

Обезжелезивание подземных вод модифицированным огнеупорным шамотом

П.А. Клебеко¹✉, В.И. Романовский²

✉ pavkle@mail.ru

¹ Государственное предприятие «Экологияинвест», Минск, Беларусь

² Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук
Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Вода из подземных источников на территории России и стран ближнего зарубежья преимущественно содержит повышенные концентрации железа и марганца. При допустимой норме железа в питьевой воде 0,2–0,3 мг/л его содержание в подземных водах может достигать 40 мг/л. Для удаления избыточного растворимого железа его окисляют до нерастворимых форм. В статье представлена технология получения модифицированного каталитического материала для интенсификации процесса обезжелезивания подземных вод. **Методы.** В качестве исходного материала выбран огнеупорный шамот фракции 3–5 мм, источник железа – железосодержащий осадок очистки промывных вод фильтров обезжелезивания. В результате модификации произошло образование мелкодисперсной и кристаллической структуры гематита на поверхности шамота. Выявлено влияние дозы нитрата железа на содержание железа на поверхности модифицированного материала. **Результаты.** В ходе опытно-промышленных испытаний установлено, что увеличение концентрации железа на поверхности с 5,8 мас.% у исходного шамота до 19,0, 48,7 и 55,8 мас.% у модифицированного привели к увеличению степени окисления железа от Fe²⁺ до Fe³⁺ с 41,4% до 65,1, 73,0 и 80,0 % соответственно. Предлагаемый способ отличается значительными преимуществами перед аналогами за счет более низкого энергопотребления, расхода ресурсов и негативного воздействия на окружающую среду.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: шамот, обезжелезивание, подземные воды, каталитическая загрузка, водоснабжение.

Для цитирования: Клебеко П.А., Романовский В.И. Обезжелезивание подземных вод модифицированным огнеупорным шамотом // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2021. № 4. С. 135–146. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-4-8.

Дата поступления 25.05.2020.

© Клебеко П.А., Романовский В.И., 2021

DEIRONING OF UNDERGROUND WATER WITH MODIFIED REFRACTORY CHAMOTTE

Pavel A. Klebko¹ ✉, Valentin I. Romanovski²

✉ pavkle@mail.ru

¹Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

²Institute of General and Inorganic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

ABSTRACT

Significance. Water from underground sources in Russia and the CIS countries mainly contains higher concentrations of iron and manganese. With a permissible rate of iron content in drinking water of 0.2–0.3 mg/L, its content in groundwater can reach 40 mg/L. To remove excess soluble iron, it is oxidized to insoluble forms. For these purposes, iron removal filters are used. This research describes the preparation of modified catalytic material to intensify the process of deferrization of underground water. **Methods.** Refractory chamotte of a fraction of 3–5 mm was selected as the base material, and an iron-containing precipitate of the purification of washings waters from iron removal filters was used as the source of iron for the preparation of the precursor solution. As a result of the modification, the formation of a finely dispersed and crystalline structure of hematite on the chamotte surface occurred. The effect of the dose of iron nitrate on the iron content on the surface of the modified material is established. **Results.** During pilot tests, it was found that an increase in the concentration of iron on the surface from 5.8 wt.% in the initial chamotte to 19.0, 48.7 and 55.8 wt.% in the modified led to an increase in the degree of iron oxidation from Fe²⁺ to Fe³⁺ from 41.4% to 65.1, 73.0 and 80.0%, respectively. The proposed method has significant advantages over analogues due to significantly lower energy consumption, resource consumption and impact on environment.

Keywords: chamotte, deironing, groundwater, catalytic media, water supply.

For citation: Klebko P.A., Romanovskiy V.I. Deironing of Underground Water with Modified Refractory Chamotte. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2021. No. 4. P. 135–146. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-4-8.

Received May 25, 2020.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из источников хозяйственно-питьевого водоснабжения населения являются подземные воды. Водоснабжение из подземных источников зависит от ряда факторов, таких как повышенная концентрация железа и марганца [1], высокий бактериологический индекс, повышенная минерализация. Допустимая концентрация ионов железа в питьевой воде регламентируется требованием стандартов: в соответствии с рекомендациями Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) она составляет 0,2 мг/дм³, в ряде других стран – 0,3 мг/дм³.

