверхности частицы с помощью реагентов	ускорение процесса осаждения примесей, простота, непрерывность процесса	невозможность утилизации ценных компонентов, потребность в реагентном хозяйстве, вторичное загрязнение	природные и синтетические коагулянты и флокулянты, смесители различных конструкций
гальванокоагуляция	восстановление и сорбция металлов на поверхностях смеси анодной и катодной составляющих	малая энергоёмкость, безреагентная обработка воды, удаление сульфат-ионов, сорбция органических веществ, низкие эксплуатационные расходы	большие габариты, избирательность выделения, периодическая очистка электродных элементов, высокая трудоёмкость при смене загрузки	гальванокоагуляторы
ионная флотация	взаимодействие пузырьков газа с восстановленными с помощью реагентов соединениями	возможность непрерывного действия, извлечение ценных компонентов, высокое качество очистки, перспективны при низкой концентрации вещества, низкие энергозатраты	необходимость использования экологически безопасных реагентов, потребность в реагентном хозяйстве	пневматические, механические пневмомеханические, вакуумные и напорные флотационные аппараты
электрофлотация	взаимодействие ионов металлов с продуктами электролиза воды	непрерывность, отсутствие реагентов, извлечение ценных компонентов, большие объёмы переработки	не удаляются сульфат-ионы, энергозатратность	электрофлотационные аппараты
экстракция	разделение примесей в смеси двух нерастворимых жидкостей (экстрагента и сточной воды)	высокое качество очистки (92–97%), возможность непрерывного действия	концентрация не менее 3 г/л, затратность, избирательное извлечение, небольшая производительность, вторичное загрязнение экстрагентом	экстрагенты (органические кислоты, амины, спирты, эфиры)
сорбция	способность к физическому сцеплению молекул с сорбентом без протекания химической реакции	широкий диапазон концентраций примесей, извлечение из сточных вод ценных растворённых веществ, высокое качество очистки	большой расход реагентов для регенерации сорбентов, дороговизна сорбентов, образование вторичных отходов	аппараты-адсорберы, фильтры; адсорбенты: активные угли, цеолиты, глина, тальк, каолин

ионный обмен	способность ионов твердой фазы вступать в реакцию обмена с ионами элементов раствора, одинакового по знаку заряда	возможность извлечения ценных примесей, экологичность, высокое качество очистки	низкая производительность, большой расход смол при их дефицитности, потребность в регенерации, температура процесса, утилизация регенеративных растворов, избирательность	ионообменные смолы, ионообменные фильтры
мембранные методы (обратный осмос и ультрафильтрация)	избирательное диффузное или обменное прохождение молекул или ионов через проницаемые мембранные барьеры	высокое качество очистки, возможность утилизации тяжелых и цветных металлов	ограничения по содержанию примесей, предварительная очистка от органических веществ; потребность рециркуляции и турбулизации, потребность периодической очистки мембран	фильтрационные установки с мембранами различной проницаемости
Биологические				
искусственные	использование жизнедеятельности микроорганизмов – потребителей компонентов сточных вод	низкий расход энергии, невозможность вторичного загрязнения, высокое качество очистки (до 98%), экологическая безопасность	сезонность, создание оптимальных условий существования, потребность в дальнейшей переработке, длительное время воздействия; сложный подбор микроорганизмов	биофильтры, аэротенки, биопруды, поля фильтрации

Левихинского хвостохранилища, а также идентифицирования перспективных технологий, удовлетворяющих комплексу критериев.

Результаты

Анализ информации из научных источников [8 – 22], позволяет сформировать основные группы методов переработки сточных вод: механические, химические, физико-химические и биологические. Учитывая специфику состояния и состава сточных вод, рассматривая все многообразие методов очистки и рекуперации через призму авторских критериев, по результатам детального изучения исследований [14 – 26] была

разработана таблица методов переработки, подходящих для многокомпонентных кислых сточных вод (табл. 3) с описанием их достоинств и недостатков.

В соответствии с изложенной информацией и обозначенными критериями выбраны три наиболее перспективных метода очистки сточных вод Левихинского хвостохранилища в качестве основной операции и приведено их более развернутое описание.

Другие методы переработки, указанные в таблице, такие как ионообменные, экстракционные, мембранные технологии, электродиализ и т.д. не рассматриваются ввиду несоответствия выбранным критериям.

Ионная флотация

Ионная флотация — процесс извлечения находящихся в растворе ионов методом флотации, при котором в качестве реагентов-собирателей используют поверхностно-активные вещества (ПАВ). Извлекаемый ион (коллигенд) образует с ПАВ соединение (сублат), которое концентрируется на поверхности всплывающих пузырьков и выносится в пену. Ионная флотация является одним из перспективных методов селективного извлечения и разделения катионов металлов, присутствующих в сточных водах.

Для промышленного использования предпочтительнее механизм ионной флотации с образованием осадка (новой фазы), частицы которого прилипают к всплывающим пузырькам воздуха, при ионной флотации извлечение на уровне 90—99% может быть достигнуто за время от долей минуты до несколько минут. Такой механизм называется адгезионным. В качестве реагентов-собирателей при ионной флотации целесообразно использовать ПАВ, образующие труднорастворимые соединения с коллигендом. При ионной флотации во избежание вторичного загрязнения в качестве собирателей рекомендуется подбирать экологически безопасные, обладающие способностью к биологическому разложению, либо регенерируемые для повторного использования реагенты (например, кофейная кислота или регенерируемый оксид графена), либо применять биосурфактанты для нейтрализации остаточных концентраций реагентов.

Преимущества ионной флотации — это эффективность при относительно низких исходных концентрациях металла (десятки–сотни мг/л), высокая скорость процесса, низкие энергозатраты, небольшие требования к пространству, небольшой объем осадка, низкая остаточная концентрация, пригодность для различных целевых ионов на различных

уровнях и обработка значительных объемов растворов, возможность непрерывного процесса — определяют потенциальную перспективность метода для извлечения металлов из техногенных вод, способствуя тем самым их очистке.

Ионная флотация может применяться для однокомпонентных и многокомпонентных по ионам металлов растворов [27].

