

Научная статья
УДК 628.3
<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2024-2/62-76>

Очистка шахтных сточных вод с использованием природных сорбентов в условиях стационарных очистных сооружений предприятий металлургии

Алексей Владимирович Смирнов, Владимир Николаевич Смирнов,
Константин Владимирович Смирнов✉

ООО СНПП «Южуралводоканалналадка», Челябинск, Российская Федерация
✉ecologia@mail.ru

Аннотация. Очистка шахтных вод в условиях горнодобывающей промышленности представляет собой баланс между качеством сбрасываемых вод в поверхностные водные объекты и стоимостью очистки. В статье рассматривается вопрос использования природных сорбентов для очистки шахтных и карьерных вод. На примере очистных сооружений производительностью 60 м³/ч, работающих с использованием фильтров ионообменных смол, для исследований произведена замена загрузки на природные сорбенты. На основе проведенных исследований и анализа полученных данных выявлены закономерности очистки шахтных вод. Определены наилучшие скорости фильтрации при использовании напорных фильтров, заполненных керамическим фильтрующим гранулированным материалом, и гранулированного глауконита. Разработаны предложения по внедрению изученных способов очистки шахтных вод. Проведенные исследования доказали эффективность очистки шахтных вод с использованием природных сорбентов. Впервые исследована возможность очистки шахтных вод с использованием природных сорбентов на промышленных очистных сооружениях.

Ключевые слова: очистка шахтных вод, металлургические предприятия, использование природных сорбентов, снижение стоимости очистки сточных вод, производственные испытания, технология очистки сорбентами, очистка сточных вод от металлов

Для цитирования: Смирнов А.В., Смирнов В.Н., Смирнов К.В. Очистка шахтных сточных вод с использованием природных сорбентов в условиях стационарных очистных сооружений предприятий металлургии // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2024. № 2(59). С. 62–76.

Финансирование. Финансирование осуществлено за счет средств ООО «Специализированное научно-производственное предприятие «Южуралводоканалналадка».

Original article

Purification of mine wastewater using natural sorbents in the conditions of stationary treatment facilities of metallurgy enterprises

Aleksei V. Smirnov, Vladimir N. Smirnov, Konstantin V. Smirnov✉

Specialized Scientific and Production Company «South Ural Water Treatment» LLC, Chelyabinsk, Russian Federation
✉ecologia@mail.ru

Abstract. Mine water treatment in the mining industry is a balance between the quality of water discharged into surface water bodies and the cost of treatment. The article discusses the issue of using natural sorbents for the purification of mine and quarry waters. Using the example of existing treatment facilities with a capacity of 60 m³/hour, operating using ion exchange resin filters, the loading was replaced with natural sorbents for research. Based on the research and analysis of the data obtained, patterns of mine water purification were identified. The best filtration rates were determined when using pressure filters filled with ceramic granular filtering material and granulated glauconite. Proposals have been developed for the implementation of the

studied methods of mine water purification. The conducted studies have proven the effectiveness of mine water purification using natural sorbents. For the first time, the possibility of purifying mine water using natural sorbents at industrial treatment plants has been studied.

Keywords: treatment of mine water, metallurgical enterprises, use of natural sorbents, reduction in the cost of wastewater treatment, production testing of sorbent treatment technology, wastewater treatment from metals

For citation: Smirnov A.V., Smirnov V.N., Smirnov K.V. Purification of mine wastewater using natural sorbents in the conditions of stationary treatment facilities of metallurgy enterprises. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2024, no. 2(59), pp. 62–76. (In Russ.).

Foundation: The financing was carried out at the expense of own funds of the Specialized Scientific and Production Company «South Ural Water Treatment» LLC.

Введение

Очистка шахтных вод от загрязнений перед сбросом их в поверхностный водный объект и снижение стоимости очистки – актуальная проблема современности. Сточные воды, сбрасываемые в водоем, должны быть очищены до такой степени, чтобы они не оказывали на него вредного влияния.

Сброс неочищенных сточных вод в поверхностные водные объекты в условиях горнодобывающих предприятий нарушает законодательство России и противоречит рациональному использованию природных ресурсов. Горнодобывающие предприятия в большинстве случаев являются градообразующими, следовательно, сохранение водных ресурсов – одна из их главных целей, направленных на обеспечение своих сотрудников достойной средой обитания. Для очистки шахтных вод в большинстве случаев применяется физико-химическая очистка с использованием метода нейтрализации шахтных вод известковым молоком $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$, сернокислым алюминием $[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3]$ или других коагулянтов и флокулянтов с последующим отстаиванием в отстойниках или искусственных прудах. В ряде сооружений используются напорные фильтры с песчаной или коалисцирующей загрузкой 1-й ступени очистки с ионообменной смолой 2-й ступени очистки. Очистка шахтных вод методом нейтрализации в основном не приводит к требуемому законодательством качеству сбрасываемых вод. Очистные сооружения с использованием ионообменной смолы, несмотря на высокую эффективность, дороги в эксплуатации.

Шахтные и карьерные воды формируются в местах горных выработок открытым и закрытым способами при попадании подземных вод и осадков. Основными загрязняющими веществами в сбрасываемых водах являются ионы металлов и ряд анионов, таких как сульфаты, хлориды. Антропогенными источниками загрязнения водных объектов являются сточные воды ряда производств, прежде всего гальванических цехов, заводов синтетического каучука, никелевых обогатительных фабрик, горнодобывающих производств на месторождениях сульфидных медно-никелевых и железно-никелевых руд. Огромные выбросы никеля сопровождают сжигание ископаемого топлива.

При условии различия качества и количества сбрасываемых шахтных вод не существует универсального способа их очистки. Применение мембранных способов очистки (ультрафильтрации и обратного осмоса) позволяет достичь значений предельно допустимых концентраций (ПДК) рыбохозяйственного назначения по загрязняющим примесям на сбросе в водоем [2]. Однако существенные объемы сброса и дороговизна использования мембранных фильтров обуславливают нерациональность использования их при очистке шахтных вод. Перспективным направлением представляется очистка шахтных вод модифицированными алюмосиликатными сорбентами, позволяющими производить извлечение ионов металлов в широком диапазоне рН без изменения солевого состава жидкой фазы [3].

В современной литературе описаны способы очистки, в том числе от фенола, с использованием активированного угля из ветвей финиковой пальмы, Результаты работ показали, что емкость адсорбции и эффективности удаления при активации сорбента ортофосфорной кислотой обладает более высокой активностью к фенолу [9]. Важным фактором является и воз-

возможность повторного использования отработанного материала [10]. Ряд авторов показали значительную эффективность очистки сточной воды с помощью природных материалов, в частности доказана эффективность очистки натуральной глиной от шестивалентного хрома [1].