Для нормальной эксплуатации фильтров для обезжелезивания подземных вод важным является подбор правильных параметров фильтрующих материалов. По своим свойствам загрузку можно разделить на каталитическую, на поверхности которой ускоряются реакции окисления железа двухвалентного до нерастворимых соединений трехвалентного железа, и фильтрующую, где происходит доулавливание образованных нерастворимых соединений железа [1].

Наиболее распространенными фильтрующими материалами являются кварцевый песок, антрацит, гранитная крошка, керамзит и активированный уголь. В качестве каталитической загрузки могут быть использованы различные материалы: абсолютно новые (загрузка на основе пластмасс, природного цеолита [2]) и модифицированные (антрациты [3], мезопористые материалы на основе кремнезема [4], биоугли [5]). В статье [2] представлен сравнительный анализ использования таких материалов.

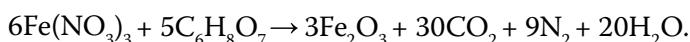
Одним из широко применяемых методов модификации фильтрующих загрузок является модификация металлами, чаще всего железом [1, 7–12] и марганцем [12–18].

Целью данной работы является разработка новых эффективных модифицированных каталитических материалов, имеющих преимущества по показателям высокой каталитической активности, эффективности производства и низкой себестоимости.

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для модификации выбран огнеупорный шамот фракции 3–5 мм. Прекурсор железа готовили из железосодержащего осадка очистки промывных вод фильтров обезжелезивания по параметрам, описанным в работах [19–21]. Состав исследуемого железосодержащего осадка: Fe – 55,38 %, O – 33,38 %, Si – 4,53 %, Ca – 4,11 %, Mn – 0,27 %, P – 1,88 %, Mg – 0,09 %, S – 0,08 %, Al – 0,06 %.

В качестве способа нанесения функционального покрытия был определен метод экзотермического горения в растворе (solution combustion synthesis – SCS) с использованием стехиометрической смеси нитрата железа (окислитель) и лимонной кислоты (citric acid – CA, восстановитель) [4]. Уравнения реакции представлены ниже:



Синтез загрузки производился с дозой нитрата железа в растворе 0,025, 0,05 и 0,075 г $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ на 1 г огнеупорного шамота. Модифицируемый шамот заливали приготовленным рабочим раствором в термостойком ста-

кане. Модификация производилась в муфельной печи при температуре 600 °С до конца экзотермической реакции. Выбор температуры обусловлен тем, что при использовании лимонной кислоты в данных условиях обеспечивается полное выгорание углерода и отсутствие остаточного углерода на поверхности частиц.

Морфология и элементный состав поверхности образцов были исследованы с помощью электронно-микроскопического анализа (Scanning Electron Microscopy, SEM). Для исследования качественного и количественного состава образца использована энергодисперсная рентгеновская спектроскопия (EDX). Фазовый состав синтезированной твердой фазы определялся с помощью рентгенографического дифракционного анализа (XRD). Определение концентрации общего железа основано на взаимодействии в сильнокислой среде окисленного железа и роданида с образованием окрашенного комплексного соединения (с точностью 0,01 мг/дм³). Определение рН выполнено в соответствии со стандартом ISO 10523-2009. Эксплуатационные характеристики, такие как гидравлическая крупность, насыпная плотность, угол естественного откоса, определялись для двух параллельных образцов. Для измерения гидравлической крупности были выбраны не менее 20 гранул из каждого образца.

Схема экспериментальной установки представлена в публикациях [1, 5]. Установка расположена в здании фильтров станции обезжелезивания (Брестская область, Беларусь) и представляет собой колонки диаметром 50 мм и высотой 1,7 м. Высота слоев исследуемых материалов составила 0,5 м для каталитического слоя (исследуемый модифицированный шамот) и 1,0 м для фильтрующего слоя (кварцевый песок). Подача исходной воды осуществлялась из скважин с последующей аэрацией в градирне. Начальная скорость фильтрации составляла 12 м/ч. Объем воды в баке поддерживался на одном уровне для постоянного напора, а уровень воды над слоем загрузки составлял до 5 см.