Эксперименты по ионной флотации водных растворов смеси ионов меди, кадмия и свинца с использованием додецилбензолсульфоната натрия установило порядок удаления ионов: $\text{Cu}^{2+} \rightarrow \text{Cd}^{2+} \rightarrow \text{Pb}^{2+}$ [21]. При исследовании ионной флотации катионов ряда металлов In^{3+} , Cr^{3+} , Fe^{3+} , Cd^{2+} , Mn^{2+} , Co^{2+} , Zn^{2+} и Ag^+ использованием додецилбензолсульфоната натрия и додецилсульфоната натрия в качестве собирателей установлена селективная последовательность $\text{Ag} \rightarrow \text{Mn} \rightarrow \text{Zn} \rightarrow \text{Co} \rightarrow \text{Fe} \rightarrow \text{Cr} \rightarrow \text{In}$. При флотации смеси ионов Cd^{2+} , Zn^{2+} и Cu^{2+} с рамнолипидом в качестве собирателя селективная последовательность будет иметь вид $\text{Cd} \rightarrow \text{Zn} \rightarrow \text{Cu}$ [23, 24]. При применении в качестве собирателя диэтилдитиокарбамата натрия из модельного раствора смеси меди, цинка, железа в концентрациях, в которых эти металлы присутствуют в реальных шахтных водах, металлы извлекаются в следующей последовательности: $\text{Cu} \rightarrow \text{Fe(III)} \rightarrow \text{Zn} \rightarrow \text{Fe(II)}$ [28].

Ионная флотация является перспективной технологией для получения концентратов, содержащих от 60 до 70% редкоземельных элементов [29]. Исследованы флотационные процессы с использованием ряда органических и неорганических реагентов для извлечения редких и тугоплавких металлов, а также металлов платиновой группы. Многие из них могут быть выделены отдельно от других путем корректировки значений pH среды [29, 30].

Исследования показали [28, 29], что селективность многокомпонентных ионов тесно связана с валентностью, радиусами кристаллизации и гидратированными радиусами ионов металлов, отношением ионного заряда к ионному радиусу, рН и произведениями растворимости соединений металла-собиравателя. Следовательно, для каждого собирателя будет своя модель селективности последовательно извлекаемых ионов. Регулируя рН, дозируя собиратель, проводя ионную флотацию в несколько стадий, равных количеству видов выделяемых ионов металлов, можно добиться селективного разделения элементов в характерной для конкретного реагента определенной последовательности.

При извлечении с помощью ионной флотации практически во всех случаях достигается высокая степень извлечения. Извлечение индивидуально для каждого из металлов, зависит от рН и варьируется от 96 до 99% и более.

рН процесса ионной флотации, как правило, лежит в диапазоне от 3 до 8 [28], нижняя граница практически совпадает с исходной рН сточных вод Левихинского хвостохранилища, верхняя граница — в интервале нейтральной среды. Ожидается, что по истечении полного запланированного цикла извлечения ионов металлов не потребуются дополнительных регуляторов рН среды перед сбросом очищенной воды.

Ионная флотация кислых рудничных вод может применяться как в качестве основного метода извлечения полезных компонентов, так и в комплексе с другими известными методами.

Ионная флотация привлекательна простотой, умеренными требованиями к размещению, высокой скоростью процесса, универсальностью в плане содержания и ассортимента флотируемых веществ, малыми выходными объемами, высокой степенью извлечения, а, сле-

довательно, и очистки, достаточно низкими энергопотреблением и эксплуатационными расходами [30]. Недостатки ионной флотации — высокая стоимость флотореагентов, их небольшой ассортимент, вторичное загрязнение от флотореагентов, и, как следствие, проблема их нейтрализации. Разработка экологически безопасных и высокоэффективных поверхностно-активных веществ — одно из условий дальнейшего практического применения ионной флотации при очистке сточных вод.

В работе [31] содержатся рекомендации к использованию экологически безопасного реагента ГлиПЕТ, полученного в процессе утилизации твердых бытовых отходов полиэтиленгликольтерефталата (ПЭТ-тара), содержащего в своем составе гетерополярные соединения гидроксильных, сложноэфирных, карбоксильных групп и ароматических структур, с эффективностью очистки от 98,5 до 99,9% по отдельным элементам.

Электрофлотация

Электрофлотация — безреагентный процесс, основанный на эффекте электролиза воды, в процессе которого генерируются водородные пузырьки и ионы гидроксильной группы. Гидроксид-ионы регулируют рН среды раствора, как только их концентрация обеспечивает рН гидратообразования того или иного химического элемента, происходит образование нерастворимого гидроксида. Молекулы гидроксидов за счет адгезионного взаимодействия прикрепляются к газовым пузырькам и всплывают на поверхность очищаемого раствора в виде дисперсной массы, которую можно удалить пеносъемником. Данный метод относится к физико-химическим методам очистки сточных вод и обеспечивается специально разработанными для таких целей электрофлотационными аппаратами. Изменяя параметры электро-

лиза, можно регулировать интенсивность и качество процесса очистки [32]. Наиболее эффективно электрофлотация работает с частицами размером 1 – 100 мкм [33]. При необходимости для повышения интенсивности процесса в практике используется добавление поверхностно-активных веществ [34, 35].

Разработаны электрофлотационные аппараты для очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов и дисперсных органических веществ. Электрофлотационные аппараты выпускаются двух типов: безреагентный электрохимический модуль очистки и электрохимический модуль глубокой доочистки сточных вод. Безреагентный электрохимический модуль предназначен для очистки сточных вод от ионов тяжелых цветных металлов. Модуль включает в себя дозирующие насосы, электрокорректор pH, двухсекционный электрофлотатор, емкости для исходной и очищенной воды [8, с. 196 – 201].

Для предотвращения вторичного загрязнения воды за счет разрушения электродов возможно использование электродов из нерастворимых материалов. В таком случае после электрофлотации остаточная концентрация по ионам тяжелых цветных металлов составляет не более 0,01 мг/л.

На текущий момент технологии электрофлотации и аппараты для ее обеспечения прошли успешные испытания на ряде промышленных предприятий в России и за рубежом.