Изучение сорбционных особенностей природных сорбентов является важнейшей задачей, особенно в условиях нахождения Российской Федерации под экономическими ограничениями недружественных стран, так как ряд материалов (оборудование для их производства), используемых ранее для очистки стоков, поставлялись из-за рубежа. Судя по публикациям последних пяти лет, недостаточно изучены и сорбционные возможности природных материалов.

Задача данного исследования – определение целесообразности применения природных сорбентов для очистки шахтных вод, в том числе в целях уменьшения стоимости очистки.

Материалы и методы

Для исследовательских и опытных испытаний по подбору загрузочных материалов (сорбентов) для очистки шахтных вод был выбран способ очистки с использованием фильтрующих материалов, в том числе с сорбционной способностью. В целях более полного изучения способов очистки на конкретном стоке промышленного предприятия использовались сорбенты и загрузки, применяемые в различных условиях, в том числе с разной скоростью, длительной планируемой фильтрации, и в различных комбинациях (смесях).

Керамический фильтрующий гранулированный материал (КФГМ). Представляет собой гранулы от бело-светло-серого до светло-розового цвета величиной от 1,5 до 2,5 мм. Изготавливается из высококачественного каолина. По данным К.Л. Тимофеева, гранулы обладают высокой сорбционной емкостью при очистке тяжелых металлов, взвешенных веществ, а также отличаются низкой истираемостью [6]. При работе в фильтрах требуется четкое соблюдение технологического процесса использования. Регенерация загрузки предусматривает только водную промывку без дополнительных капитальных затрат. Основу КФГМ составляют 7 химических элементов, из которых состоит каолин. Эти элементы придают КФГМ уникальные свойства – адсорбировать на себе (на гранулы) соли тяжелых металлов, таких как никель, медь, железо, цинк, хром, свинец, олово [5]. Поставщиком сорбента является ООО «Керамические сорбенты» (Челябинская область).

Гранулированный глауконит представляет собой гранулы коричневого цвета, цилиндрической формы, диаметром 2 мм и длиной до 4 мм. Сорбент не горюч, не токсичен, не растворяется в воде, кислотах и разбавленных щелочах. Область химической устойчивости $\text{pH} = 1-10$. Данный сорбент используется для концентрирования микроэлементов из водной среды в процессах очистки и дезактивации жидких радиоактивных отходов, водоподготовки и водоочистки. Механическая прочность на раздавливание при испытании под давлением, соответствующим давлению 1 м слоя сорбента на 1 см² площади, составляет 92–97%. Исследования глауконита проводились аккредитованными в Госстандарте России центрами и лабораториями. Глауконит применяется согласно ТУ 2164-003-45670985-05, разработанным Центром военно-технических проблем биологической защиты НИИМ МО РФ. Глауконит предназначен для использования в качестве сорбента тяжелых металлов, радионуклидов и нефтепродуктов при очистке сточных и оборотных вод, почв, подвергающихся техногенному загрязнению. По данным Е.А. Григорьевой, глауконит обладает высокими абсорбционными и катионообменными свойствами [7]: ионообменная способность – 0,1–0,4 моль/кг, пористость – 20–25%, твердость – 1,3–2,0, плотность – 1,8–3,0, размер частиц – 0,3–0,65 мм. Емкость катионного обмена концентрата глауконита изменяется от 390 до 550 мг/экв. на 1 г навески. Минерал обладает способностью избирательного поглощения катионов и долгоживущих радиоизотопов. Предельная поглотительная способность по отношению к тяжелым металлам: меди – 781,2, никеля – 342,4, железа – 1317 мг/экв. на 1 кг минерала [4]. Поставщиком сорбента является ООО «Глауконит» (Челябинская область).

Фильтровальный материал марки ОДМ-2Ф. Сырьем для фильтрующей загрузки марки ОДМ-2Ф служат опоки – легкая тонкопористая плотная кремнистая порода, состоящая

в своей массе из окремелых опаловых створок диатомовых водорослей и их обломов. Размер макропор от 10–3 мм. По данным М.А. Гридевой и ее соавторов, ОДМ-2Ф представляет собой гранулированный материал терракотового цвета с содержанием основных компонентов: SiO₂ до 86%, Fe₂O₃ не более 3,2%, Al₂O₃, MgO, CaO – до 8%. Один грамм ОДМ-2Ф имеет развитую удельную поверхность – около 120 м². По механической прочности материал ОДМ-2Ф превосходит все известные отечественные фильтрующие материалы [8]. Поставщиком сорбента является ООО «Торговый дом «ОКПУР» (Свердловская область).

Все испытания проводились на опытно-промышленной установке, которая сооружена на базе очистных сооружений шахтных вод, расположенных на территории Южного Урала, качество исходной сточной воды представлено в табл. 1.

Таблица / Table 1

Исходный состав сточных вод
The initial composition of wastewater

Определяемые показатели	Методики (методы) анализа	Сточная вода.
Водородный показатель среды, ед. pH	ПНД Ф 14.1:2:3:4.121-97	8,0
ХПК, мгО/л	ПНД Ф 14.1:2:3.100-97	13,0
Взвешенные вещества, мг/л	ПНД Ф 14.1:2:3.110-97	3,0
Магний, мг/л	МИ 17-02-01-2021 (1)	50
Медь, мг/л	ПНД Ф 14.1:2:4.214-06	0,008
Цинк, мг/л	ПНД Ф 14.1:2:4.214-06	0,09
Марганец, мг/л	ПНД Ф 14.1:2.61-96	0,03
Железо общее, мг/л	ПНД Ф 14.1:2:3:4.50-2023	0,091
Нитрат-ион, мг/л	ПНД Ф 14.1:2:4:4-95	45
Нитрит-ион, мг/л	ПНД Ф 14.1:2:3:4.3-2023	0,40
Аммоний-ион, мг/л	ПНД Ф 14.1:2:4.262-10	0,42
Сульфат-ион, мг/л	ПНД Ф 14.1:2:3:4.240-2007	400

Установка представляет собой три фильтра высотой 7000 мм, диаметром 3500 м. Фильтр № 1 засыпан фильтровальным материалом марки ОДМ-2Ф фракции 0,7–1,5 мм на высоту 1200 мм; фильтр № 2 – сорбентом «Глауконит», гранулированным Гл.-Гр-1, на высоту 1900 мм; фильтр № 3 – сорбентом КФГМ-7 2,0 «Стандарт» на высоту 1900 мм.