Анализ фильтрата проведен в аккредитованной лаборатории. Эффективность очистки воды от железа наблюдалась в первых порциях фильтрата объемом 250 мл с целью оценки эффективности работы каталитического слоя.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате модификации шамот приобрел темно-красный или темно-коричневый цвет (рис. 1). Результаты элементного анализа при проведении электронной микроскопии поверхности образцов представлены в табл. 1.

Равновесное содержание железа в исходном огнеупорном шамоте составляет 5,8±4,0 мас.%. Материалы, модифицированные при дозе нитрата

железа 0,025, 0,050 и 0,075 г/г загрузки, дали прирост содержания железа на поверхности в 13,2 %, 42,9 % и 50,0 % или в 3,3, 8,4 и 9,6 раз больше, чем у исходного.



Рис. 1. Поверхность исходного (а) и модифицированного шамота при дозе нитрата железа 0,025 г/г (б), 0,05 г/г (в) и 0,075 г/г (з).

Fig. 1. The surface of initial (a) and modified chamotte with the nitrate dose 0.025 g/g (б), 0.05 g/g (в), and 0.075 g/g (з).

На основании рентгенофазового анализа, данные которого представлены на рис. 2, можно сделать вывод, что образовавшиеся в результате синтеза железосодержащей фазы твердые частицы представляют преимущественно гексагональную кристаллическую фазу гематита с пространственной группой R-3с в количестве 92,9 мас. % и 7,1 мас. % кубической фазы магнетита с пространственной группой Fd-3m. Полученные данные о высокой доле фазы гематита отличаются от фаз, полученных на образцах модифицированием углей [5], где органический материал играет дополнительную функцию восстановителя, что приводит к получению преимущественной

Таблица 1. Результаты элементного анализа поверхности образцов шамота, мас. %

Table 1. Results of the element analysis of the chamotte samples surface, mass %

Элемент	Исходный шамот	Модифицированный шамот (доза нитрата железа, г/г)		
		0,025	0,050	0,075
Al	27,1±0,6	23,9±1,8	20,3±0,3	17,2±8,0
Si	61,6±6,4	54,7±1,8	30,2±5,7	18,3±1,1
K	5,5±1,8	2,5±3,5	0,9±1,2	8,8±8,3
Fe	5,8±4,0	19,0±3,5	48,7±4,8	55,8±1,4

Примечание: * – без учета кислорода.

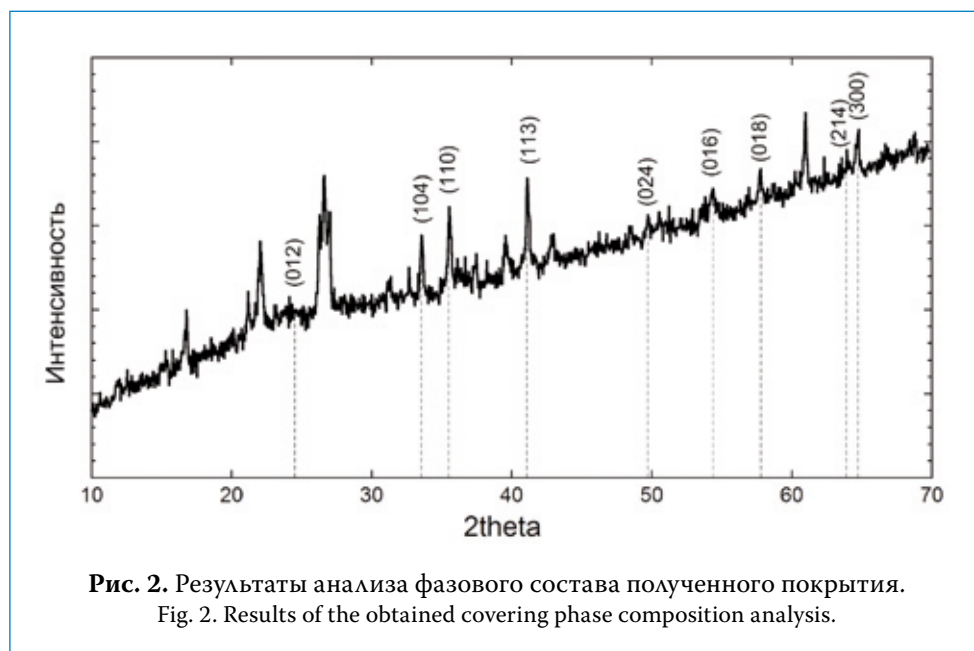
**Рис. 2.** Результаты анализа фазового состава полученного покрытия.

