

Технология обезжелезивания подземной воды в вертикально- радиальном реакторе-фильтре

Рецензия эксперта на статью получена
22.04.2026 [The expert review of the article
was received on April 22, 2026]

Обеспечение населения качественной питьевой водой является одним из приоритетных направлений развития водохозяйственного комплекса и важнейшим фактором повышения качества жизни населения страны. Для водоснабжения населённых пунктов всё чаще используют подземные воды, которые в зависимости от условий формирования содержат в повышенных концентрациях железо и марганец, соли жёсткости, характеризуются наличием растворённых газов, отрицательными значениями окислительно-восстановительного потенциала E_h , различной степенью минерализации и широким диапазоном значений pH.

Для обезжелезивания подземных вод находят применение реагентные методы с использованием сильных окислителей и безреагентные методы на основе аэрации и фильтрации через инертные и каталитические загрузки различной плотности [1, 2]. Одним из перспективных направлений в области обезжелезивания подземных вод является развитие биологических методов [3–5]. В современных условиях на станциях обезжелезивания реализуются одно- и двухступенчатые технологии с использованием:

1. Напорной фильтрации через каталитическую загрузку из алюмосиликатного сорбента «Сорбент АС» [6].
2. Системы безреагентной очистки подземной воды «Аэромаг» [7].
3. Биореакторов со струйно-вакуумной эжекцией (БСВЭ) и фильтров с плавающей пенополистирольной загрузкой (ФПЗ) [4] и других установок и сооружений.

Оценка эксплуатационных и технологических характеристик (табл.1) станций обезжелезивания на основе технологий №1–3 показала следующее. По удельной производительности и требуемому строительному объёму здания для размещения водоочистного оборудования технология №1 на базе вертикальных осветлительных фильтров с загрузкой «Сорбент АС» превосходит другие аналоги. Однако каталитическая загрузка характеризуется относительно невысокой грязеёмкостью, а данная технология имеет существенный недостаток: высокое потребление воды для промывки загрузки.

Отличительной особенностью системы безреагентной очистки «Аэромаг» №2 является применение комплекса, включающего в себя физический окислительный реактор, объединяющий магнитную активацию, кавитацию и аэрацию воды, и гидроавтоматический самопромывной фильтр с инертной загрузкой. Функционирование такой системы полностью автономно, а использование гидроавтоматической промывки фильтрующей загрузки существенно снижает расход промывной воды. В то же время на получение 1 м³ питьевой воды требуются существенные затраты электроэнергии.

В технологии №3 на основе БСВЭ и ФПЗ применена запатентованная система струйно-вакуумной эжекции для подсоса воздуха, а в качестве фильтрующей загрузки используется плавающая загрузка из гранул вспененного полистирола, обладающая преимуществами по сравнению с тяжёлой загрузкой. Анализ многолетней

УДК 628.16. Научная специальность: 2.1.4.

Технология обезжелезивания подземной воды в вертикально-радиальном реакторе-фильтре

Вадим Олегович Говоров, аспирант, кафедра «Водоснабжение и водоотведение», Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); **Олег Борисович Говоров**, к.т.н., главный специалист отдела проектирования сооружений АО «Инжпроектсервис» (г. Москва)

Для обезжелезивания подземных вод широко применяются безреагентные технологии. Представлен сравнительный анализ эксплуатационных характеристик, технологических параметров и экономических показателей ряда современных технологий. Установлено, что для снижения затрат на строительство и обслуживание станций обезжелезивания требуются новые технические и технологические решения. В статье приведено описание вертикально-радиального реактора-фильтра для обезжелезивания воды. Установка комбинированного типа реализует технологию, основанную на процессах аэрации в контактной среде, окисления и очистки воды от хлопьевидного гидроксида железа в слое крупногранульной загрузки в вертикальном предварительном фильтре и радиальном фильтре с переменной скоростью фильтрования. Представлены результаты предварительных экспериментальных исследований различных элементов установки на воде с различным физико-химическим составом, которые показали перспективность разработки и необходимость дальнейшего изучения гидравлических закономерностей и определения параметров работы.

Ключевые слова: станция обезжелезивания, капитальные и эксплуатационные затраты, камера аэрации, загрузка, предварительный фильтр, радиальный фильтр.

UDC 628.1. Scientific specialty: 2.1.4.