Установка находится в постоянном заполнении, так как данное условие является обязательным для работы фильтра. Очистка сточных вод должна осуществляться за счет образования на частицах загрузки оксидной пленки, которая адсорбирует на себе загрязняющие вещества, а также на пористости сорбирующего материала.

Установка позволяет запускать в работу фильтры как в последовательном режиме по схеме: фильтр № 1→фильтр № 2→фильтр № 3, так и параллельном режиме по схеме: фильтр № 1→фильтр № 2; фильтр № 1→фильтр № 3.

Подача воды на фильтрацию осуществляется при открытии задвижки в различных объемах от 23 до 63 м³/ч на фильтр № 1, и далее в различных режимах на фильтр № 2 и фильтр № 3.

Результаты

Опытные очистные сооружения, заполненные природными фильтрующими материалами, запущены в работу по схеме параллельной фильтрации: очищаемая сточная вода подается на фильтр, заполненный сорбентом ОДМ-2Ф, после которого распределяется в одинаковом объеме на фильтр, заполненный КФГМ, и фильтр, заполненный гранулированным глауконитом по схеме фильтрации: фильтр № 1→фильтр № 2 и фильтр № 1→фильтр № 3. После двух суток фильтрации отобраны пробы сточной воды при входе из фильтров в специально оборудованных местах

В результате отработки режима (табл. 2) очистка по меди в лучшей степени проходит с использованием сорбента Глауконит гранулированный (Гл.-Гр.-1). Очистка по цинку максимальна на втором фильтре – 100 %, минимальная очистка по цинку (20%) наблюдается на фильтре № 1, максимальная очистка (100 %) по марганцу – на фильтре № 2. Отмечается максимальная очистка по меди (70%) на фильтре № 2, минимальная очистка по меди (24%) – на фильтре № 3. Скорость фильтрации составляет 7 м/ч, интенсивность промывки – 6 л/с/м².

Таблица / Table 2

Эффективность очистки сточных вод, %
Efficiency of wastewater treatment. %

Определяемые показатели	Методики (методы) анализа	Эффективность фильтра № 1	Эффективность фильтра № 2	Эффективность фильтра № 3
Медь	ПНД Ф 14.1:2:4.214-06	27	70	24
Цинк	ПНД Ф 14.1:2:4.214-06	20	100	90
Марганец	ПНД Ф 14.1:2.61-96	0	100	0

После четырех суток работы по схеме фильтрации: фильтр № 1 → фильтр № 2; фильтр № 1 → фильтр № 3, отобраны пробы сточной воды при входе из фильтров в специально оборудованных местах (табл. 3).

Скорость фильтрации составляет 7 м/ч. Интенсивность промывки фильтров – 6 л/с/м².

Таблица / Table 3

Эффективность очистки сточных вод, %
Efficiency of wastewater treatment. %

Определяемые показатели	Методики (методы) анализа	Эффективность фильтра № 1	Эффективность фильтра № 2	Эффективность фильтра № 3
ХПК	ПНД Ф 14.1:2:3.100-97	вз	40	62
Взвешенные вещества	ПНД Ф 14.1:2:3.110-97	0	0	0
Магний	РД 52.24.395-2017 (прил.Б)	9	5	вз
Медь	ПНД Ф 14.1:2:4.214-06	24	30	25
Цинк	ПНД Ф 14.1:2:4.214-06	46	65	52
Марганец	ПНД Ф 14.1:2.61-96	0	0	0
Железо общее	ПНД Ф 14.1:2:3:4.50-2023	64	49	8
Нитрат-ион	ПНД Ф 14.1:2:4:4-95	вз	0	19
Нитрит-ион	ПНД Ф 14.1:2:3:4.3-2023	вз	вз	вз
Аммоний-ион	ПНД Ф 14.1:2:4.262-10	21	24	12
Сульфат-ион	ПНД Ф 14.1:2:3:4.240-2007	вз	4	вз

Примечание: здесь и далее вз – вторичное загрязнение.

В процессе испытаний наиболее высокая эффективность (30 %) по отношению к меди наблюдается у фильтра № 2, наиболее низкая (25 %) – у фильтра № 2. Наиболее высокая эффективность (64 %) по отношению к железу общему отмечается у фильтра № 1, наиболее низкая (8%) – у фильтра № 3. Наиболее высокая эффективность (65 %) по отношению к цинку наблюдается у фильтра № 2, наиболее низкая (46%) – у фильтра № 1. Низкая очистка по азотной группе может объясняться погрешностью проведения анализа. Анализируя результаты, можно сделать вывод о том, что началось нарастание оксидной пленки, очистка сточных вод при скорости фильтрации 7 м/ч (фильтр №1), 3,5 м/ч (фильтр № 2 и фильтр № 3) осуществляется в требуемом диапазоне. Произведена промывка (взрыхление) фильтров при интенсивности 5 л/с/м² в течение 15 мин.

После трех суток работы фильтров отобраны пробы сточной воды в специально оборудованных местах по схеме параллельной фильтрации: фильтр № 1→фильтр № 2; фильтр № 1→фильтр № 3 (табл. 4).

Таблица / Table 4

Эффективность очистки сточных вод, %
Efficiency of wastewater treatment. %

Определяемые показатели	Методики (методы) анализа	Эффективность фильтра № 1	Эффективность фильтра № 2	Эффективность фильтра № 3
ХПК	ПНД Ф 14.1:2:3.100-97	8	вз	вз
Взвешенные вещества	ПНД Ф 14.1:2:3.110-97	0	0	0
Магний	МИ 17-02-01-2021 (1)	0	0	вз
Медь	ПНД Ф 14.1:2:4.214-06	27	45	60
Цинк	ПНД Ф 14.1:2:4.214-06	35	90	95
Марганец	ПНД Ф 14.1:2.61-96	0	0	0
Железо общее	ПНД Ф 14.1:2:3:4.50-2023	68	6	11
Сульфат-ион	ПНД Ф 14.1:2:3:4.240-2007	вз	0	вз

При проведении испытаний наиболее высокая эффективность (60 %) по отношению к меди наблюдается у фильтра № 2, наиболее низкая (25 %) – у фильтра № 1. Наиболее высокая эффективность (68 %) по отношению к железу общему наблюдается у фильтра №1, наиболее низкая (6%) – у фильтра № 1. Наиболее высокая эффективность (95 %) по отношению к цинку наблюдается у фильтра № 3, наиболее низкая (35%) – у фильтра № 1. Анализируя результат, можно сделать вывод о том, что очистка сточных вод при скорости фильтрации 7 м/ч (фильтр № 1), 3,5 м/ч (фильтр № 2 и фильтр № 3) осуществляется в требуемом диапазоне.