Fig. 2. Results of the obtained covering phase composition analysis.

фазы магнетита. Расчетное значение среднего размера кристаллитов по результатам рентгенофазового анализа для пика 33,56 2theta (100 % интенсивность для фазы гематита) полученного образца, синтезированного с помощью лимонной кислоты, составляет 34,4 нм. Помимо железосодержа-

щих фаз остальные пики представлены фазами SiAl_2O_5 (триклинная, P-1) и SiO_2 (тетрагональная, P41212).

Эксплуатационные характеристики образцов представлены в табл. 2. На основании имеющихся данных можно сделать вывод, что значительных изменений эксплуатационных характеристик модифицированных материалов в сравнении с исходным материалом не наблюдалось. Это является показателем того, что применение модифицированных материалов не потребует изменений в режимах работы фильтра и его промывки. Однако следует отметить некоторое увеличение угла естественного откоса и уменьшение скорости фильтрования через слой загрузки 50 см. Данные изменения можно объяснить образованием слоя оксидов железа, приводящего к увеличению шероховатости поверхности и соответствующим изменениям в значениях указанных выше показателей.

Таблица 2. Основные эксплуатационные характеристики исследуемых образцов загрузки

Table 2. The main operational characteristics of the load sampls under invetigation

Эксплуатационные характеристики	Исходный шамот	Модифицированный шамот (доза нитрата железа, г/г)		
		0,025	0,010	0,075
Гидравлическая крупность, мм/с	165,7±32,8	158,3±14,7	147,9±22,7	151,2±16,2
Насыпная плотность, кг/м ³	1046±5	1057±7	1064±1	1062±9
Угол естественного откоса, град.	30,8±1,5	32,5±1,2	33,8±1,6	35,1±0,8
Скорость фильтрования, м/ч	86,2±2,3	79,3±3,1	76,8±1,2	74,6±2,9

Эффективность использования модифицированных материалов оценена по остаточному содержанию железа общего в первой порции фильтрата в 250 мл. Исходная аэрированная вода (среднее содержание железа общего 3,75 мг/дм³) имела рН 7,4. После фильтрации значение рН отфильтрованной воды практически не изменилось и составило 7,5. Эффективность окисления железа из Fe^{2+} в Fe^{3+} в фильтрате после колонок составила: при использовании исходного шамота – 41,4 %, модифицированного, приготовленного с дозой нитрата железа 0,025 г/г – 65,1 %, 0,05 г/г – 73,0 %; с дозой 0,075 г/г – 80,0 %. Таким образом, эффективность окисления для образца, приготовленного при дозе нитрата железа

0,075 г/г, увеличилась почти в два раза в сравнении с исходным шамотом. Остаточное содержание железа в фильтрате после колонок: при использовании исходного шамота – 1,26 мг/л; модифицированного, приготовленного с дозой нитрата железа 0,025 г/г, – 0,75 мг/л, 0,05 г/г – 0,58 мг/г; с дозой 0,075 г/г – 0,43 мг/г.

Таким образом, эффективность обезжелезивания подземной воды при использовании модифицированного шамота составила в среднем 86 % для первой порции отфильтрованной воды. Для сравнения, эффективность обезжелезивания при использовании модифицированного таким же способом антрацита – 95 % [20], модифицированного активированного угля – 96 % [5]. Более низкие результаты для шамота можно объяснить разной по структуре и химическому составу поверхности модифицируемого материала, методами аэрации подземной воды перед фильтрованием (для шамота использовалась предварительная аэрация с применением микрокомпрессора, а для углей – аэрация в градирне).

