

ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ, КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА, ГАЗОСНАБЖЕНИЕ И ОСВЕЩЕНИЕ

УДК 628.16

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-2-162-173

*Л.И. МАКСИМОВ, В.В. МИРОНОВ,
Тюменский индустриальный университет*

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ЖЕЛЕЗА ИЗ ОСАДКА СТАНЦИИ ОБЕЗЖЕЛЕЗИВАНИЯ

Осадок станций обезжелезивания подземных вод является источником загрязнения окружающей среды. Необходим поиск эффективных и экологически чистых методов утилизации осадка станций обезжелезивания. Были исследованы свойства железосодержащего осадка с целью разработки технологии его обработки для дальнейшей утилизации. По результатам исследований химического и фракционного состава был сделан вывод о том, что для осадка станции обезжелезивания Велижанского водозабора характерен стабильный химический состав с массовой долей Fe_2O_3 около 70 % и стабильный гранулометрический состав (≈ 87 % частиц имеют размеры менее 20 мкм). Указанные характеристики осадка позволили разработать технологическую схему восстановления железа в среде разогретого монооксида углерода. Вовлечение осадка станций обезжелезивания подземных вод в производство исключает депонирование осадка на полигонах или в накопителях и создает новую сырьевую базу для аддитивных технологий.

Ключевые слова: обезжелезивание; осадок станций водоподготовки; порошки железа; утилизация; восстановление железа.

Для цитирования: Максимов Л.И., Миронов В.В. Совершенствование технологии получения высокодисперсных порошков металлического железа из осадка станции обезжелезивания // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 2. С. 162–173.
DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-2-162-173

*L.I. MAKSIMOV, V.V. MIRONOV,
Tyumen State Oil and Gas University*

TECHNOLOGY IMPROVEMENT OF HIGH-DISPERSIVE METALLIC IRON POWDERS BASED ON SEDIMENTS OF IRON REMOVAL STATION

Sediments from iron removal stations are a source of environmental pollution. It is necessary to find effective and eco-friendly methods of sediment disposal. The paper investigates the

properties of iron-containing sediment in order to develop a technology for its further utilization. It is shown that sediments from the iron removal station of Velizhansky water intake have a stable chemical composition with about 70 % Fe_2O_3 , and a stable particle size distribution, i.e. 20 μm for ≈ 87 % of particles. These parameters allow developing a flow chart for iron reduction in heated carbon monoxide. The involvement of sediments from iron removal stations in the high-dispersive metallic iron powder production eliminates the sediment deposit at landfills or storage tanks and creates a new raw material base for additive technologies.

Keywords: iron removal; sediments; iron removal stations; iron powders; utilization; iron reduction.

For citation: Maksimov L.I., Mironov V.V. Sovershenstvovanie tekhnologii polucheniya vysokodispersnykh poroshkov me-tallichesкого zheleza iz osadka stantsii obez-zhelezivaniya [Technology improvement of high-dispersive metallic iron powders based on sediments of iron removal station]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2020. V. 22. No. 2. Pp. 162–173.

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-2-162-173

Введение

Для более чем в 60 % населенных пунктов Западно-Сибирской равнины централизованное водоснабжение осуществляется из подземных источников. Для подземных вод Западно-Сибирского артезианского бассейна характерны повышенные концентрации железа, высокая цветность и перманганатная окисляемость, что связано с региональными особенностями, такими как избыточная увлажненность, слабая дренированность, интенсивная заболоченность территории, присутствие органики и железистых минералов [1].

Формами существования железа в подземных водах территории являются ионы двухвалентного железа, коллоидные органические и неорганические соединения, истинные растворы органических соединений двух- и трехвалентного железа [2].

Все технологические схемы обезжелезивания подземных вод после окисления железа (аэрацией или с использованием реагентов) включают этап фильтрования на завершающей стадии подготовки воды [3]. На промывку фильтров обезжелезивания тратится до 28 % общего расхода воды станции. Промывные воды загрязнены в основном соединениями железа с концентрациями до 170–210 мг/дм³ [4].

Для сокращения расхода воды на собственные нужды станции, исключения сброса промывных вод в окружающую среду на строящихся и реконструируемых станциях предусматривается оборот промывных вод. Самые простые технологические схемы систем оборота промывных вод фильтров обезжелезивания включают в себя безреагентное отстаивание, после которого отстоянная вода возвращается в начало сооружений, смешиваясь с исходной водой, или после дополнительного этапа очистки используется для промывки фильтров. Для интенсификации процесса очистки промывных вод станций обезжелезивания используют реагентное отстаивание, электрофлотацию, фильтрование через модифицированную сорбционную загрузку [4, 5].