Произведена зарядка (активация, модификация) фильтров 5%-ным раствором Na(OH). Фильтры запущены в работу в параллельном режиме по схеме фильтр № 1→фильтр № 2; фильтр № 1→фильтр № 3, после суток работы – по схеме фильтр № 1→фильтр № 2; фильтр № 1→фильтр № 2 при скорости фильтрации 3,5 м/ч на фильтрах фильтр № 2 и фильтр № 3, а на фильтре фильтр № 1 – при скорости 7 м/ч и работы фильтра после зарядки (активации, модификации) сорбентов 5%-ным раствором Na(OH), отобраны пробы сточной воды в специально оборудованных местах.

Таблица / Table 5

Эффективность очистки сточных вод, %
Efficiency of wastewater treatment. %

Определяемые показатели	Методики (методы) анализа	Эффективность фильтра № 1	Эффективность фильтра № 2	Эффективность фильтра № 3
ХПК	ПНД Ф 14.1:2:3.100-97	вз	40	27
Взвешенные вещества	ПНД Ф 14.1:2:3.110-97	0	0	0
Магний	МИ 17-02-01-2021 (1)	вз	30	7
Медь	ПНД Ф 14.1:2:4.214-06	53	48	24
Цинк	ПНД Ф 14.1:2:4.214-06	45	95	85
Марганец	ПНД Ф 14.1:2.61-96	0	0	0
Железо общее	ПНД Ф 14.1:2:3:4.50-2023	75	5	15
Нитрат-ион	ПНД Ф 14.1:2:4:4-95	вз	4	14
Нитрит-ион	ПНД Ф 14.1:2:3:4.3-2023	вз	вз	вз
Аммоний-ион	ПНД Ф 14.1:2:4.262-10	84	0	0
Сульфат-ион	ПНД Ф 14.1:2:3:4.240-2007	вз	вз	2

При проведении испытаний наиболее высокая эффективность по отношению к меди наблюдается у фильтров № 1 и № 2, наиболее низкая (25 %) – у фильтра № 3. Наиболее высокая

эффективность по отношению к железу общему (75 %) наблюдается у фильтра № 1, наиболее низкая (5%) – у фильтра № 2. Наиболее высокая эффективность (95 %) по отношению к цинку наблюдается у фильтра № 2, наиболее низкая (45%) по железу общему – у фильтра № 1. Эффективность очистки по азотной группе объясняется началом процессов нитрификации в фильтрах. Анализируя результат, можно сделать вывод о том, что очистка сточных вод при скорости фильтрации 7 м/ч (фильтр №1), 3,5 м/ч (фильтр № 2 и фильтр № 3) осуществляется в требуемом диапазоне (табл. 5).

Фильтры оставлены без промывки (взрыхления) по схеме: фильтр № 1→фильтр № 2→фильтр № 3 (Фильтр, заполненный сорбентом ОДМ-2Ф → Фильтр, заполненный сорбентом КФГМ → Фильтр, заполненный сорбентом Глауконит гранулированный). После 4-дневной работы фильтров по схеме фильтр № 1→фильтр № 2→фильтр № 3 при скорости фильтрации 7 м/ч отобраны пробы сточной воды в специально оборудованных местах.

Очистка сточных вод при скорости фильтрации 7 м/ч осуществляется в требуемом диапазоне. Фильтры работают в последовательном режиме. Общая эффективность очистки по цинку достигает 98 %, очистка по меди – 76 %, по марганцу – 85 %, по железу общему – 80 % (табл. 6).

Таблица / Table 6

Эффективность очистки сточных вод, %
Efficiency of wastewater treatment. %

Определяемые показатели	Методики (методы) анализа	Эффективность фильтра № 1	Эффективность фильтра № 2	Эффективность фильтра № 3	Эффективность общая
ХПК	ПНД Ф 14.1:2:3.100-97	вз	37,5	вз	вз
Взвешенные вещества	ПНД Ф 14.1:2:3.110-97	0	0	0	0
Магний	МИ 17-02-01-2021 (1)	2	3	0	5
Медь	ПНД Ф 14.1:2:4.214-06	50	5	50	76
Цинк	ПНД Ф 14.1:2:4.214-06	30	96	45	98
Марганец	ПНД Ф 14.1:2.61-96	80	0	0	85
Железо общее	ПНД Ф 14.1:2:3:4.50-2023	75	5	0	80
Сульфат-ион	ПНД Ф 14.1:2:3:4.240-2007	вз	0,7	вз	вз

Произведена отмывка фильтров по 20 мин при интенсивности 5 л/с/м². Фильтрация запущена в последовательном режиме по схеме фильтр № 1→фильтр № 2→фильтр № 3 при скорости фильтрации 5 м/ч. После суток работы фильтра от повторного запуска отобраны пробы сточной воды при входе и выходе на фильтры в специально оборудованных местах.

При проведении испытаний отмечена очистка по цинку, которая достигает 99 % на фильтре № 2. Фильтры работают в последовательном режиме. Общая очистка по меди составила 75%, общая эффективность по марганцу – 83% (табл. 7). Вторичное загрязнение по железу общему объясняется затянутым циклом фильтрации и накоплением железа общего в загрузке фильтра. Снижение концентрации аммоний-иона объясняется процессами нитрификации в загрузке фильтра.