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

В результате проведенных исследований установлена эффективность использования метода экзотермического горения в растворах для модификации фильтрующего материала – огнеупорного шамота. Данный метод способствует образованию микродисперсных кристаллических фаз гематита, что положительно влияет на каталитическую способность материала. Остаточная концентрация железа общего в первых порциях фильтрата при использовании модифицированных образцов до трех раз ниже, чем в случае использования исходного материала.

Модификация огнеупорного шамота не привела к изменению эксплуатационных характеристик материала. Это свидетельствует о том, что применение модифицированного шамота не требует изменения режимов фильтрации и промывки фильтров. Предложенный метод позволяет значительно повысить экологичность технологии. Так, энергопотребление в сравнении с аналогами снижается более чем в 100 раз, до 10 раз сокращается расход необходимых реагентов. В представленном примере получен материал на основе отхода огнеупорного шамота, а в качестве прекурсора железа использованы осадки станций обезжелезивания. Таким образом, даже при использовании только отходов были получены высокоэффективные гранулированные загрузки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Guidelines for drinking-water quality // WHO chronicle. 2011. Vol. 38. № 4. P. 104–108. Режим доступа: https://www.who.int/water_sanitation_health/publications/dwq-guidelines-4/en/.

2. Barloková D., Ilavský J. Removal of iron and manganese from water using filtration by natural materials // *Polish Journal of Environmental Studies*. 2010. Vol. 19, Iss. 6. P. 1117–1122.
3. Romanovskii V.I., Khort A.A. Modified Anthracites for Deironing of Underground Water // *Journal of Water Chemistry and Technology*, 2017, Vol. 39, Issue 5, P. 299–304.
4. Diagboya P.N.E., Dikio E.D. Silica-based mesoporous materials; emerging designer adsorbents for aqueous pollutants removal and water treatment // *Microporous and Mesoporous Materials*. 2018. Vol. 266. P. 252–267.
5. Propolsky D., Romanovskaia E., Kwapinski W., Romanovski V. Modified activated carbon for deironing of underground water // *Environmental Research*. 2020. Vol. 182. P. 108996.
6. Rashid R.A., Jawad A.H., Azlan M.O., Ishak M.O., Kasim N.N. FeCl₃-activated carbon developed from coconut leaves: characterization and application for methylene blue removal // *Sains Malaysiana*. 2018. Vol. 47, № 3. P. 603–610.
7. Shi Z., Liu F., Yao S. Adsorptive removal of phosphate from aqueous solutions using activated carbon loaded with Fe (III) oxide // *New carbon materials*. 2011. Vol. 26, № 4. P. 299–306.
8. Ahammed M.M., Davra K. Performance evaluation of biosand filter modified with iron oxide-coated sand for household treatment of drinking water // *Desalination*. 2011. Vol. 276, No. 1–3. P. 287–293.
9. De León M.A., Rodríguez M., Marchetti S.G., Sapag K., Faccio R., Sergio M., Bussi J. Raw montmorillonite modified with iron for photo-Fenton processes: influence of iron content on textural, structural and catalytic properties // *Journal of environmental chemical engineering*. 2017. Vol. 5, № 5. P. 4742–4750.
10. Liu H., Chen Z., Guan Y., Xu S. Role and application of iron in water treatment for nitrogen removal: A review // *Chemosphere*. 2018. Vol. 204. P. 51–62.
11. Lyubutin I.S., Baskakov A.O., Starchikov S.S., Shih K.Y., Lin C.R., Tseng Y.T., Yang S.S., Han Z.Y., Ogarkova Y.L., Nikolaichik V.I., Avilov A.S. Synthesis and characterization of graphene modified by iron oxide nanoparticles // *Materials Chemistry and Physics*. 2018. Vol. 219. P. 411–420.
12. Xuwen H.E., Huimin Y., Yong H.E. Treatment of mine water high in Fe and Mn by modified manganese sand // *Mining Science and Technology (China)*. 2010. Vol. 20, № 4. P. 571–575.
13. Schütz T., Dolinská S, Hudec P, Mockovčiaková A, Znamenáčková I. Cadmium adsorption on manganese modified bentonite and bentonite-quartz sand blend // *International Journal of Mineral Processing*. 2016. Vol. 150. P. 32–38.
14. Tiwari D., Laldanwngliana C., Choi C.H., Lee S.M. Manganese-modified natural sand in the remediation of aquatic environment contaminated with heavy metal toxic ions // *Chemical Engineering Journal*. 2011. Vol. 171, № 3. P. 958–966.
15. Nieto-Delgado C., Gutiérrez-Martínez J., Rangel-Méndez J.R. Modified activated carbon with interconnected fibrils of iron-oxyhydroxides using Mn²⁺ as morphology regulator, for a superior arsenic removal from water // *Journal of Environmental Sciences*. 2019. Vol. 76. P. 403–414.