Депонирование обезвоженного осадка на полигонах представляет серьезную экологическую проблему из-за опасности загрязнения атмосферы и почв

железосодержащей пылью [6]. Необходим поиск эффективных и экологически чистых методов утилизации осадка станций обезжелезивания, в частности, в качестве сырья для производства продукции [7, 8].

Такие свойства железосодержащих шламов, как интенсивная окраска, однородный химический состав с преобладанием гетита, высокодисперсное состояние, позволили рассматривать данный вид техногенных отходов в качестве сырья для производства пигментов. Варьируя температуру обработки от 600 до 1050 °С, можно получить пигменты разного цвета: желтого, кирпично-красного, коричневого, черного. Сравнение полученного кирпично-красного пигмента с железным суриком марки Г по физико-химическим свойствам показало их практически полное сходство [9].

Авторы указанной технологии предлагают использовать пигменты из железосодержащих шламов в строительной отрасли, например при производстве цветных бетонов [Там же]. Кроме улучшения внешнего вида добавление пигментов увеличивает прочность изделий за счет создания центров кристаллизации. Исследования, проведенные в Томском государственном архитектурно-строительном университете, показали, что массовая доля пигмента до 5 % в цементно-песчаной смеси не вызывает уменьшения прочности и морозостойкости образцов ниже нормативных требований [10].

Введение в состав сырья для мелкоштучных строительных изделий небольшого количества (до 8 %) осадка станций обезжелезивания приводит к увеличению прочности изделий, являющейся важной характеристикой строительных материалов.

Применение железооксидного пигмента из осадка станций обезжелезивания в качестве добавки к составу для производства кирпичей на жидкостекольном вяжущем вызвало повышение прочности изделий [11].

Авторами статьи был разработан состав керамической массы на основе глины с добавлением осадка станций обезжелезивания. Исследования показали, что добавка указанного осадка в количестве 0,5–5,5 масс.% вызывает увеличение прочности изделий до 22,5 МПа [12].

Исследование влияния оксида железа при добавлении осадка станций водоподготовки на качество керамзита показало, что при содержании Fe_2O_3 6–8 % керамзит имеет повышенную прочность [8].

Осадок станций обезжелезивания по составу близок к «красному шламу» глиноземных заводов черной металлургии, который используется для производства железосодержащих коагулянтов. Основываясь на этом, исследователи из Казанского государственного архитектурно-строительного университета разработали технологию получения коагулянта из железосодержащего осадка путем растворения его в 20%-й серной кислоте. Полученный коагулянт оказался особенно эффективным при обработке производственных сточных вод с высокой мутностью [13].

Производство сорбентов из осадка станций обезжелезивания одновременно решает две задачи: утилизация техногенного отхода и получение дешевых сорбентов для очистки сточных вод. Гранулированный композиционный сорбционный материал был получен из железосодержащего шлама, жидкого стекла и извести. Обработка сформованных гранул в печи при температуре

200 °С или в СВЧ-печи позволяет получить прочные водостойкие образцы, характеризующиеся достаточно высокой степенью извлечения ионов тяжелых металлов [14].

В настоящее время ведется поиск источников сырья, включая нетрадиционные ресурсы, для аддитивных технологий. Порошки железа производят двумя основными методами: распыление расплава металла с помощью водяных струй под большим давлением и производство губчатого железа и железного порошка с восстановлением высококачественной железной руды [15]. Оба метода являются технологически сложными и экономически затратными. По данным электронно-микроскопических исследований, размеры большинства частиц не превышают 0,035 мкм, а размеры агломератов – 1,7 мкм [14]. Следовательно, осадки станций обезжелезивания можно рассматривать в качестве сырьевой базы для аддитивных технологий, требующих размеров частиц менее границы в 40–60 мкм.

Целью исследования осадка станции обезжелезивания Велижанского водозабора (г. Тюмень) является выявление его свойств как сырья для производства продукции, обладающей потребительской ценностью, и разработка технологии его обработки для дальнейшей утилизации.