Таблица / Table 7

Эффективность очистки сточных вод, %
Efficiency of wastewater treatment. %

Определяемые показатели	Методики (методы) анализа	Эффективность фильтра № 1	Эффективность Фильтра № 2	Эффективность фильтра № 3	Эффективность общая
ХПК	ПНД Ф 14.1:2:3.100-97	8	вз	0	вз
Взвешенные вещества	ПНД Ф 14.1:2:3.110-97	0	0	0	0

Окончание табл. 7

Определяемые показатели	Методики (методы) анализа	Эффективность фильтра № 1	Эффективность фильтра № 2	Эффективность фильтра № 3	Эффективность общая
Магний	РД 52.24.395-2017 (прил.Б)	12	вз	10	14
Медь	ПНД Ф 14.1:2:4.214-06	50	30	25	75
Цинк	ПНД Ф 14.1:2:4.214-06	32	99	0	99
Марганец	ПНД Ф 14.1:2.61-96	83	0	0	83
Железо общее	ПНД Ф 14.1:2:3:4.50-2023	76	20	вз	вз
Нитрат-ион	ПНД Ф 14.1:2:4:4-95	вз	0	вз	вз
Нитрит-ион	ПНД Ф 14.1:2:3:4.3-2023	вз	вз	0	вз
Аммоний-ион	ПНД Ф 14.1:2:4.262-10	89	0	0	89
Сульфат-ион	ПНД Ф 14.1:2:3:4.240-2007	0	вз	2	2

Промывка фильтров (взрыхление) не проводилась в целях определения фильтроцикла. Оставлено в работу на скорости 3,5 м/ч по схеме фильтр № 1→фильтр № 2→фильтр № 3. Отобраны пробы сточной воды при входе и выходе на фильтры в специально оборудованных местах.

Фильтры работают в последовательном режиме. В ходе испытаний отмечена высокая общая очистка по цинку – 98 %. Общая очистка по марганцу достигает 92 %, по меди – 74 %, по железу – 62 % (табл. 8).

Таблица / Table 8

Эффективность очистки сточных вод, %
Efficiency of wastewater treatment. %

Определяемые показатели	Методики (методы) анализа	Эффективность фильтра № 1	Эффективность фильтра № 2	Эффективность фильтра № 3	Эффективность общая
ХПК	ПНД Ф 14.1:2:3.100-97	15	0	0	15
Взвешенные вещества	ПНД Ф 14.1:2:3.110-97	0	0	0	0
Магний	МИ 17-02-01-2021 (1)	5	вз	5	5
Медь	ПНД Ф 14.1:2:4.214-06	68	вз	32	74
Цинк	ПНД Ф 14.1:2:4.214-06	26	96	45	98
Марганец	ПНД Ф 14.1:2.61-96	90	0	0	92
Железо общее	ПНД Ф 14.1:2:3:4.50-2023	59	13	вз	62
Сульфат-ион	ПНД Ф 14.1:2:3:4.240-2007	0	1	вз	вз

Произведена промывка фильтра при интенсивности промывки 6 л/с/м² в течение 30 мин (интенсивность промывки ограничена техническими возможностями предприятия).

Сооружения запущены в работу на скорости 3,5 м/ч по схеме фильтр № 1→фильтр № 2→фильтр № 3.

После суток работы отобраны пробы сточной воды при входе и выходе на фильтры в специально оборудованных местах.

Фильтры работают в последовательном режиме. Общая эффективность очистки при данных условиях фильтрации по меди составила 70 %, по цинку – 98 %, по марганцу – 90 %. Низкая эффективность очистки по железу общему объясняется низкими концентрациями вещества в исходной воде (табл. 9).

Таблица / Table 9

Эффективность очистки сточных вод, %
Efficiency of wastewater treatment. %

Определяемые показатели	Методики (методы) анализа	Эффективность фильтра № 1	Эффективность фильтра № 2	Эффективность фильтра № 3	Эффективность общая
ХПК	ПНД Ф 14.1:2:3.100-97	32	вз	вз	вз
Взвешенные вещества	ПНД Ф 14.1:2:3.110-97	3	0	0	3
Магний	МИ 17-02-01-2021 (1)	вз	0	0	вз
Медь	ПНД Ф 14.1:2:4.214-06	35	40	15	70
Цинк	ПНД Ф 14.1:2:4.214-06	26	95	25	98
Марганец	ПНД Ф 14.1:2.61-96	90	0	0	90
Железо общее	ПНД Ф 14.1:2:3:4.50-2023	9	3	3	15
Сульфат-ион	ПНД Ф 14.1:2:3:4.240-2007	вз	вз	1	1

Произведена промывка фильтра, заполненного сорбентом ОДМ-2Ф, при интенсивности 6 л/с/м² в течение 30 мин. Произведено заполнение фильтров (зарядка) с сорбентами 5 % раствором Na(OH). Далее проведена промывка фильтров при интенсивности 3 л/с/м² до прекращения выхода щелочной воды. После этого запущен процесс фильтрации при скорости 3,5 м/ч.

Таблица / Table 10

Эффективность очистки сточных вод, %
Efficiency of wastewater treatment. %

Определяемые показатели	Методики (методы) анализа	Эффективность фильтра № 1	Эффективность фильтра № 2	Эффективность фильтра № 3	Эффективность общая
ХПК	ПНД Ф 14.1:2:3.100-97	вз	29	вз	вз
Взвешенные вещества	ПНД Ф 14.1:2:3.110-97	0	вз	55	0
Магний	МИ 17-02-01-2021 (1)	3	89	0	88
Медь	ПНД Ф 14.1:2:4.139-98	55	25	0	65
Медь	ПНД Ф 14.1:2:4.139-98	35	30	вз	45
Цинк	ПНД Ф 14.1:2:4.139-98	35	95	65,5	99
Марганец	ПНД Ф 14.1:2.61-96	85	0	0	85
Железо общее	ПНД Ф 14.1:2:3:4.50-2023	75	15	вз	77
Нитрат-ион	ПНД Ф 14.1:2:4:4-95	7	вз	2	5
Нитрит-ион	ПНД Ф 14.1:2:3:4.3-2023	вз	2,7	0	вз
Аммоний-ион	ПНД Ф 14.1:2:4.262-10	88	0	0	88
Сульфат-ион	ПНД Ф 14.1:2:3:4.240-2007	вз	2	0	2

Общая эффективность очистки сточных вод по магнию – 88 %, причем оновная очистка проходит на фильтре № 1; общая очистка по меди составляет 65 % (45 %), марганцу – 85 %, цинку – 99 %, железу общему – 77 % (табл. 10). При отборе дополнительного анализа по меди

не установлено улучшение качества очистки по ионам меди при повышении рН, хотя данную особенность отмечают производители сорбентов. Учитывая вышеизложенное, можно сделать вывод о том, что ионы меди адсорбируют на загрузочном материале за счёт образования оксидной плёнки и сорбционных свойств загрузки. Отмечаются процессы нитрификации в загрузке фильтров. Фильтры оставлены на фильтрацию при скорости 3,5 м/ч в последовательном режиме. После десятидневной фильтрации отобраны пробы сточной воды при входе и выходе на фильтры в специально оборудованных местах.