16. Grygo-Szymanko E., Tobiasz A., Walas S. Speciation analysis and fractionation of manganese: A review // *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2016. Vol. 80. P. 112–124.
17. Gac W., Słowik G., Zawadzki W. Structural and surface changes of copper modified manganese oxides // *Applied Surface Science*. 2016. Vol. 370. P. 536–544.
18. Cecowski S., Tušar N.N., Rangus M., Mali G., Soler-Illia G.J., Kaučič V. Thin films of cubic mesoporous aluminophosphates modified by silicon and manganese // *Microporous and Mesoporous Materials*. 2010. Vol. 135, № 1–3. P. 161–169.
19. Романовский В.И., Куличик Д.М., Пилипенко М.В., Романовская Е.В. Железо-содержащие фотокатализаторы из осадков очистки промывных вод фильтров обезжелезивания // *Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение*. 2019. № 5 (137). С. 24–28.
20. Romanovski V. New approach for inert filtering media modification by using precipitates of deironing filters for underground water treatment. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020. Vol. 27. P. 31706–31714.
21. *Aquananotechnology. 1st Edition. Applications of Nanomaterials for Water Purification*. Editors: Kamel Abd-Elsalam Muhammad Zahid. Elsevier. 2020. 622 p.

REFERENCES

1. Guidelines for drinking-water quality. *WHO chronicle*. 2011. Vol. 38. No. 4. P. 104–108. Access regime: https://www.who.int/water_sanitation_health/publications/dwq-guidelines-4/en/.
2. Barloková D., Ilavský J. Removal of iron and manganese from water using filtration by natural materials. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2010. Vol. 19. Iss. 6. P. 1117–1122.
3. Romanovskii V.I., Khort A.A. Modified Anthracites for Deironing of Underground Water. *Journal of Water Chemistry and Technology*. 2017. Vol. 39. Issue 5. Pp. 299–304.
4. Diagboya P.N.E., Dikio E.D. Silica-based mesoporous materials; emerging designer adsorbents for aqueous pollutants removal and water treatment. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2018. Vol. 266. P. 252–267.
5. Propolsky D., Romanovskaia E., Kwapinski W., Romanovski V. Modified activated carbon for deironing of underground water. *Environmental Research*. 2020. Vol. 182. P. 108996.
6. Rashid R.A., Jawad A.H., Azlan M.O., Ishak M.O., Kasim N.N. FeCl₃-activated carbon developed from coconut leaves: characterization and application for methylene blue removal. *Sains Malaysiana*. 2018. Vol. 47. No. 3. P. 603–610.
7. Shi Z., Liu F., Yao S. Adsorptive removal of phosphate from aqueous solutions using activated carbon loaded with Fe (III) oxide. *New carbon materials*. 2011. Vol. 26, No. 4. P. 299–306.
8. Ahammed M.M., Davra K. Performance evaluation of biosand filter modified with iron oxide-coated sand for household treatment of drinking water. *Desalination*. 2011. Vol. 276. No. 1–3. P. 287–293.