Материалы и методы исследования

После предварительного отстаивания промывной воды фильтров обезжелезивания и дальнейшего снижения влажности осадок станции обезжелезивания представляет собой густую водонасыщенную массу, окрашенную в коричневый цвет за счет присутствия оксида железа. После высушивания осадок приобретает светло-коричневый цвет и без особых усилий может быть переведен в мелкодисперсное состояние (рис. 1). Для высушенного осадка истинная плотность составляет 2 150 кг/м³, насыпная плотность – 370 кг/м³.



Рис. 1. Фото высушенного осадка промывных вод станции обезжелезивания

При силикатном анализе образцов железосодержащего шлама применялся атомно-эмиссионный метод НСАМ 487-ХС. Исследования проводились на спектрометре эмиссионном Optima 2100 DV.

При поиске способов применения осадка станций обезжелезивания в качестве сырьевого источника производств важно оценить гранулометрический состав осадка. Например, частицы гематита в составе пигментов марки Micronox, используемых в строительной индустрии, имеют размеры от 3 до 50 мкм.

Гранулометрический состав осадка Велижанской станции был проведен на лазерном дифракционном анализаторе размера частиц FRITSCH ANALYSETTE 22 NanoTec. Прибор оснащен модулем Wet Dispersion Unit, позволяющим провести диспергирование нерастворимых материалов в жидкой среде. Для этого сухой осадок Велижанской станции обезжелезивания был помещен в бидистиллированную воду на 24 ч. Затем осадок был размешан в течение 30 мин на магнитной мешалке со скоростью 60 об/мин. После чего был проведен моментальной отбор пробы до осаждения осадка на дно пробирки. Отобранная проба отстаивалась в течение 48 ч перед проведением испытаний.

Возможные способы утилизации осадка станций обезжелезивания связаны с нагреванием сырья, поэтому важно исследовать физико-химические изменения осадка при изменении температуры.

Термогравиметрический (ТГ) и дифференциальный сканирующий калориметрический (ДСК) анализ осадка станций обезжелезивания проводился на термоанализаторе STA 499 F5 Jupiter NETZSCH (Германия) в потоке аргона. Исследование образцов проводили в алундовых тиглях. Скорость нагревания 3 °С/мин. Для определения энтальпии процессов прибор откалиброван по следующим реперным веществам: In, Sn, Bi, Zn, Al, Ag, Au, Ni. Площадь пиков тепловых эффектов определена в программе Proteus 6 2012, температуры проявления пиков и их площадь в параллельных опытах воспроизводятся с погрешностью, которая не превышает 3 %.

В процессе эксперимента одновременно регистрировались изменения массы образца (ТГ) и фазовые превращения, сопровождающиеся выделением или поглощением теплоты (ДСК). Термогравиметрический анализ позволяет определить изменение массы вещества в процессе изменения температуры. Дифференциальный сканирующий калориметрический анализ дополняет термогравиметрию.

Результаты исследований

Полученные результаты силикатного анализа представлены в табл. 1. Для сравнения в таблицу включены данные химического состава осадка Томского водозабора [16].

В осадке обеих станций преобладает оксид железа. Причем в осадке Велижанской станции среднее значение содержания Fe_2O_3 выше, что может определяться разным генезисом подземных вод. Массовое содержание остальных компонентов относительно невысоко. Потери при прокаливании составили не более 15 % от общей массы.

Гранулометрический состав осадка Велижанской станции представлен в табл. 2 и на рис. 2. Из данных табл. 2 видно, что при смачивании исследуемого

сухого осадка количество частиц размером до 5,281 мкм увеличилось почти на 20 % за счет растворения связей между частицами осадка. Подключение устройства ультразвукового дробления мощностью 100 Вт позволило разделить агломераты с более крепкими связями, что дало возможность увеличить долю частиц с размером 5,281 мкм еще на 10 %. 88,3 % частиц имеют размеры менее 21,345 мкм, следовательно, железосодержащий осадок применим в качестве сырья для производства железистоокисных пигментов и для аддитивных технологий.