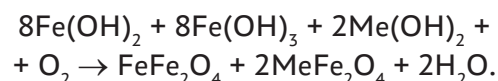
Преимущества процесса и аппаратной базы: работа в непрерывном режиме; безреагентный, что позволяет отказаться от реагентного хозяйства, включающего реакторы, отстойники, фильтры. Легко сочетается с любым другим очистным оборудованием, в том числе и с другими такими же аппаратами для доведения качества очищаемой воды до требуемых стандартов.

Ферритный метод

В последнее время находит практическое применение ферритный метод (метод ферритизации) как модификация реагентного метода очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов с помощью железосодержащих реагентов.

Очистка сточных вод методом ферритизации заключается в адсорбции примесей (в т.ч. ионов тяжелых металлов) магнитными гидроокисями железа, образовании ферритов и последующем встраивании сорбированных веществ в их кристаллическую решетку, что предположительно связано с ее дефектами [36]. Роль адсорбентов в растворах в данном случае играют всевозможные соединения железа переменного (бертоллидного) состава.

При обработке очищаемой воды щелочным реагентом содержащиеся в ней ионы железа и других металлов образуют гидроксиды металлов, которые при избыточном окислении кислородом воздуха при взаимодействии с различными формами соединений железа образуют магнетит, а затем и ферриты, твердые комплексные соединения, имеющие туннельную структуру, которая благоприятна для сорбции тяжелых металлов.



Ферриты образуются вследствие замещения в кристаллической структуре магнетита части ионов железа ионами других металлов. Они трудно растворимы [37], обладают хорошей способностью к осаждению и фильтрации, их можно выделить магнитной и гравитационной сепарацией вследствие ферромагнитных свойств и кристаллической структуры [38].

На скорость процесса влияет температура реакции, pH раствора, вид применяемого щелочного реагента (NaOH, Ca(OH)₂, NaHCO₃, NH₄OH) и состав ис-

ходного сырья (степень очистки с образованием магнитных продуктов повышается при обработке стоков, содержащих одновременно ионы нескольких металлов по сравнению с обработкой индивидуальных стоков, причем превышение содержания ионов железа к общему содержанию ионов других металлов должно быть не менее 5–20 раз). Оптимальные параметры процесса ферритизации — щелочная среда с рН 6,5–10 при 60–70 °С. Ферритизирующим агентом служат соли двух- и трехвалентного железа [39]. Для относительно низких температур, от 0 до 25 °С, целесообразно вводить в исходный раствор порошкообразный магнетит с целью формирования первичных центров образования ферритов.

Ферриты имеют хорошую емкость по тяжелым металлам и хорошо сорбируют ионы хрома, кадмия, свинца, меди, никеля, кобальта, ртути, марганца и бериллия [8, с. 181–185].

Метод ферритизации позволяет практически полностью удалять ионы тяжелых металлов из сточных вод. Процесс кристаллизации ферромагнитных осадков заканчивается полностью при пребывании осадка в течение 15–20 сут или при их высушивании.

После сушки осадок превращается в ферритовое сырье, называемое ферритовой крошкой, из которого получают ферриты — магнитные материалы, востребованные в радиотехнической аппаратуре и электронных системах либо при производстве магнитосорбентов для извлечения нефти и нефтепродуктов с поверхности воды. Магнитосорбенты, полученные при смешении ферритов со связующими компонентами (полимерами, парафином и др.) обладают плавучестью 100% через 96 ч, гидрофобностью и высокой сорбционной емкостью 2–4 г/г по отношению к нефти и нефтепродуктам [40].

Содержание ионов тяжелых металлов после очистки методом ферритизации составляет десятые доли миллиграмма на 1 л воды. Реализованная схема очистки не только является безотходной, но и позволит в значительной мере снизить расходы на проведение очистки за счет реализации получившегося сырья [41].

Главными преимуществами ферритной очистки стоков являются непрерывность процесса, одностадийная и однопоточная возможность удаления ионов различных металлов, химическая стойкость вновь образованных продуктов; эффективное сопутствующее удаление взвесей и загрязнений в виде дисперсий и эмульсий; нечувствительность к содержанию в стоках других солей [41].

Метод ферритизации можно применять и для обработки застарелых осадков нейтрализации сточных вод, восстанавливая их химическую активность предварительной активацией раствором серной кислоты [42].

Аппаратурное оформление ферритной очистки отличается простотой, главным рабочим узлом установки ферритной очистки является резервуар-накопитель, снабженный мешалкой и механизмом спуска обработанной воды [43], куда подаются в нужной дозировке растворы реагентов и где, собственно, и происходит процесс формирования ферритов. После обезвоживания и контроля качества очистки готовый продукт готов к дальнейшему использованию или захоронению. Примером аппаратного исполнения может служить разработка НПО «АкваБиоМ» — автоматизированной линии ферритизации осадков сточных вод со сроком окупаемости 1,5 года (akvabiom.ru).

Исходя из химического состава сточных вод Левихинского хвостохранилища, а именно — превышения содержания катионов железа над всеми остальными ионами металлов (табл. 1) и присутствия

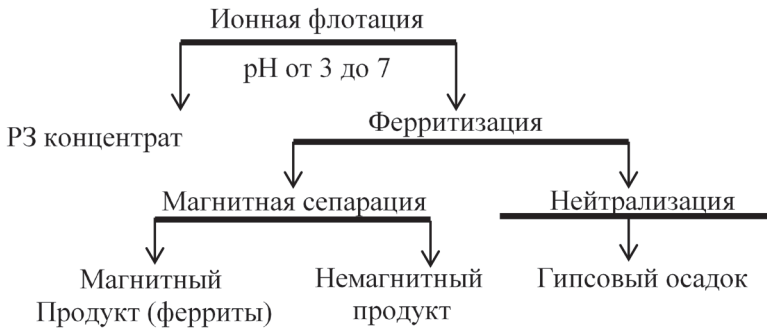


Рис. 1. Технологическая схема очистки сточных вод с применением операций ионной флотации и ферритизации

Fig. 1. Technological scheme of wastewater treatment using ion flotation and ferritization operations

большого количества сульфат-ионов, можно предположить, что выделение ферритов будет успешным при минимальных расходах железосодержащих реагентов либо вовсе без них. Возможно, учитывая более низкую по сравнению с лабораторными условиями температуру процесса, придется добавлять некоторое количество магнетита.