Technology for de-ferritization of underground water using a vertical-radial reactor-filter

Vadim O. Govorov, postgraduate student, Department of Water Supply and Wastewater Disposal, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU); **Oleg B. Govorov**, PhD (Engineering), Chief Specialist of the Structures Design Department, "Inzhproekt servis", JSC (Moscow)

Reagent-free technologies are widely used for the de-ferritization of groundwater. A comparative analysis of the operational characteristics, technological parameters, and economic indicators of a number of modern technologies is presented. It has been established that new technical and technological solutions are required to reduce the costs of construction and maintenance of de-ferritization stations. The article describes a vertically-radial reactor-filter for the de-ferritization of water. The combined-type installation implements a technology based on the processes of aeration in a contact medium, oxidation, and water purification from flocculent iron hydroxide in a layer of coarse-grained loading in a vertical pre-filter and a radial filter with a variable filtration rate. The results of preliminary experimental studies of various elements of the installation on water with different physical and chemical compositions are presented, which showed the prospects for development and the need for further study of hydraulic laws.

Key words: iron removal station, capital and operating costs, aeration chamber, loading, pre-filter, radial filter.

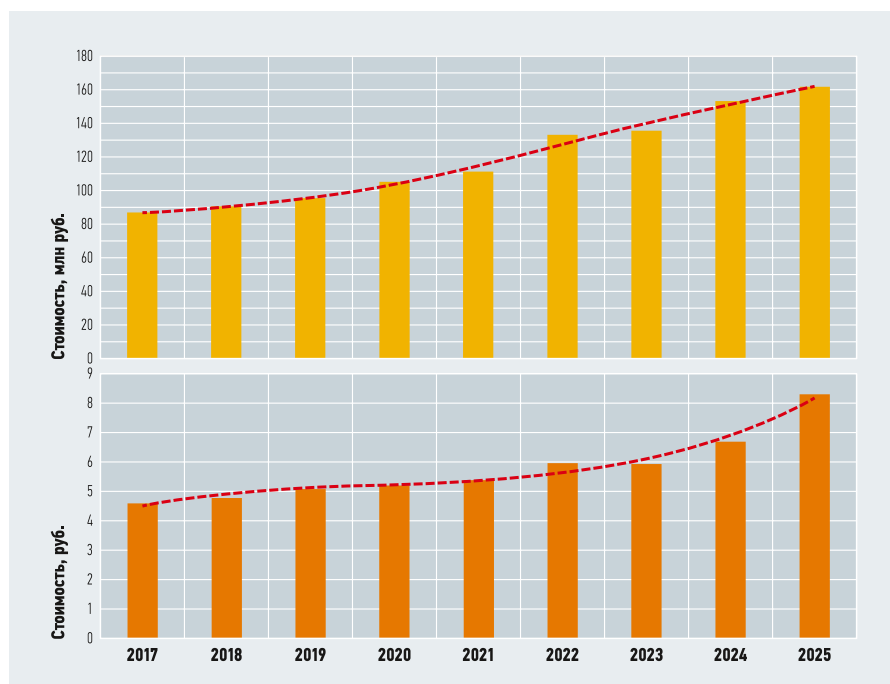


Рис. 1. Стоимость строительно-монтажных работ (вверху) и электроэнергии на обслуживание станций обезжелезивания

Эксплуатационные и технологические характеристики

табл. 1

Технология	Удельная производительность, м ³ /ч на м ³	Требуемый объем здания, м ³	Удельный расход электроэнергии, Вт/м ³	Грязеёмкость, кг/м ³	Расход воды на промывку, % от производительности станции
ФОВ с загрузкой «Сорбент АС»	8,8	144	81,8	2–3	1–2
Система «Аэромаг»	1,5	351	186,9	1,5–3	0,5–1
БСВЗ + ФПЗ	1,3	225	58,8	12,5	1–1,5

эксплуатации станций, построенных по такой технологии, показал, что двухступенчатая схема является надёжной, энергоэффективной и ресурсосберегающей. При этом размещение сооружений первой ступени (биореакторов высотой 8–10 м) требует соответствующих габаритов здания станции обезжелезивания.

Как показывает практика, строительство современных станций обезжелезивания на основе безреагентных технологий связано со значительными затратами.

Для станций обезжелезивания производительностью 10 тыс. м³/сут. средний рост стоимости строительно-монтажных работ за последние девять лет составил 10 % г/г по данным сборников укрупнённых нормативов цены строительства для Московской области за 2017–2025 годы, утверждённых Минстроем России.