Таблица 1

Химический состав осадка станций обезжелезивания

Компоненты осадка	Содержание, %	
	Велижанский водозабор	Томский водозабор
SiO ₂	1,5–6,5	5,48
Al ₂ O ₃	0,2–0,7	1,02
TiO ₂	0,0–0,42	Не опр.
MnO	0,04–0,35	Не опр.
Na ₂ O	0,0–1,4	Не опр.
Fe ₂ O ₃	58,0–82,0	42,45
CaO	9,8–17,4	4,20
MgO	0,3–1,5	2,00
P ₂ O ₅	0,95–4,55	Не опр.
K ₂ O	0,02–0,24	Не опр.
п.п.п.	8,0–14,6	30,34

Таблица 2

Фракционный состав частиц осадка промывных вод станции обезжелезивания Велижанского водозабора

Размер частиц, мкм	QЗ(х), % при состоянии осадка перед проведением исследования			
	Без предварительного смачивания		Смоченный в жидкой среде	
	без ультразвукового дробления	с обработкой ультразвуком	без ультразвукового дробления	с обработкой ультразвуком
0,532	3,7	5,2	6,0	7,9
1,070	7,2	10,6	13,1	17,9
2,152	14,8	21,1	27,9	37,1
5,281	29,2	37,4	50,5	60,3
10,618	44,1	52,2	67,6	73,0
21,345	54,7	69,5	84,8	88,3
52,386	68,4	91,9	98,2	99,8

Примечание. QЗ(х) – доля от общего количества частиц, лежащих в пределах до указанного размера в мкм.

Показатель преломления ---				Коэффициент поглощения ---			
Сканов зел.	100	Сканов ИК	100	Каналов	102	Затемнение луча	17,0 %
Диапазон	0,01	-	2100 мкм	Насос	50 %	Ультразвук	100 %

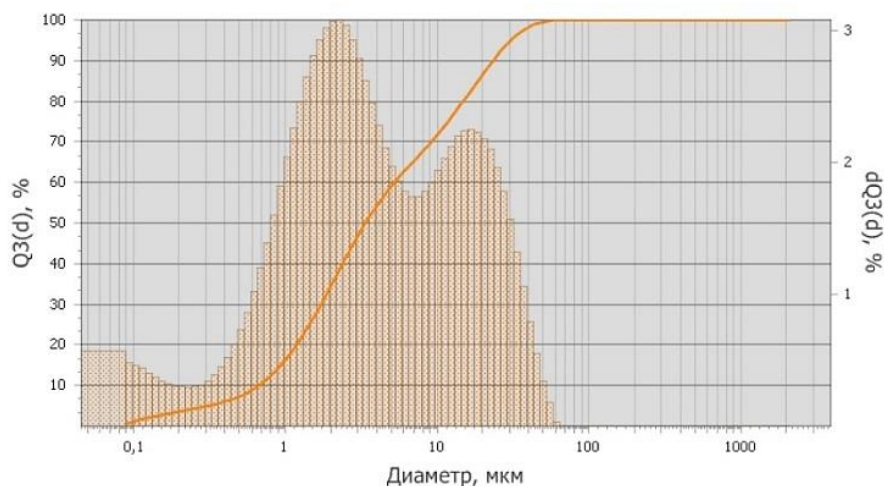


Рис. 2. Результаты гранулометрического анализа осадка промывных вод станции обезжелезивания Велижанского водозабора на приборе FRITSCH ANALYSETTE 22 NanoTec

Термограмма осадка станции обезжелезивания представлена на рис. 3. Первый эндозффект наблюдается в интервале температур 50–200 °С с максимумом при 120 °С, что связано с удалением влаги, адсорбированной осадком. Экзоэффект в интервале 200–350 °С с максимумом при 250 °С соответствует выгоранию органической составляющей осадка. В этом же температурном интервале происходит кристаллизация аморфной фазы, в результате которой лимонит ($\text{FeOOH} \cdot (\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O})$), гетит ($\alpha\text{-FeOOH}$), сидерит (FeCO_3) и лепидокрокит ($\gamma\text{-FeOOH}$) переходят, соответственно, в соединения гематита ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) и маггемита ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$).