Обсуждение. Применение рассмотренных методов

Правильный подбор реагентов при ионной флотации играет основополагающую роль в процессе извлечения ценных компонентов сточных вод. По мнению авторов, данный метод можно использовать для выделения самой ценной части сточных вод Левихинского хвостохранилища — редкоземельных метал-

лов (рис. 1). Остальные компоненты в виде ионов тяжелых и цветных металлов рекуперированы ферритизацией (рис. 1) или электрофлотацией (рис. 2), в зависимости от актуальности конечных продуктов — ферритов либо шлама гидроксидов металлов. Финальную доочистку с целью удаления сульфат-ионов можно осуществить с помощью нейтрализации с образованием гипсового осадка как товарного продукта.

При использовании в качестве основной операции электрофлотации авторами рекомендована предварительная нейтрализация до pH 5 с целью отделения трехвалентного железа и гипса как балластных составляющих последующего процесса (рис. 3).

Можно использовать ферритизацию в качестве основной операции извлече-

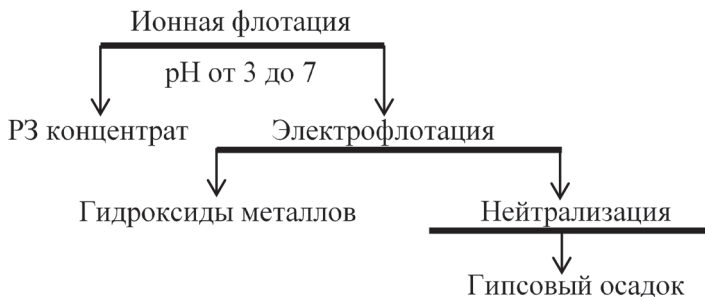


Рис. 2. Технологическая схема очистки сточных вод с применением операций ионной флотации и электрофлотации

Fig. 2. Technological scheme of wastewater treatment using ion flotation and electroflotation operations

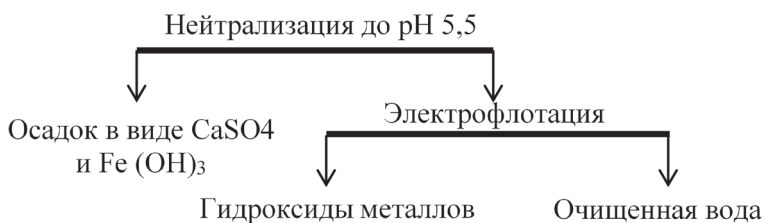


Рис. 3. Технологическая схема очистки сточных вод с применением операции электрофлотации в качестве основной операции.

Fig. 3. Technological scheme of wastewater treatment using electroflotation operation as the main operation

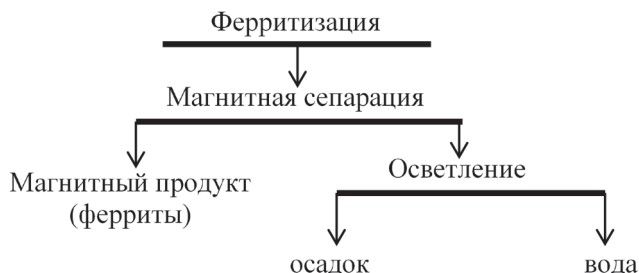


Рис. 4. Технологическая схема очистки сточных вод с применением ферритизации

Fig. 4. Technological scheme of wastewater treatment using ferritization

ния (рис. 4). При успешном получении ферритов, нуждается в проверке гипотезы о селективности сорбции на них ионов металлов и, в случае подтверждения гипотезы, предполагается дальнейшее изучение магнитной восприимчивости ферритов различных металлов с целью выделения и последующего их разделения методом магнитной сепарации.

Описанные методы переработки сточных вод применительно к ситуации Левихинского хвостохранилища, по мнению авторов, имеют потенциальную перспективу в дальнейшей разработке цикла очистных и рекуперационных мероприятий по снижению класса опасности объекта как основные технологические операции с добавлением предварительных и заключительных стадий механических, возможно, биологических методов очистки.

Выводы

Таким образом, цель текущего исследования была достигнута, а именно: был

проведен обзор предлагаемых методов переработки сточных вод Левихинского хвостохранилища для решения проблемы нейтрализации и рекуперации сточных вод и определены перспективные технологии, комплексно удовлетворяющие критериям эффективности и применимости (к критерию эффективности очистной технологии была отнесена возможность достижения ПДК для сброса в рыбохозяйственный водоем — ПДК р/х).

Критериями применимости выступили: утилизация содержащихся в них полезных компонентов, экологическая безопасность, небольшие капиталовложения и экономическая эффективность, небольшие эксплуатационные затраты, непрерывность процесса, достаточная производительность, сочетаемость с существующей инфраструктурой хвостохранилища).