9. De León M.A., Rodríguez M., Marchetti S.G., Sapag K., Faccio R., Sergio M., Bussi J. Raw montmorillonite modified with iron for photo-Fenton processes: influence of iron content on textural, structural and catalytic properties. *Journal of environmental chemical engineering*. 2017. Vol. 5. No. 5. P. 4742–4750.
10. Liu H., Chen Z., Guan Y., Xu S. Role and application of iron in water treatment for nitrogen removal: A review. *Chemosphere*. 2018. Vol. 204. P. 51–62.
11. Lyubutin I.S., Baskakov A.O., Starchikov S.S., Shih K.Y., Lin C.R., Tseng Y.T., Yang S.S., Han Z.Y., Ogarkova Y.L., Nikolaichik V.I., Avilov A.S. Synthesis and characterization of graphene modified by iron oxide nanoparticles. *Materials Chemistry and Physics*. 2018. Vol. 219. P. 411–420 (In Russ).
12. Xuwen H.E., Huimin Y., Yong H.E. Treatment of mine water high in Fe and Mn by modified manganese sand. *Mining Science and Technology (China)*. 2010. Vol. 20. No. 4. P. 571–575.
13. Schütz T., Dolinská S., Hudec P., Mockovčiaková A., Znamenáčková I. Cadmium adsorption on manganese modified bentonite and bentonite-quartz sand blend. *International Journal of Mineral Processing*. 2016. Vol. 150. P. 32–38.
14. Tiwari D., Laldanwngliana C., Choi C.H., Lee S.M. Manganese-modified natural sand in the remediation of aquatic environment contaminated with heavy metal toxic ions. *Chemical Engineering Journal*. 2011. Vol. 171. No. 3. P. 958–966.
15. Nieto-Delgado C., Gutiérrez-Martínez J., Rangel-Méndez J.R. Modified activated carbon with interconnected fibrils of iron-oxyhydroxides using Mn²⁺ as morphology regulator, for a superior arsenic removal from water. *Journal of Environmental Sciences*. 2019. Vol. 76. P. 403–414.
16. Grygo-Szymanko E., Tobiasz A., Walas S. Speciation analysis and fractionation of manganese: A review. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2016. Vol. 80. P. 112–124.
17. Gac W., Słowik G., Zawadzki W. Structural and surface changes of copper modified manganese oxides. *Applied Surface Science*. 2016. Vol. 370. P. 536–544.
18. Cecowski S., Tušar N.N., Rangus M., Mali G., Soler-Illia G.J., Kaučič V. Thin films of cubic mesoporous aluminophosphates modified by silicon and manganese. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2010. Vol. 135, No. 1–3. P. 161–169.
19. Romanovskiy V.I., Kulichik D.M., Pilipenko M.V., Romanovskaya Y.V. Zhelezosoderzhashchiye fotokatalizatory iz osadkov oчитки promyvnykh vod fil'trov obez-zhelezivaniya [Iron-containing photo/catalysts from the deironization filters washed waters residue] *Vodooчистka. Vodopodgotovka. Vodospabzheniye*. 2019. No. 5 (137). P. 24–28 (in Russ).
20. Romanovski V. New approach for inert filtering media modification by using precipitates of deironing filters for underground water treatment. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020. Vol. 27. P. 31706–31714 (in Russ).
21. Aquananotechnology. 1st Edition. Applications of Nanomaterials for Water Purification. Editors: Kamel Abd-Elsalam Muhammad Zahid. Elsevier. 2020. P. 622.

Сведения об авторах:

Клебеко Павел Альбинович, эксперт, Государственное предприятие «Экологияинвест», Республика Беларусь, 220004, г. Минск, ул. Коллекторная 10; e-mail: pavkle@mail.ru

Романовский Валентин Иванович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь, 220072, г. Минск, Сурганова 9/1; e-mail: V.Romanovski@yandex.ru

About the authors:

Pavel A. Klebeko, Expert, EcologyInvest State Enterprise, ul. Collectornaia 10, Minsk, 220004, Republic of Belarus; e-mail: pavkle@mail.ru

Valentin I. Romanovski, Candidate of Technical Sciences., Senior Researcher, Institute of General and Inorganic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus, ul. Surganova 9/1, Minsk, 220072, Republic of Belarus; e-mail: V.Romanovski@yandex.ru.