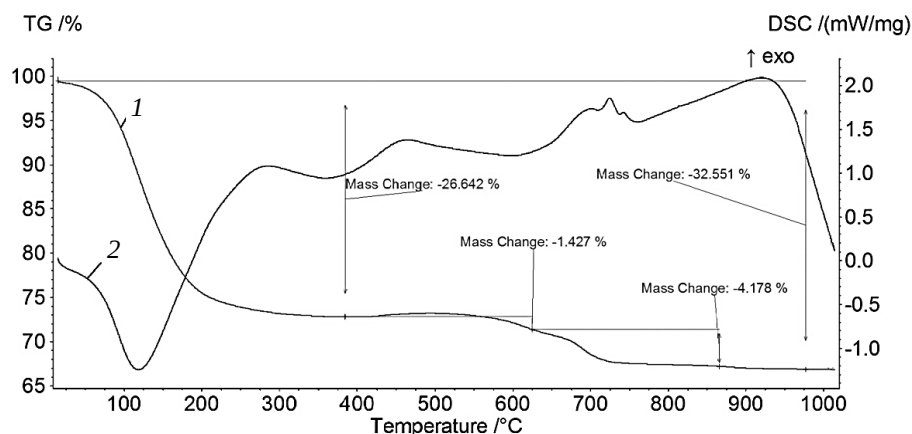


Рис. 3. Термограмма осадка станции обезжелезивания:
1 – термогравиметрия (TG); 2 – дифференциальная сканирующая калориметрия (DSC)

Согласно экспериментальным данным по химическому и фракционному составу, осадок станции обезжелезивания обладает следующими свойствами:

- стабильный химический состав (массовая доля Fe_2O_3 составляет около 70 %);
- стабильный гранулометрический состав ($\approx 87\%$ частиц от общего объёма имеют размеры менее 20 мкм);
- низкая себестоимость. В настоящее время осадок является техногенным отходом.

Указанные свойства позволяют рассматривать осадок станции обезжелезивания в качестве сырьевой базы для производства порошковых материалов для аддитивных технологий.

Основные этапы технологического процесса включают: извлечение железосодержащего осадка из промывных вод станций обезжелезивания, обезвоживание, нагрев до температуры 450–900 °С и восстановление железа в среде разогретого монооксида углерода (CO) (рис. 4).

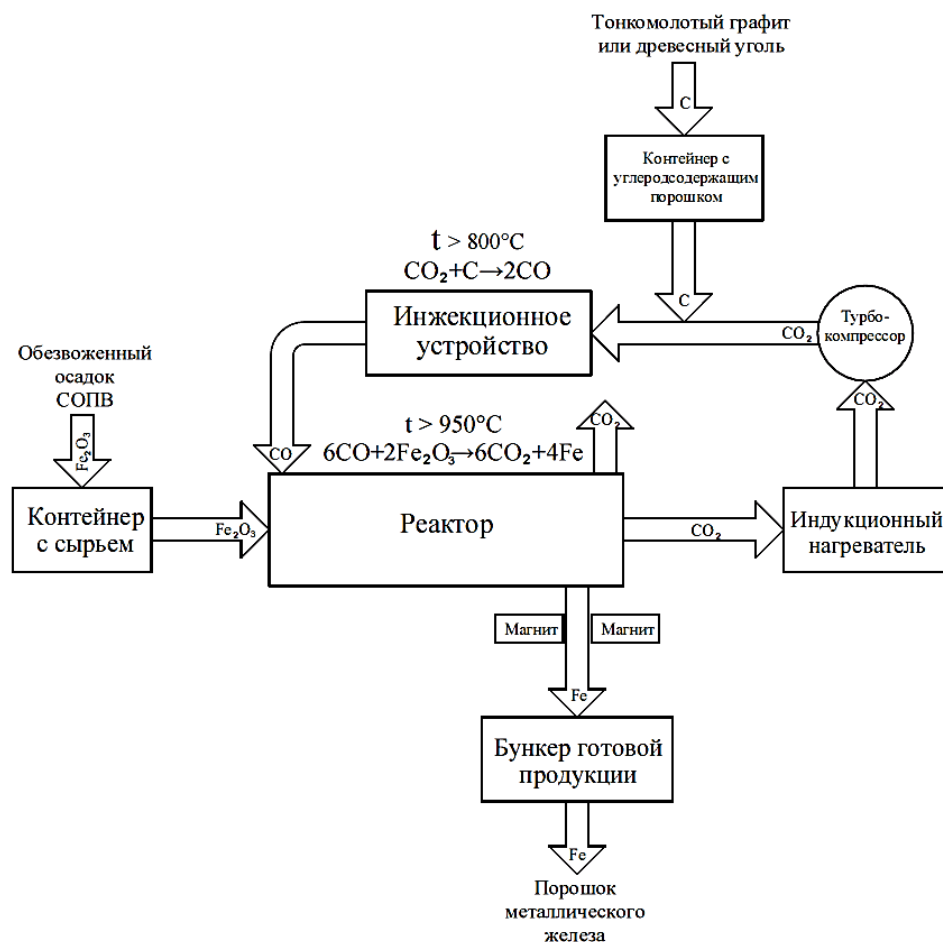


Рис. 4. Технологическая схема получения порошка металлического железа из осадка станции обезжелезивания