Фильтры работают в последовательном режиме. Общая эффективность очистки по цинку составляет 99 %, причем основная очистка происходит на фильтре № 2 и фильтре № 3. Общая очистка по меди достигает 75 %, по марганцу – 87 %, причем основная очистка проходит на фильтре № 1 (табл. 11).

Таблица / Table 11

Эффективность очистки сточных вод, %
Efficiency of wastewater treatment. %

Определяемые показатели	Методики (методы) анализа	Эффективность фильтра № 1	Эффективность фильтра № 2	Эффективность фильтра № 3	Эффективность общая
ХПК	ПНД Ф 14.1:2:3.100-97	вз	вз	вз	вз
Взвешенные вещества	ПНД Ф 14.1:2:3.110-97	0	0	0	0
Магний	МИ 17-02-01-2021 (1)	вз.	20	3	17
Медь	ПНД Ф 14.1:2:4.214-06	50	38	23	75
Цинк	ПНД Ф 14.1:2:4.214-06	0	98	70	99
Марганец	ПНД Ф 14.1:2.61-96	87	0	0	87
Железо общее	ПНД Ф 14.1:2:3:4.50-2023	70	2	вз	68
Сульфат-ион	ПНД Ф 14.1:2:3:4.240-2007	0	0	0	0

Произведена промывка фильтра при интенсивности промывки 6 л/с/м². Фильтры оставлены на фильтрацию при скорости фильтрации 3,5 м/ч в последовательном режиме. После двух суток работы фильтров отобраны пробы сточной воды при входе и выходе на фильтры в специально оборудованных местах.

Фильтры работают в последовательном режиме. При проведении испытаний отмечена очистка по марганцу 85% на фильтре № 1, общая очистка по железу общему составляет 85%, на фильтре № 1 очистка по железу общему составила 75%, а на фильтре № 2 очистка составила 35%. Эффективность очистки по меди на фильтре № 1 достигла 45% и на фильтре № 2 – 60%, общая эффективность составила 85%, Общая эффективность по цинку составила 98%. Общая эффективность по железу общему составила 85%, Очистка по меди, цинку, марганцу, железу общему проходит до ПДК рыбохозяйственного значения. Отмечены процессы нитрификации в загрузке фильтров (табл. 12).

Произведена промывка фильтра при интенсивности промывки 6 л/с/м². Фильтры оставлены на фильтрацию при скорости фильтрации 3,5 м/ч в последовательном режиме. После двух суток фильтрации отобраны пробы сточной воды при входе и выходе на фильтры в специально оборудованных местах.

Фильтры работают в последовательном режиме. При проведении испытаний отмечена общая очистка по меди 75 %, цинку 95 %, марганцу 95%, железу общему 75 %. Максимальная очистка по цинку (90%) и марганцу (92%) наблюдается на фильтре № 2. Железо общее (75%) максимально очищается фильтром № 1 (табл. 13).

Произведена отмывка фильтра при интенсивности промывки 5,9 л/с/м². Фильтры оставлены на фильтрацию при скорости фильтрации 3,68 м/ч в последовательном режиме. Через

двое суток работы отобраны пробы сточной воды при входе и выходе на фильтры в специально оборудованных местах.

Таблица / Table 12

Эффективность очистки сточных вод, %
Efficiency of wastewater treatment. %

Определяемые показатели	Методики (методы) анализа	Эффективность фильтра № 1	Эффективность фильтра № 2	Эффективность фильтра № 3	Эффективность общая
ХПК	ПНД Ф 14.1:2:3.100-97	50	вз	22	58
Взвешенные вещества	ПНД Ф 14.1:2:3.110-97	0	0	0	0
Магний	РД 52.24.395-2017 (прил.Б)	3	3	вз	вз
Медь	ПНД Ф 14.1:2:4.214-06	45	60	8	85
Цинк	ПНД Ф 14.1:2:4.214-06	12	90	65	98
Марганец	ПНД Ф 14.1:2.61-96	85	0	0	85
Железо общее	ПНД Ф 14.1:2:3:4.50-2023	75	вз	35	85
Нитрат-ион	ПНД Ф 14.1:2:4:4-95	5	вз	2	вз
Нитрит-ион	ПНД Ф 14.1:2:3:4.3-2023	вз	вз	3,1	вз
Аммоний-ион	ПНД Ф 14.1:2:4.262-10	85	0	0	85
Сульфат-ион	ПНД Ф 14.1:2:3:4.240-2007	0	1	1	1

Таблица / Table 13

Эффективность очистки сточных вод, %
Efficiency of wastewater treatment. %

Определяемые показатели	Методики (методы) анализа	Эффективность фильтра № 1	Эффективность фильтра № 2	Эффективность фильтра № 3	Эффективность общая
ХПК	ПНД Ф 14.1:2:3.100-97	вз	55	вз	вз
Взвешенные вещества	ПНД Ф 14.1:2:3.110-97	29	0	0	27
Магний	МИ 17-02-01-2021 (1)	2	вз	7	5
Медь	ПНД Ф 14.1:2:4.139-98	50	40	20	76
Цинк	ПНД Ф 14.1:2:4.139-98	18	90	65	95
Марганец	ПНД Ф 14.1:2.61-96	45	92	0	95
Железо общее	ПНД Ф 14.1:2:3:4.50-2023	75	29	вз	75
Сульфат-ион	ПНД Ф 14.1:2:3:4.240-2007	1	0	0	0

Фильтры работают в последовательном режиме. В ходе испытаний отмечена значительная очистка по меди в фильтре № 1 – 43,2 % и фильтре № 2 – 35 %; максимальная очистка по цинку в фильтре № 2 – 90 % и фильтре № 3 – 80 %, максимальная очистка по марганцу в фильтре № 2 – 90 %, значительная очистка по железу общему в фильтре № 1 – 69,2 % и фильтре № 3 – 40 % (табл. 14).