Предложены потенциально перспективные схемы переработки сточных вод Левихинского хвостохранилища.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыбникова Л. С., Рыбников П. А., Наволокина В. Ю. Реабилитация техногенных объектов отработанных медноколчеданных месторождений на примере Левихинского рудника (Средний Урал) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2023. — Т. 334. — № 8. — С. 137–150.
2. Осипов В. И., Еремина О. Н. Девятнадцатые Сергеевские чтения. «Геозкологическая безопасность разработки месторождений полезных ископаемых» // Геозкология. Инженерная геология, гидрогеология, геохронология. — 2017. — № 5. — С. 91–94.
3. Рыбникова Л. С., Рыбников П. А., Наволокина В. Ю. Оценка влияния затопленного Левихинского медноколчеданного рудника на качество поверхностных вод реки Тагил // Проблемы недропользования. — 2019. — № 3. — С. 155–161.
4. Рыбникова Л. С., Рыбников П. А. Эколого-экономическая оценка шахтных вод на примере затопленных медно-колчеданных рудников Урала // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. — 2016. — № 1. — С. 52–65.
5. Табаксблат Л. С. Микроэлементная «нагрузка» рудничных вод колчеданных месторождений // Известия вузов. Горный журнал. — 1995. — № 5. — С. 130–140.
6. Семина Е. И., Савельева А. В., Савельев С. Н. Извлечение ионов тяжелых металлов из промывных сточных вод гальванического производства реагентным методом / Инновационные подходы в решении современных проблем рационального использования природных ресурсов и охраны окружающей среды. Сборник научных статей. — Алушта, 2019. — С. 317–319.
7. Смирнова В. С., Худорожкова С. А., Ручкинова О. И. Обоснование оптимальных условий реагентной очистки промывных вод от ионов тяжелых цветных металлов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. — 2019. — Т. 10. — № 2. — С. 106–118. DOI: 10.15593/2224-9826/2019.2.09.
8. Виноградов С. С. Экологически безопасное гальваническое производство. Изд. 2-е, перераб. и доп. — М.: Глобус, 2002. — 352 с.
9. Аксенов В. И., Царев Н. С., Вараева Е. А. Проблема нейтрализации кислых сульфатсодержащих сточных вод // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. — 2020. — № 3(147). — С. 26–32.
10. Аетов А. У., Мельник Ю. Д., Гаврилов Н. С. Исследование процесса утилизации сточных вод участка нейтрализации, пылеулавливания и газоочистки аффинажного производства ОАО «Красцветмет» с использованием сверхкритических флюидных сред // Вестник Технологического университета. — 2023. — Т. 26. — № 4. — С. 24–28. — DOI: 10.55421/1998-7072_2023_26_4_24.
11. Матвеева В. И. Обоснование возможности использования металлургических шлаков в процессах нейтрализации промышленных сточных вод / Современные тенденции развития химической технологии, промышленной экологии и экологической безопасности. Сборник научных статей. — СПб., 2023. — С. 18–20.
12. Смирнова К. А. Нейтрализация кислых сточных вод / Приоритетные направления развития науки в современном мире. Сборник научных статей. — Уфа, 2022. — С. 353–356.
13. Хиллюк А. В., Шестаков И. Я. Адсорбционная очистка воды от ионов металлов с применением электрохимического воздействия // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. — 2020. — Т. 2. — С. 508–510.
14. Гузенко М. В. Химические методы очистки сточных вод / Непрерывная система образования. Инновации и перспективы. Сборник научных статей. — Воронеж, 2020. — С. 238–240.
15. Соковнина О. В., Микрюкова Е. М. Возможные схемы и методы очистки и утилизации рудничных и дренажных сточных вод. Проектная схема очистки и утилизации рудничных сточных вод // Общество. — 2020. — № 3(18). — С. 16–20.
16. Кузьмина Е. А. Анализ методов очистки сточных вод горных предприятий от механических примесей // Инновации в технологиях и образовании. Сборник научных статей. — Белово, 2022. — С. 33–37.
19. Pervov A. G., Tikhonov K. V. A new technique to purify biologically treated wastewater by reverse osmosis: utilization of concentrate // Вестник МГСУ. — 2020. — Т. 15. — № 5. — С. 688–700. — DOI: 10.22227/1997-0935.2020.5.688-700.

20. *Вертинский А. П.* Современные методы очистки сточных вод: особенности применения и проблематика // *Инновации и инвестиции.* — 2019. — № 1. — С. 175–182.
21. *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.
22. *Маннанова Г. В.* Методы очистки промышленных сточных вод. — М.: РГГУ, 2019. — 815 с.
23. *Naef A. A., Qasem, Ramy H., Mohammed, Dahiru Lawal* Removal of heavy metal ions from wastewater: a comprehensive and critical review // *Clean Water.* 2021, vol. 4, no. 36, pp. 1–16. — DOI: 10.1038/s41545-021-00127-0.
24. *Смирнова В. С., Худорожкова С. А., Ручкинова О. И.* Обоснование оптимальных условий реагентной очистки промывных вод от ионов тяжелых цветных металлов // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура.* — 2019. — Т. 10. — № 2. — С. 106–118. DOI: 10.15593/2224-9826/2019.2.09.
25. *Шадрунова И. В., Зелинская Е. В., Орехова Н. Н., Горлова О. Е., Чекушина Т. В.* ESG-трансформации в сфере переработки техногенного минерального сырья // *Горная промышленность.* — 2023. — № 1. — С. 71–78.
26. *Зидан О. Д.* Методы извлечения ионов тяжелых металлов из сточных вод / Развитие современной науки и образования: актуальные вопросы, достижения и инновации. Сборник статей VIII Международной научно-практической конференции. — Пенза, 2023. — С. 21–23.
27. *Зубарева Г. И.* Флотация в технологических схемах очистки промышленных сточных вод // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура.* — 2019. — Т. 10. — № 4. — С. 67–77. DOI: 10.15593/2224.
28. *Luping Chang, Yijun Cao, Guixia Fan, Chao Li, Weijun Peng* A review of the applications of ion floatation: wastewater treatment, mineral beneficiation and hydrometallurgy // *RSC Advances.* 2019, vol. 4, no. 35, pp. 20226–20239. DOI: 10.1039/C9RA02905B.
29. *Алиакберова Э. Р., Джевага Н. В.* Извлечение редкоземельных элементов из отходов техногенного производства как один из способов улучшения экологической ситуации // *Химия и химическое образование XXI века. Сборник научных статей.* — СПб., 2019. — С. 92–93.
30. *Холикулов Д. Б., Элчибоев К. З., Минаковский А. Ф.* Извлечение металлов из технологических растворов АО «Алмалыкский ГМК» методом ионной флотации / *Химическая технология и техника. Материалы 88-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием).* — Минск: БГТУ, 2024. — С. 485–488.
31. *Медяник Н. Л., Шевелин И. Ю., Вафин В. Р.* Математическое моделирование механизма действия реагента глипет при ионной флотации тяжелых и цветных металлов из техногенных вод горных предприятий / *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. Т. 2.* — Магнитогорск, 2019. — С. 24.
32. *Алехина Е. Н., Бариева Э. Р.* Повышение эффективности сточных вод на предприятии химической промышленности с использованием электрофлотации // *Современные инновации.* — 2019. — № 3(31). — С. 11–12.
33. *Тхан З. Х., Хейн Т. А.* Электрофлотационное извлечение цветных металлов в присутствии солей жесткости / *Фундаментальные и прикладные исследования в науке и образовании. Сборник научных статей.* — Магнитогорск, 2022. — С. 135–138.
34. *Хейн, Т. А., Аунг П., Тхан З. Х., Колесников В. А.* Электрофлотация и седиментация в очистке сточных вод от смеси гидроксидов тяжелых и цветных металлов // *Успехи в химии и химической технологии.* — 2019. — Т. 33. — № 8(218). — С. 93–95.
35. *Стоянова А. Д., Колесников В. А., Владимирская З. С.* Электрофлотационное извлечение смеси металлов Cu, Ni, Zn, Cr, Fe из водного раствора в присутствии сырых талловых масел // *Успехи в химии и химической технологии.* — 2020. — Т. 34. — № 4(227). — С. 125–127.
36. *Смит Я., Вейн Х.* Ферриты / пер. с англ. Елкина Т. А., Залесского А. В., Стеценко П. Н. — М.: Изд-во иностранной литературы, 1962. — 504 с.
37. *Rady K. E., Elsad R. A.* Improvement the physical properties of nanocrystalline Ni-Zn ferrite using the substitution by (Mg-Ti) ions // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* 2020, vol. 498, article 166195. DOI: 10.1016/j.jmmm.2019.166195.