При разработке технологического процесса важно обеспечить максимально полное протекание реакции, а также энергоэффективность за счёт рекуперации тепловой энергии. Исходя из предложенной концепции углекислый газ (CO_2) будет нагреваться в нейтральной среде индукционным элементом до температуры 800–1000 °С. Это условие необходимо для наиболее полного протекания дальнейших химических реакций. После этого углекислый газ насыщается углеродсодержащим порошком (тонкомолотый графит или древесный уголь), и в инжекционном устройстве идет процесс получения угарного газа для дальнейшего технологического процесса по уравнению



Далее разогретый угарный газ подаётся в камеру реактора, работающую по принципу воздушного циклона. Данный физический эффект используется для полного и равномерного перемешивания порошкообразного шлама в газовой среде.

Из контейнера с сырьем обезвоженный осадок станции обезжелезивания подземных вод (СОПВ) поступает в реактор, в котором происходит восстановление железа по уравнению



Отбор восстановленного железа происходит на выходе из реактора. Часть оксида железа из осадка СОПВ может не вступить в реакцию с монооксидом углерода. Кроме оксида железа в осадке присутствует 18–42 % других компонентов (см. табл. 1). Необходимо исключить попадание в бункер готовой продукции побочных продуктов.

Сотрудниками Донского государственного технического университета установлено, что использование электромагнитных полей позволяет отделить порошки магнитных материалов от немагнитной фракции и получить продукты высокой чистоты [17]. Метод основан на принципе, что оксид железа не является ферромагнетиком, а значит, не будет вовлекаться магнитом в бункер готовой продукции. Отбор восстановленного порошка металлического железа осуществляется в отдельный бункер посредством цикличной работы электромагнита. Данный способ позволяет обеспечить достаточную чистоту конечного продукта.

Образовавшийся в процессе реакции (2) углекислый газ поступает в индукционный нагреватель. Непрерывное движение газовой смеси внутри установки осуществляется за счет работы турбокомпрессора.

Заключение

В результате проведенных исследований определен химический и фракционный состав осадка станции обезжелезивания Велижанского водозабора (г. Тюмень). Стабильный химический состав осадка, характеризующегося высоким содержанием Fe_2O_3 , однородным гранулометрическим составом с преобладанием частиц размером менее 20 мкм, низкой себестоимостью сырья, позволяет рассматривать осадок станции обезжелезивания в качестве альтернативного сырьевого источника для производства металлопорошков для аддитивных технологий. Разработанная технологическая схема получения порошка металлического