Стоимость 1 кВт·ч электрической энергии за этот период выросла почти в два раза, и средний ежегодный рост стоимости электроэнергии составил 8,93 % (рис. 1).

Таким образом, возникает необходимость в усовершенствовании и дальнейшей разработке новых водоочистных технологий с использованием установок комбинированного типа, которые обеспечивают очистку воды до нормативных требований, сокращая при этом затраты на строительство и эксплуатацию станций.

Авторами было предложено совместить несколько технологических приёмов и создать новую комбинированную установку — вертикально-радиальный реактор-фильтр (ВРРФ), обладающую по сравнению с аналогами потенциально высокой удельной производительностью, грязеёмкостью и низким расходом промывных вод [8]. В состав ВРРФ вошли камера аэрации со встроенной кассетой с полиэфирными нитями в качестве носителя прикреплённых микроорганизмов, вертикальный предварительный фильтр с крупногранульной инертной загрузкой и радиальный фильтр обезжелезивания с плавающей пенополистирольной загрузкой, работающий с переменной скоростью фильтрования.

Методика и результаты исследований

Эффективность очистки воды в отдельных элементах комбинированной установки исследовалась на подземных источниках питьевого водоснабжения с различным физико-химическим составом.

Вода характеризовалась повышенными концентрациями двухвалентного железа (1,2–6,0 мг/л) и сероводородным запахом интенсивностью до трёх баллов.

Водородный показатель (рН) изменялся от 7,6 до 7,75, а окислительно-восстановительный потенциал имел отрицательные значения от –96 до –35 мВ. Забор исследуемой воды осуществлялся с глубины около 70 м.

Для изучения процесса аэрации и сравнительной оценки эффективности аэрационных устройств на площадке ВЗУ были разработаны и смонтированы модельные установки. Одна установка представляла собой классическую камеру аэрации (ККА), выполненную из оргстекла, в нижнюю часть которой подавалась исходная вода с предварительно эжектируемым атмосферным воздухом. В другую, усовершенствованную конструкцию камеры аэрации (УКА) дополнительно была установлена кассета с натянутыми перпендикулярно направлению водо-воздушного потока полиэфирными нитями толщиной 1,5–2 мм (рис. 2).

Расход воды в опытах составлял 0,8 м³/ч, время контакта воды в камере не превышало 25 с.