38. Narang S. B., Pubby K. Nickel spinel ferrites. A review // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2020, vol. 519, article 16763. DOI: 10.1016/j.jmmm.2020.167163.
39. Валов М. В., Ячменников П. Д., Полянскова Е. А., Ефремова С. Ю. Совершенствование системы очистки сточных вод предприятия приборостроения с ферритизацией гальваношлама / Экологический форсайт. Сборник научных статей, Саратов. — 2021. — С. 292 — 297.
40. Татаринцева Е. А., Ольшанская Л. Н., Бухарова Е. А. Очистка сточных вод от ионов тяжелых металлов и технологии утилизации металлосодержащих гальваношламов // *Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика*. — 2021. — № 3. — С. 53 — 64.
41. Волков Д. А., Чириков А. Ю., Буравлев И. Ю., Юдаков А. А. Очистка многокомпонентных неорганических сточных вод от катионов Cu^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} , Cr^{3+} , Pb^{2+} и Fe^{2+} , включающая утилизацию осадка // *Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук*. — 2019. — № 6(208). — С. 113 — 123. — DOI: 10.25808/08697698.2019.208.6.012.
42. Хайдаров Р. М. Снижение класса опасности гальванического шлама для поиска возможных путей утилизации // *Академическая публицистика*. — 2019. — № 4. — С. 15 — 22.
43. Шерстюк Д. П., Стариков А. Ю., Живулин В. Е., Жеребцов Д. А., Винник Д. А. Синтез, структура и свойства $\text{Zn}_{0,3}\text{Ni}_{0,7-x}\text{Co}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($x = 0-0,6$) феррита // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Химия*. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 92 — 100. — DOI: 10.14529/chem200406.
44. *Нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативы предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения. Утверждены приказом Министерства сельского хозяйства Российской Федерации от 13 декабря 2016 года № 552 (с изменениями на 12 октября 2018 года) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/420389120>. ПИАН*

REFERENCES

- Rybnikova L. S., Rybnikov P. A., Navolokina V. Yu. Rehabilitation of technogenic objects of depleted copper pyrite deposits on the example of the Levikhinsky mine (Middle Urals). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2023, vol. 334, no. 8, pp. 137 — 150. [In Russ].
- Osipov V. I., Eremina O. N. The Nineteenth Sergeev Readings. «Geocological Safety of Mineral Deposit Development». *Geocology. Engineering Geology, Hydrogeology, Geocryology*. 2017, no. 5, pp. 91 — 94. [In Russ].
- Rybnikova L. S., Rybnikov P. A., Navolokina V. Y. Assessment of the impact of the flooded Levikhinsky copper pyrite mine on the quality of surface waters of the Tagil river. *Problems of Subsoil Use*. 2019, no. 3, pp. 155 — 161. [In Russ].
- Rybnikova L. S., Rybnikov P. A. Ecological and economic assessment of mine waters on the example of flooded copper pyrite mines of the Urals. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2016, no. 1, pp. 52 — 65. [In Russ].
- Tabaksblat L. S. Microelement «load» of mine waters of pyrite deposits. *Minerals and Mining Engineering*. 1995, no. 5, pp. 130 — 140. [In Russ].
- Semina E. I., Savelyeva A. V., Savelyev S. N. Extraction of heavy metal ions from galvanic production wash water by the reagent method. *Innovatsionnye podkhody v reshenii sovremennykh problem ratsional'nogo ispol'zovaniya prirodnnykh resursov i okhrany okruzhayushchey sredy. Sbornik nauchnykh statey* [Innovative approaches to solving modern problems of rational use of natural resources and environmental protection. Collection of scientific articles], Alushta, 2019, pp. 317 — 319. [In Russ].
- Smirnova V. S., Khudorozhkova S. A., Ruchkinova O. I. Justification of optimal conditions for reagent purification of wash water from ions of heavy non-ferrous metals. *Bulletin of the Perm national research polytechnic university. Construction and architecture*. 2019, vol. 10, no. 2, pp. 106 — 118. [In Russ]. DOI: 10.15593/2224-9826/2019.2.09.
- Vinogradov S. S. *Ekologicheskii bezopasnoe gal'vanicheskoe proizvodstvo*. Izd. 2-e [Environmentally friendly galvanic production, 2nd ed.], Moscow, Globus, 2002, 352 p.
- Aksenov V. I., Tsarev N. S., Varava E. A. Problem of neutralization of acidic sulfate-containing wastewater. *Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie*. 2020, no. 3(147), pp. 26 — 32. [In Russ].
- Aetov A. U., Melnik Yu. D., Gavrilov N. S. Study of the process of wastewater disposal from the neutralization, dust collection and gas purification section of the refining production of Krasnots-

vetmet OJSC using supercritical fluid media. *Herald of technological university*. 2023, vol. 26, no. 4, pp. 24–28. [In Russ]. DOI: 10.55421/1998-7072_2023_26_4_24.

11. Matveeva V. I. Justification of the possibility of using metallurgical slags in the processes of neutralization of industrial wastewater. *Sovremennye tendentsii razvitiya khimicheskoy tekhnologii, promyshlennoy ekologii i ekologicheskoy bezopasnosti. Sbornik nauchnykh statey* [Modern trends in the development of chemical technology, industrial ecology and environmental safety. Collection of scientific articles], СПб., 2023, pp. 18–20. [In Russ].