железа из осадка станции обезжелезивания учитывает все значимые физические и химические параметры техногенного сырья и может быть масштабирована для реального внедрения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Доклад об экологической ситуации в Тюменской области в 2018 году. URL: https://admtumen.ru/ogv_ru/about/ecology/eco_monitoring/more.htm?id=11653171@cmsArticle (дата обращения: 06.02.2020).
2. Лукашевич О.Д., Патрушев Е.И., Филичев С.А. Кондиционирование состава маломинерализованных железосодержащих подземных вод // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 2. С. 158–170.
3. Munter R., Ojaste H., Sutt J. Complexed iron removal from groundwater. Journal of Environmental Engineering. 2005. V. 131. № 7. P. 1014–1020.
4. Москвичева Е.В., Сахарова А.А., Москвичева А.В., Геращенко А.А., Катеринин К.В., Шишенин Д.С., Иванников Е.О. Повышение экологической безопасности станции обезжелезивания // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2017. Вып. 47 (66). С. 270–281.
5. Аверина Ю.М., Павлов Д.В., Вараксин С.О. Обезжелезивание воды с замкнутым циклом водопользования // Вода: химия и экология. 2011. № 2. С. 18–22. URL: <http://watchemec.ru/article/23446/>
6. Popov V.K., Pasechnik E.Yu., Karmanova A. Recycling of iron-containing deposits – the main way to increase the efficiency of waterprotective measures on the territory of the Tom lower course // MATEC Web of Conferences. 2016. V. 85. 01013. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20168501013>.
7. Meng L., Chan Y., Wang H., Dai Y., Wang X., Zou J. Recycling of iron and silicon from drinking water treatment sludge for synthesis of magnetic iron oxide@SiO₂ composites // Environmental Science and Pollution Research. 2016. V. 23. P. 5122–5133. URL: <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5742-6>.
8. Zou J.L., Xu G.R., Li G.B. Ceramsite obtained from water and wastewater sludge and its characteristics affected by Fe₂O₃, CaO and MgO // J Hazard Mater. 2009. V.165. P. 995–1001. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.10.113>.
9. Усова Н.Т., Лукашевич О.Д. Получение пигментов из железосодержащих шламов водоподготовки для использования в строительной отрасли // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. № 4 (45). С. 198–207.
10. Лукашевич О.Д. Получение цветного бетона с использованием пигментов из железосодержащих шламов водоподготовки // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 5. С. 127–137.
11. Усова Н.Т., Лотов В.А., Лукашевич О.Д. Водостойкие безавтоклавные силикатные строительные материалы на основе песка, жидкостекольных композиций и шламов водочистки // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2013. № 2. С. 276–284.
12. Пат. 2610603, Российская Федерация. Керамическая масса на основе глины с добавлением осадка станций обезжелезивания / Л.И. Максимов, С.В. Максимова, А.В. Пешева, М.В. Кудоманов, С.С. Радаев, Бюл. № 5 от 14.02.2017.
13. Сундукова Е.Н., Шешегова И.Г. Проблемы ресурсосбережения в процессах обезжелезивания подземных вод // Фундаментальные исследования. 2016. № 12. С. 542–546.
14. Лукашевич О.Д., Усова Н.Т. Сорбент из железистого шлама для очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 20. № 1. С. 148–159. URL: <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2018-20-1-148-159>.
15. Залазинский Г.Г., Щенникова Т.Л., Кишкопаров Н.В., Жидовинова С.В., Золотухина Л.В., Гельчинский Б.Р. О получении металлических порошков методами диспергирования расплава и газофазного синтеза // Физическая химия и технология в металлургии : сб., посв. 60-летию ИМЕТ УрО РАН. Институт металлургии Уральского отделения Российской академии наук. Екатеринбург, 2015. С. 374–383.

16. Усова Н.Т., Кутугин В.А., Лотов В.А., Лукашевич О.Д. Композиционные материалы на основе высокожелезистого шлама водоподготовки // Известия Томского политехнического университета. 2011. Т. 319. № 3. С. 36–39.
17. Vernigoren Yu., Lebedev V., Chunakhova L. Selection of non-magnetic fraction from the slime wastes of metal production in the electromagnetic field // MATEC Web of Conferences. 2019. V. 297. 04002. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929704002>.