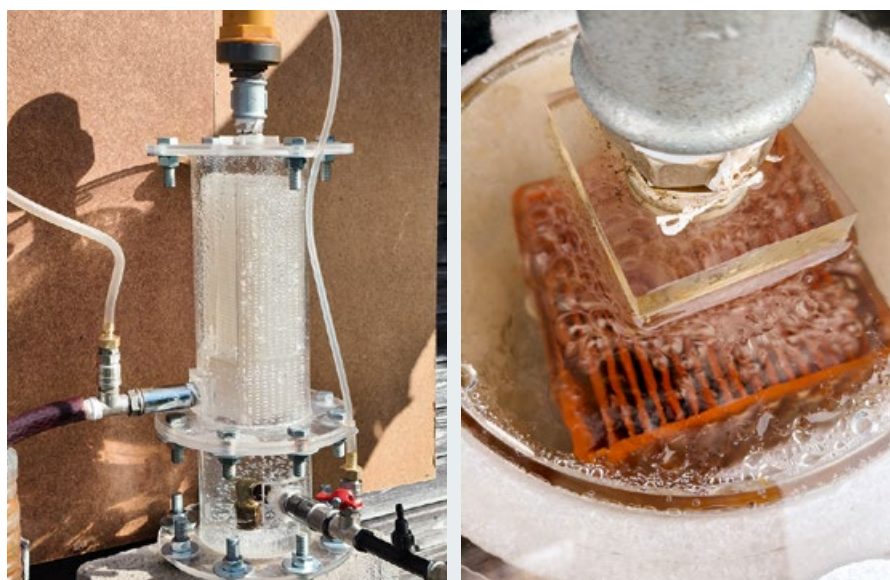


Рис. 2. Общий вид (слева) и фрагменты усовершенствованной камеры аэрации

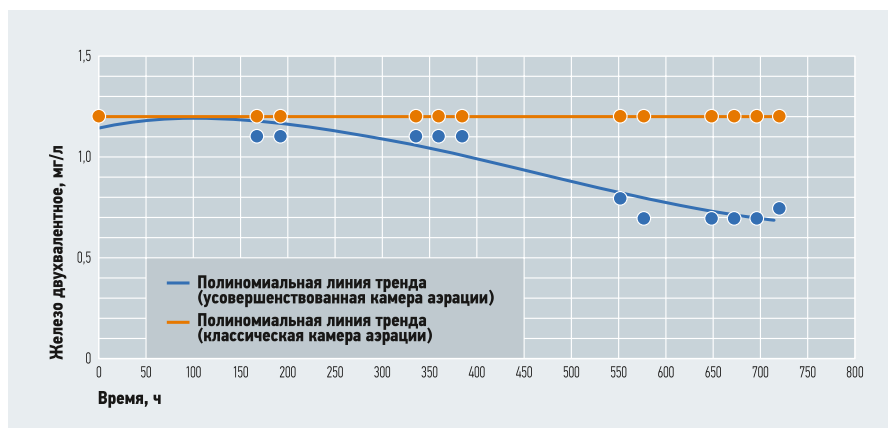
В ходе эксперимента было установлено, что после аэрации в обеих камерах концентрация кислорода достигала 4,5 мг/л, при этом наблюдалось незначительное увеличение pH. Динамика изменения E_h в воде до и после камер аэрации показала, что в течение периода наблюдений в УКА прирост потенциала был на 10–15 мВ больше, чем в классической камере аэрации. Вместе с тем снижалась концентрация двухвалентного растворённого железа в среднем на 33%, в то время как в ККА перевод двухвалентного железа в трёхвалентное не осуществлялся (рис. 3).

Можно предположить, что процесс окисления растворённого двухвалентного железа интенсифицируется за счёт жизнедеятельности присутствующих в подземной воде железобактерий, способных иммобилизоваться на полиэфирных нитях встроённой кассеты.

При восходящем движении водо-воздушной смеси пузырьки воздуха, проходя между нитями, приводили к срыву и выносу осадка, накапливаемого в процессе работы УКА, что обеспечивало самоочищение камеры аэрации.

Следующей технологической ступенью установки является префильтр. Его основная задача — снижение грязевой нагрузки на радиальный фильтр и обеспечение требуемой скорости фильтрования на входе в него не менее 70 м/ч. В качестве загрузки префильтра использовались гранулы вспененного полистирола крупной фракции 5–10 мм. Для префильтра, являющегося частью ВРРФ, были установлены граничные условия по двум параметрам: потери напора Δh не должны превышать 1 м, а эффективность очистки воды по показателю «железо» должна быть не менее 25%. Предварительные исследования работы префильтра в режиме вертикального нисходящего и восходящего фильтрования на подземной воде со скоростью около 70 м/ч подтвердили эффективную работу в течение нескольких суток и выявили некоторые особенности. Так, эффект очистки воды по общему железу составил порядка 30–40%, при этом продолжительность фильтроцикла и грязеемкость загрузки при начальной концентрации двухвалентного железа в исходной воде 1,2 мг/л достигали 312 ч и 10 кг/м³ [9].

Последний элемент комбинированной установки — радиальный фильтр. Его преимущество заключается в большей площади фильтрования по сравнению с вертикальным фильтром. По предварительным расчётам, при высоте слоя загрузки в 1 м и равных диаметрах вертикального и радиального фильтров в диапазоне значений менее 4 м площадь радиального



•• Рис. 3. Изменение концентрации железа в аэрированной воде после камер аэрации

фильтра больше площади вертикального, что позволяет значительно увеличить удельную производительность установки.

Анализ научно-технической литературы, посвящённой радиальным фильтрам с тяжёлой песчано-гравийной загрузкой и фильтрующим материалом из горелой породы для доочистки сточных вод [10, 11], показал, что такие сооружения не лишены ряда недостатков. К ним можно отнести высокие требования к однородности фильтрующего материала, сложность замены фильтрующих материалов, громоздкую систему промывки, неполовое использование фильтрующего слоя в связи с возникновением депрессионной воронки и др. Использование в качестве фильтрующей загрузки радиальных фильтров пенополистирола и регулирование пористости слоя за счёт размещения во внутреннем пространстве специальных прижимных механизмов [12] связано со сложностью эксплуатации сооружения и не нашло широкого применения.

Для исключения недостатков существующих конструкций радиальных фильтров была предложена в составе ВРРФ модель фильтра (со смещёнными точками отвода очищенной воды и с плавающей загрузкой), в которой фильтрование воды осуществляется в направлении от центра к периферии. Она характеризуется про-

стойкой конструкции, отсутствием дополнительных механизмов, работой фильтрующего слоя полным сечением в направлении убывающей крупности гранул. Для определения параметров очистки воды и гидравлических характеристик планируется провести дальнейшие лабораторные и полупромышленные испытания на подземной железосодержащей воде.