12. Smirnova K. A. Neutralization of acidic wastewater. *Prioritetnye napravleniya razvitiya nauki v sovremennom mire. Sbornik nauchnykh statey* [Priority areas of science development in the modern world. Collection of scientific articles], Ufa, 2022, pp. 353–356. [In Russ].

13. Khilyuk A. V., Shestakov I. Ya. Adsorption purification of water from metal ions using electro-chemical action. *Actual problems of aviation and cosmonautics*. 2020, vol. 2, pp. 508–510. [In Russ].

14. Guzenko M. V. Chemical methods of wastewater treatment. *Nepreryvnaya sistema obrazovaniya. Innovatsii i perspektivy. Sbornik nauchnykh statey* [Continuous education system. Innovations and prospects. Collection of scientific articles], Voronezh, 2020, pp. 238–240. [In Russ].

15. Sokovnina O. V., Mikryukova E. M. Possible schemes and methods for cleaning and recycling mine and drainage wastewater. Design scheme for cleaning and recycling mine wastewater. *Society*. 2020, no. 3(18), pp. 16–20. [In Russ].

16. Kuzmina E. A. Analysis of methods for cleaning wastewater from mechanical impurities at mining enterprises. *Innovatsii v tekhnologiyakh i obrazovanii. Sbornik nauchnykh statey* [Innovations in technology and education. Collection of scientific articles], Belovo, 2022, pp. 33–37. [In Russ].

19. Pervov A. G., Tikhonov K. V. A new technique to purify biologically treated wastewater by reverse osmosis: utilization of concentrate. *Vestnik MGSU*. 2020, vol. 15, no. 5, pp. 688–700. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.5.688-700.

20. Vertinsky A. P. Modern methods of wastewater treatment: application features and problems. *Innovations and investments*. 2019, no. 1, pp. 175–182. [In Russ].

21. Mukhamedov K. G., Nasirova N. K., Mukhamedov Zh. K., Abdurakhmanov O. Kh. Wastewater treatment of galvanic industries by the reagent method. *Universum: technical sciences*. 2023, no. 7-3(112), pp. 51–56. [In Russ].

22. Mannanova G. V. *Metody ochistki promyshlennykh stochnykh vod* [Methods of industrial wastewater treatment], Moscow, RGGU, 2019, 815 p.

23. Naef A. A. Qasem, Ramy H. Mohammed, Dahiru Lawal Removal of heavy metal ions from wastewater: a comprehensive and critical review. *Clean Water*. 2021, vol. 4, no. 36, pp. 1–16. DOI: 10.1038/s41545-021-00127-0.

24. Smirnova V. S., Khudorozhkova S. A., Ruchkinova O. I. Justification of optimal conditions for reagent purification of wash water from ions of heavy non-ferrous metals. *Bulletin of the Perm national research polytechnic university. Construction and architecture*. 2019, vol. 10, no. 2, pp. 106–118. [In Russ]. DOI: 10.15593/2224-9826/2019.2.09.

25. Shadrunova I. V., Zelinskaya E. V., Orekhova N. N., Gorlova O. E., Chekushina T. V. ESG transformations in the field of processing of technogenic mineral raw materials. *Russian Mining Industry Journal*. 2023, no. 1, pp. 71–78. [In Russ].

26. Zidan O. D. Methods for extracting heavy metal ions from wastewater. *Razvitie sovremennoy nauki i obrazovaniya: aktual'nye voprosy, dostizheniya i innovatsii. Sbornik statey VIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [The development of modern science and education: current issues, achievements and innovations. Collection of articles of the VIII International Scientific and Practical Conference], Penza, 2023, pp. 21–23. [In Russ].

27. Zubareva G. I. Flotation in technological schemes of industrial wastewater treatment. *Bulletin of the Perm national research polytechnic university. Construction and architecture*. 2019, vol. 10, no. 4, pp. 67–77. [In Russ]. DOI: 10.15593/2224.

28. Luping Chang, Yijun Cao, Guixia Fan, Chao Li, Weijun Peng A review of the applications of ion floatation: wastewater treatment, mineral beneficiation and hydrometallurgy. *RSC Advances*. 2019, vol. 4, no. 35, pp. 20226–20239. DOI: 10.1039/C9RA02905B.

29. Aliakberova E. R., Dzhevaga N. V. Extraction of rare earth elements from technogenic production waste as one of the ways to improve the environmental situation. *Khimiya i khimicheskoe obra-*

zovanie XXI veka. *Sbornik nauchnykh statey* [Chemistry and chemical education of the 21st century. Collection of scientific articles], Saint-Petersburg, 2019, pp. 92 – 93. [In Russ].

30. Kholikulov D. B., Elchiboev K. Z., Minakovskiy A. F. Extraction of metals from process solutions of Almayk MMC JSC by ion flotation. *Khimicheskaya tekhnologiya i tekhnika. Materialy 88-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov (s mezhdunarodnym uchastiem)* [Chemical technology and engineering: materials of the 88th scientific and technical. conf. of faculty, researchers and graduate students (with international participation)], Minsk, BGTU, 2024, pp. 485 – 488. [In Russ].

31. Medyanik N. L., Shevelin I. Yu., Vafin V. R. Mathematical modeling of the mechanism of action of the reagent glyPET in ion flotation of heavy and non-ferrous metals from technogenic waters of mining enterprises. *Aktual'nye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya. T. 2* [Actual problems of modern science, technology and education, vol. 2], Magnitogorsk, 2019, pp. 24. [In Russ].

32. Alekhova E. N., Barieva E. R. Improving the efficiency of wastewater at a chemical industry enterprise using electroflotation. *Modern innovations*. 2019, no. 3(31), pp. 11 – 12. [In Russ].

33. Than Z. H., Hein T. A. Electroflotation extraction of non-ferrous metals in the presence of hardness salts. *Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya v nauke i obrazovanii. Sbornik nauchnykh statey* [Fundamental and applied research in science and education. Collection of scientific articles], Magnitogorsk, 2022, pp. 135 – 138. [In Russ].