Таблица / Table 14

Эффективность очистки сточных вод, %
Efficiency of wastewater treatment. %

Определяемые показатели	Методики (методы) анализа	Эффективность фильтра № 1	Эффективность фильтра № 2	Эффективность фильтра № 3	Эффективность общая
ХПК	ПНД Ф 14.1:2:3.100-97	0	вз	43	30
Взвешенные вещества	ПНД Ф 14.1:2:3.110-97	вз	25	0	0
Магний	МИ 17-02-01-2021 (1)	вз	вз	0	вз
Медь	ПНД Ф 14.1:2:4.214-06	43,2	35	12	65
Цинк	ПНД Ф 14.1:2:4.214-06	16,0	90	80	98
Марганец	ПНД Ф 14.1:2.61-96	45,0	90	0	95
Железо общее	ПНД Ф 14.1:2:3:4.50-2023	69,2	2	40	80
Нитрат-ион	ПНД Ф 14.1:2:4:4-95	4,8	12	вз	вз
Нитрит-ион	ПНД Ф 14.1:2:3:4.3-	вз	2	30	вз
Аммоний-ион	ПНД Ф 14.1:2:4.262-10	79,2	0	0	80
Сульфат-ион	ПНД Ф 14.1:2:3:4.240-2007	вз	1	0	0

Произведена промывка фильтров при интенсивности промывки 6 л/с/м². Наилучшая очистка наблюдается при скоростях фильтрации от 3,5 до 5,0 м/ч. Нарастание и наилучшие очистные свойства оксидной плёнки на сорбенте ОДМ-2Ф отмечается через 10 дней работы фильтра. Очистка по ионам железа наблюдается с первых дней, что характеризует хорошую окисляемость шахтных вод с использованием фильтра, заполненного сорбентом ОДМ-2Ф. Наблюдается переход аммиачной группы в нитриты, то есть проходит начальный процесс нитрификации.

Обсуждение результатов

Фильтр, заполненный сорбентом ОДМ-2Ф, предназначен для очистки воды от механических примесей и ряда растворенных элементов за счет образования на крупницах оксидной пленки. Лучшая очистка наблюдается при скоростях фильтрации от 3,5 до 5,0 м/ч. Нарастание и наилучшие очистные свойства оксидной плёнки на сорбенте отмечается через 10 дней работы фильтра. Очистка по ионам железа наблюдается с первых дней, что характеризует хорошую окисляемость шахтных вод с использованием фильтра, заполненного сорбентом ОДМ-2Ф. Наблюдается переход аммиачной группы в нитриты, то есть проходит начальный процесс нитрификации.

Анализируя процесс очистки, можно сделать вывод о том, что наилучшая очистка наблюдается за период до 48 часов фильтрации. Таким образом, фильтроцикл заполненного сорбентом ОДМ-2Ф на данном этапе проведения испытаний необходимо установить до 48 часов.

Фильтр, заполненный сорбентом Глауконит гранулированный (Гл.-Гр.-1), предназначен для очистки воды от ряда растворенных элементов за счет заполнения пор сорбирующих материалов, нарастания на загрузке оксидной пленке и ионного обмена загрузочного материала. Лучшая очистка наблюдается при скоростях фильтрации от 3,5 до 5,0 м/ч. Процесс нитрификации не происходит. Незначительное увеличение очистки нитритов и нитратов объясняется погрешностью измерений.

Анализируя процесс очистки, можно сделать вывод о том, что наилучшая очистка наблюдается за период до 48 часов фильтрации. Таким образом, фильтроцикл на данном этапе проведения испытаний необходимо установить до 48 часов. Процесс зарядки сорбента, анализируя результаты исследований, необходимо установить с интервалом 20 дней. Данный период может быть изменен в процессе пуско-наладочных работ.

Фильтр, заполненный сорбентом КФГМ-7 «2,0», предназначен для очистки воды от ряда растворенных элементов за счет заполнения пор сорбирующих материалов, нарастания на загрузке оксидной пленке и ионного обмена загрузочного материала. Лучшая очистка наблюдается при скоростях фильтрации от 3,5 до 5,0 м/ч. Процесс нитрификации не происходит. Незначительное увеличение очистки нитритов и нитратов объясняется погрешностью измерений.

Анализируя процесс очистки, можно сделать вывод о том, что наилучшая очистка наблюдается за период до 48 часов фильтрации, что заметно больше, чем фильтроцикл с использованием ионообменных смол (3–4 часа). Таким образом, фильтроцикл на данном этапе проведения испытаний необходимо установить до 48 часов. Процесс зарядки сорбента, анализируя результаты исследований, необходимо установить с интервалом 20 дней. Данный период может быть изменен в процессе пуско-наладочных работ.

Сооружения предназначены для очистки шахтных вод от ряда растворенных элементов за счет заполнения пор сорбирующих материалов, нарастания на загрузке оксидной пленки и ионного обмена загрузочного материала.

Эффективность очистки шахтных вод по взвешенным веществам не находит типичного отражения в связи с тем, что поступающие воды содержат минимальное их количество, не превышающее ПДК для водоемов рыбохозяйственного назначения (далее ПДК р.х.з.).

Очистка от марганца и цинка достигает максимальных значений, то есть в большинстве случаев содержание данных ингредиентов в воде ниже порога определения.

Очистка воды по магнию достигает 87 % непосредственно после зарядки сорбентов, однако целесообразность очистки по магнию и зарядкой сорбента должна определяться экономической целесообразностью, так как превышения ПДК р.х.з. по магнию в исходной воде непостоянны.

Очистка вод по ионам железа происходит в необходимом диапазоне (около 70 %). Концентрации загрязняющих веществ в очищенной воде не превышает ПДК р.х.з.

Очистка вод по меди осуществляется в требуемом диапазоне. Концентрации загрязняющих веществ в очищенной воде не превышает ПДК р.х.з.

Очистка вод по ионам сульфатов наблюдается в минимальном диапазоне (около 1 %), которая объясняется погрешностью измерения. Это объясняется тем, что данные сооружения с использованием сорбентов и реагентов не способны очищать от сульфатов. Исследования показали, что для очистки вод от сульфатов необходимо использовать ранее использованные методы очистки с ионообменными смолами.

Очистка воды по аммоний-иону означает, что на сооружениях при летних температурах воды наблюдается начало процесса нитрификации. Нитрификация — микробиологический процесс окисления аммиака. Этот процесс объясняет увеличение нитратов и нитритов. Концентрации аммоний-иона в очищенной воде не превышают ПДК р.х.з.

Заключение

1. Исследовательские и опытно-промышленные испытания при использовании природных сорбентов показали, что очистка до нормативов ПДК для водоемов рыбохозяйственного назначения возможна по ряду загрязняющих веществ, таких как взвешенные вещества и тяжелые металлы.

2. Использование природных сорбентов целесообразно для очистки сточных вод в совокупности с другими методами очистки, позволяющими довести качество сбрасываемой воды до необходимых нормативов по другим ингредиентам, не вызывая вторичного загрязнения, как при физико-химической очистке.