REFERENCES

1. Doklad ob ekologicheskoi situatsii v Tyumenskoi oblasti v 2018 godu [Report on the environmental situation in the Tyumen region in 2018]. Available: https://admtyumen.ru/ogv_ru/about/ecology/eco_monitoring/more.htm?id=11653171@cmsArticle (accessed February 2, 2020). (rus)
2. Lukashevich O.D., Patrushev E.I., Filichev S.A. Konditsionirovanie sostava malomineralizovannykh zhelezosoderzhashchikh podzemnykh vod [Conditioning of low-mineralized iron-containing underground water]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Journal of Construction and Architecture*. 2017. No. 2. Pp. 158–170. (rus)
3. Munter R., Ojaste H., Sutt J. Complexed iron removal from groundwater. *Journal of Environmental Engineering*. 2005. V. 131. No. 7. Pp. 1014–1020.
4. Moskvicheva E.V., Sakharova A.A., Moskvicheva A.V., et al. Povyshenie ekologicheskoi bezopasnosti stantsii obezazhelezivaniya [Improving the environmental safety of the deferrization station]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2017. V. 47 (66). Pp. 270–281. (rus)
5. Averina Yu.M., Pavlov D.V., Varaksin S.O. Obezazhelezivanie vody s zamknutym tsiklom vodopol'zovaniya [Iron removal in closed cycle water management]. *Water: Chemistry and Ecology*. 2011. No. 2. Pp. 18–22. <http://watchemec.ru/en/article/23446/> (rus)
6. Popov V.K., Pasechnik E.Yu., Karmanova A. Recycling of iron-containing deposits – the main way to increase the efficiency of waterprotective measures on the territory of the Tom lower course. *MATEC Web of Conferences*. 2016. V. 85. 01013. <https://doi.org/10.1051/mateconf/2016/8501013>
7. Meng L., Chan Y., Wang H., Dai Y., Wang X., Zou J. Recycling of iron and silicon from drinking water treatment sludge for synthesis of magnetic iron oxide@SiO₂ composites. *Environmental Science and Pollution Research*. 2016. V. 23. Pp. 5122–5133. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5742-6>
8. Zou J.L., Xu G.R., Li G.B. Ceramsite obtained from water and wastewater sludge and its characteristics affected by Fe₂O₃, CaO and MgO. *Journal of Hazardous Materials*. 2009. V. 165. Pp. 995–1001. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.10.113>
9. Usova N.T., Lukashevich O.D. Poluchenie pigmentov iz zhelezosoderzhashchikh shlamov vodopodgotovki dlya ispol'zovaniya v stroitel'noi otrasli [Pigments produced from iron-containing sludge and their use in construction industry]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2014. No. 4 (45). Pp. 198–207. (rus)
10. Lukashevich O.D. Poluchenie tsvetnogo betona s ispol'zovaniem pigmentov iz zhelezosoderzhashchikh shlamov vodopodgotovki [Concrete pigmented with iron-oxide pigments obtained from sewage sludge]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2015. No. 5. Pp. 127–137. (rus)
11. Usova N.T., Lotov V.A., Lukashevich O.D. Vodostoikie bezavtoklavnye silikatnye stroitel'nye materialy na osnove peska, zhidkostekol'nykh kompozitsii i shlamov vodoochistki [Waterproof autoclaveless silicate building materials based on sand, soluble glass compositions and water-purification mud]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2013. No. 2. Pp. 276–284. (rus)
12. Maksimov L.I., Maksimova S.V., Pesheva A.V., Kudomanov M.V., Radaev S.S. Keramicheskaya massa na osnove gliny s dobavleniem osadka stantsii obezazhelezivaniya [Ceramic mixture based on clay with addition of sediments from iron removal stations]. Patent Rus. Fed. N 2610603. 2017. 5 p. (rus)
13. Sundukova E.N., Sheshegova I.G. Problemy resursoberezheniya v protsessakh obezazhelezivaniya podzemnykh vod [Resource issues in the process of underground water iron removal]. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2016. No. 12. Pp. 542–546. (rus)

14. Lukashevich O.D., Usova N.T. Sorbent iz zhelezistogo shlama dlya ochistki stochnykh vod ot ionov tyazhelykh metallov [Iron sludge sorbing agent for sewage purification from heavy metal ions]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Journal of Construction and Architecture*. 2018. V. 20. No. 1. Pp. 148–159. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2018-20-1-148-159> (rus)
15. Zalazinskii G.G., Shchennikova T.L., Kishkoparov N.V., Zhidovinova S.V., Zolotukhina L.V., Gel'chinskii B.R. O poluchenii metallicheskih poroshkov metodami dispergirovaniya rasplava i gazofaznogo sinteza [Production of metal powder by dispersion methods and gas-phase synthesis]. In: *Fizicheskaya khimiya i tekhnologiya v metallurgii: sb., posv. 60-letiyu IMET UrO RAN (Coll. Papers 'Physical Chemistry and Technology in Metallurgy')*. Ekaterinburg, 2015. Pp. 374–383. (rus)
16. Usova N.T., Kutugin V.A., Lotov V.A., Lukashevich O.D. Kompozitsionnye materialy na osnove vysokozhelezistogo shlama vodopodgotovki [Composite materials based on highly iron sludge for water treatment]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. 2011. V. 319. No. 3. Pp. 36–39. (rus)
17. Vernigorov Yu., Lebedev V., Chunakhova L. Selection of non-magnetic fraction from the slime wastes of metal production in the electromagnetic field. *MATEC Web of Conferences*. 2019. V. 297. 04002. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929704002>

Сведения об авторах

Максимов Лев Игоревич, аспирант, Тюменский индустриальный университет, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38, maksimovli@tyuiu.ru

Миронов Виктор Владимирович, докт. техн. наук, профессор, Тюменский индустриальный университет, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38, mironovvv@tyuiu.ru

Authors Details

Lev I. Maksimov, Research Assistant, Tyumen State Oil and Gas University, 38, Volodarskii Str., 625000, Tyumen, Russia, maksimovli@tyuiu.ru

Viktor V. Mirinov, DSc, Professor, Tyumen State Oil and Gas University, 38, Volodarskii Str., 625000, Tyumen, Russia, mironovvv@tyuiu.ru