34. Hein T. A., Aung P., Than Z. H., Kolesnikov V. A. Electroflotation and sedimentation in wastewater treatment from a mixture of heavy and non-ferrous metal hydroxides. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*. 2019, vol. 33, no. 8(218), pp. 93 – 95. [In Russ].

35. Stoyanova A. D., Kolesnikov V. A., Vladimirskaia Z. S. Electroflotation extraction of a mixture of Cu, Ni, Zn, Cr, Fe metals from an aqueous solution in the presence of crude tall oils. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*. 2020, vol. 34, no. 4(227), pp. 125 – 127. [In Russ].

36. Smith J., Wayne H. *Ferrity*, per. s angl. [Ferrites. English–Russian translation], Moscow, 1962, 504 p.

37. Rady K. E., Elsad R. A. Improvement the physical properties of nanocrystalline Ni-Zn ferrite using the substitution by (Mg-Ti) ions. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2020, vol. 498, article 166195. DOI: 10.1016/j.jmmm.2019.166195.

38. Narang S. B., Pubby K. Nickel spinel ferrites. A review. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2020, vol. 519, article 16763. DOI: 10.1016/j.jmmm.2020.167163.

39. Valov M. V., Yachmennikov P. D., Polyanskova E. A., Efremova S. Yu. Improving the wastewater treatment system of an instrument-making enterprise with ferritization of galvanic sludge. *Ekologicheskiiy forsayt. Sbornik nauchnykh statey* [Ecological foresight. Collection of scientific articles], Саратов. 2021, pp. 292 – 297. [In Russ].

40. Tatarintseva E. A., Ol'shanskaya L. N., Bukharova E. A. Wastewater treatment from heavy metal ions and technologies for the disposal of metal-containing galvanic sludge. *Bulletin of the Perm national research polytechnic university. Applied ecology. Urban development*. 2021, no. 3, pp. 53 – 64. [In Russ].

41. Volkov D. A., Chirikov A. Yu., Buravlev I. Yu., Yudakov A. A. Treatment of multicomponent inorganic wastewater from cations Cu^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} , Cr^{3+} , Pb^{2+} and Fe^{2+} , including sludge utilization. *Vestnik of the Far East branch of the Russian academy of sciences*. 2019, no. 6(208), pp. 113 – 123. [In Russ]. DOI: 10.25808/08697698.2019.208.6.012.

42. Khaidarov R. M. Reducing the hazard class of galvanic sludge to search for possible disposal routes. *Akademicheskaya publitsistika*. 2019, no. 4, pp. 15 – 22. [In Russ].

43. Sherstyuk D. P., Starikov A. Yu., Zhivulin V. E., Zherebtsov D. A., Vinnik D. A. Synthesis, structure and properties of $\text{Zn}_{0.3}\text{Ni}_{0.7-x}\text{Co}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($x = 0-0.6$) ferrite. *Bulletin of the South Ural state university. Series: Chemistry*. 2020, vol. 12, no. 4, pp. 92 – 100. [In Russ]. DOI: 10.14529/chem200406.

44. *Normativy kachestva vody vodnykh ob"ektov rybokhozyaystvennogo znacheniya, v tom chisle normativy predel'no dopustimyykh kontsentratsiy vrednykh veshchestv v vodakh vodnykh ob"ektov rybokhozyaystvennogo znacheniya. Utverzhdeny prikazom Ministerstva sel'skogo khozyaystva Rossiyskoy Federatsii ot 13 dekabrya 2016 goda No. 552 (s izmeneniyami na 12 oktyabrya 2018 goda)* [In Russ], available at: : <http://docs.cntd.ru/document/420389120>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Юрак Вера Васильевна*¹ — д-р экон. наук, доцент, профессор, зав. лабораторией, начальник НИЛЦ; старший научный сотрудник, Институт экономики Уральского отделения РАН; e-mail: vera_yurak@mail.ru, Scopus Author ID: 57190411535,

ORCID: 0000-0003-1529-3865, SPIN-код: 6822-2708,

*Аксенюшкина Марина Васильевна*¹ — лаборант исследователь, зав. лабораторией, e-mail: marakc@yandex.ru, ORCID 0009-0002-9985-0648,

*Завьялов Сергей Сергеевич*¹ — инженер,

младший научный сотрудник, e-mail: Sergey.Zavialov@m.ursmu.ru, Scopus Author ID: 57218648539;

ORCID ID: 0000-0002-2947-0458; SPIN-код: 2470-1547,

*Власов Игорь Александрович*¹ — младший научный сотрудник, e-mail: Vlasovbkpost@bk.ru, Scopus Author ID: 55809613800,

ORCID: 0009-0002-1842-8497; SPIN-код: 3294-1908,

¹ Уральский государственный горный университет.

Для контактов: Завьялов С.С., e-mail: Sergey.Zavialov@m.ursmu.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*V.V. Yurak*¹, Dr. Sci. (Econ.), Assistant Professor, Professor, Head of Laboratory, Head of RLC; Senior Researcher, Institute of Economics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 620014, Ekaterinburg, Russia,

e-mail: vera_yurak@mail.ru,

Scopus Author ID: 57190411535,

ORCID: 0000-0003-1529-3865,

SPIN-code: 6822-2708,

*M.V. Aksenyushkina*¹, Laboratory Assistant,

Head of Laboratory, e-mail: marakc@yandex.ru,

ORCID 0009-0002-9985-0648,

*S.S. Zavialov*¹, Engineer, Junior Researcher,

e-mail: Sergey.Zavialov@m.ursmu.ru,

Scopus Author ID: 57218648539;

ORCID ID: 0000-0002-2947-0458;

SPIN-code: 2470-1547,

*I.A. Vlasov*¹, Junior Researcher,

e-mail: Vlasovbkpost@bk.ru,

Scopus Author ID: 55809613800,

ORCID: 0009-0002-1842-8497; SPIN-code: 3294-1908,

¹ Ural State Mining University, 620144, Ekaterinburg, Russia.

Corresponding author: S.S. Zavialov, e-mail: Sergey.Zavialov@m.ursmu.ru.

Получена редакцией 16.07.2024; получена после рецензии 25.10.2024; принята к печати 10.11.2024.

Received by the editors 16.07.2024; received after the review 25.10.2024; accepted for printing 10.11.2024.