3. Использование природных сорбентов для очистки воды увеличивает фильтроцикл и сокращает количество регенераций загрузки, что сказывается на стоимости очистки воды.

ВКЛАД АВТОРОВ | CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to this article.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ | CONFLICT OF INTEREST

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Yakkerimath S., Kulkarni R.M., Divekar S.V., Chate V.R., Bekal K.P. Kinetic, adsorption, and thermodynamic study of removal of Cr⁶⁺ by iron-rich natural clay minerals // *Desalination and Water Treatment*. 2024. Vol. 318. Art. 100302. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100302>
2. Курдюмов В.Р., Тимофеев К.Л., Краюхин С.А. Особенности очистки шахтной воды по технологии обратного осмоса // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2018. № 11. С. 48–56.
3. Ganebnykh E.V. Maltsev G.I., Sviridov A.V. Purification of industrial wastewater with mineral sorbents. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2016. 136 p.
4. Кутергин А.С., Недобух Т.А., Никифоров А.Ф., Иманова В.В. Применение гранулированного глауконита и модифицированного на его основе сорбента в процессах очистки водных систем от радионуклидов цезия // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2017. № 4. С. 86–98.
5. Качалова Г. С. Коагуляционно-сорбционная очистка сточных вод // *Вода и экология: проблемы и решения*. 2019. № 2. С. 32–39.
6. Тимофеев К.Л. Сорбция тяжелых металлов из стоков горно-металлургических предприятий: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2013. 23 с.
7. Григорьева Е.А. Сорбционные свойства глауконита Каринского месторождения: автореф. дис. ... канд. хим. наук. Челябинск, 2004. 20 с.
8. Гриднева М.А., Агафонова Ю.Д., Гайнулова Д.В., Дремина Э.В. Исследование фильтрующей загрузки в ходе эксплуатации // *Вода Magazine*. 2018. № 6(130). <https://watermagazine.ru/nauchnye-stati2/novye-stati/27651-issledovanie-filtruyushchej-zagruzki-v-khode-ekspluatatsii.html> (дата обращения: 25.01.2024).
9. Ахмед Самех А. А., Гогина Е. С., Макиша Н. А. Адсорбция фенола на активированном угле, полученном из ветвей финиковой пальмы // *Вестник МГСУ*. 2024. № 3(19). С. 426–435.
10. Николаева Л.А., Айкенова Н.Е., Демин А.В. Очистка сточных вод промышленных предприятий от фенолов модифицированным отходом энергетики // *Вестник РУДН. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности*. 2021. № 2(29). С. 174–181.

REFERENCES

1. Yakkerimath S., Kulkarni R.M., Divekar S.V., Chate V.R., Bekal K.P. Kinetic, adsorption, and thermodynamic study of removal of Cr⁶⁺ by iron-rich natural clay minerals. *Desalination and Water Treatment*, 2024, vol. 318, art. 100302. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100302>
2. Kurdyumov V.R., Timofeev K.L., Krayukhin S.A. Features of mine water purification using reverse osmosis technology. *Water supply and sanitary technology*, 2018, no. 11, pp. 48–56. (In Russ.).
3. Ganebnykh E.V. Maltsev G.I., Sviridov A.V. Purification of industrial wastewater with mineral sorbents. Saarbrücken, Lambert Academic Publishing, 2016. 136 p.
4. Kutergin A.S., Nedobukh T.A., Nikiforov A.F., Imanova V.V. Application of granulated glauconite and a sorbent modified on its basis in the processes of purification of water systems from cesium radionuclides. *Water Management Russia*, 2017, no. 4, pp. 86–98. (In Russ.).
5. Kachalova G.S. Coagulation-sorption wastewater treatment. *Water and ecology: problems and solutions*, 2019, no. 2, pp. 32–39. (In Russ.).
6. Timofeev K.L. Sorption of heavy metals from the effluents of mining and metallurgical enterprises: Abstract of Ph.D. (Engineering) thesis. Ekaterinburg, 2013. 23 p. (In Russ.).
7. Grigorieva E.A. Sorption properties of glauconite from the Karinsky deposit. Abstract of Ph.D. (Chemical) thesis. Chelyabinsk, 2004. 20 p. (In Russ.).
8. Gridneva M.A., Agafonova Yu.D., Gainulova D.V., Dremina E.V. Investigation of filter loading during operation. *Water Magazine*, 2018, no. 6(130). (In Russ.). <https://watermagazine.ru/nauchnye-stati2/novye-stati/27651-issledovanie-filtruyushchej-zagruzki-v-khode-ekspluatatsii.html>

stati2/novye-stati/27651-issledovanie-filtruyushchej-zagruzki-v-khode-ekspluatatsii.html (accessed: January 25, 2024).

9. Ahmed Sameh A.A., Gogina E.S. Makisha N.A. Adsorption of phenol on activated carbon obtained from date palm branches. *Bulletin of MGSU*, 2024, no. 3(19), pp. 426–435. (In Russ.).
10. Nikolaeva L.A., Aikenova N.E., Demin A.V. Purification of wastewater of industrial enterprises from phenols by modified energy waste. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*, 2021, no. 29(2), pp. 174–181. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Смирнов Алексей Владимирович – директор ООО «Специализированное научно-производственное предприятие «Южуралводоканалналадка», Челябинск, Российская Федерация, ecologia@mail.ru

Aleksei V. Smirnov, Director of the Specialized Scientific and Production Company «South Ural Water Treatment» LLC, Chelyabinsk, Russian Federation, ecologia@mail.ru

Смирнов Владимир Николаевич – ведущий научный сотрудник ООО «Специализированное научно-производственное предприятие «Южуралводоканалналадка», Челябинск, Российская Федерация, ecologia@mail.ru

Vladimir N. Smirnov, Leading Researcher of the Specialized Scientific and Production Company «South Ural Water Treatment» LLC, Chelyabinsk, Russian Federation, ecologia@mail.ru

Смирнов Константин Владимирович – кандидат сельскохозяйственных наук, заместитель директора по науке ООО «Специализированное научно-производственное предприятие «Южуралводоканалналадка», Челябинск, Российская Федерация, ecologia@mail.ru

Konstantin V. Smirnov, Candidate of Agricultural Sciences, Deputy Director for Science of the Specialized Scientific and Production Company «South Ural Water Treatment» LLC, Chelyabinsk, Russian Federation, ecologia@mail.ru

Статья поступила в редакцию / Received: 26.04.2024.

Доработана после рецензирования / Revised: 25.05.2024.

Принята к публикации / Accepted: 10.06.2024.