Заключение

Проведённый анализ экономических показателей строительства и обслуживания станций обезжелезивания в современных условиях показал, что требуется дальнейший поиск технических и технологических решений, направленных на обеспечение нормативных требований к качеству питьевой воды при необходимости снижения затрат на строительство и обслуживание станций обезжелезивания.

К таким решениям может быть отнесена и предложенная авторами установка комбинированного типа — вертикально-радиальный реактор-фильтр, обладающая улучшенными технологическими и эксплуатационными характеристиками. Предварительные экспериментальные исследования процесса обезжелезивания подтвердили перспективность использования данной установки в составе технологической схемы кондиционирования подземной воды. •

1. Николадзе Г.И. Улучшение качества подземных вод. — М.: Стройиздат, 1987. 240 с.
2. Золотова Е.Ф., Асс Г.Ю. Очистка воды от железа, марганца, фтора и сероводорода. — М.: Стройиздат, 1975. 176 с.
3. Менча М.Н. Железобактерии в системах питьевого водоснабжения из подземных источников // Водоснабжение и санитарная техника, 2006. №7. С. 25–32.
4. Говорова Ж.М., Говоров О.Б. Исследование и опыт внедрения технологии обезжелезивания и умягчения подземной воды в Московской области // Водоснабжение и санитарная техника, 2016. №9. С. 6–15.
5. Седлухо Ю.П. Влияние аэрационно-дегазационных процессов на свойства подземных вод и технологии их биологического окисления обезжелезивания и деманганации // Вода, 2012. №7–8. С. 2–5.
6. Фаттахов В.Э., Данилов А.А. Реконструкция станции обезжелезивания воды // Сантехника, 2025. №4. С. 30–33.
7. Бобылев Ю.О. Технология водоочистки. Аэромагнитная обработка воды // Экология и промышленность России, 2013. №11. С. 12–15.
8. Патент РФ №2855938. МПК B01D 24/28 (2025.08). Вертикально-радиальный реактор-фильтр / В.О. Говоров, О.Б. Говоров, А.О. Говорова. №2025107586. Заявл.: 28.03.2025; опублик.: 05.02.2026. Бюл. №4.
9. Говоров В.О., Примин О.Г. К вопросу обоснования безреагентного обезжелезивания воды с использованием крупногранульного фильтрующего материала / Актуальные проблемы строительной отрасли и образования: Сб. докл. V Нац. науч. конф. (16.12.2024, Москва). — М.: Изд-во МИСИ-МГСУ, 2025. С. 495–499.
10. Шевцов М.Н. Экологические проблемы водохозяйственного комплекса. — Хабаровск: Изд-во ТОГУ, 2016. 187 с.
11. Фоминых А.М., Войтов Е.Л. Доочистка биологически очищенных сточных вод фильтрованием на радиальных фильтрах // Водоснабжение и санитарная техника, 1977. №7. С. 8–10.
12. Дзюбо В.В., Алфёрова Л.И. Технологическое и конструктивное оформление радиального фильтрования природных вод // Вестник ТГАСУ, 2013. №3. С. 329–344.

References — see page 78.

Technology for de-ferritization of underground water using a vertical-radial reactor-filter. Pp. 12–14.

Vadim O. Govorov, postgraduate student, Department of Water Supply and Wastewater Disposal, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU);
Oleg B. Govorov, PhD (Engineering), Chief Specialist of the Structures Design Department, "Inzhproekt servis", JSC (Moscow)

1. G.I. Nikoladze. *Uluchshenie kachestva podzemnykh vod* [Improving groundwater quality]. Moscow. *Strojizdat* [Publishing House of Literature on the Construction and Architecture ("Stroiizdat" Publishers)]. 1987. 240 p. [In Russian]
2. E.F. Zolotova, G.Yu. Ass. *Ochistka vody ot zheleza, margantsa, fiora i serovodoroda* [Water purification from iron, manganese, fluorine, and hydrogen sulfide]. Moscow. *Strojizdat* [Publishing House of Literature on the Construction and Architecture ("Stroiizdat" Publishers)]. 1975. 176 p. [In Russian]
3. M.N. Mencha. *Zhelezobakterii v sistemakh pit'evogo vodosnabzheniya iz podzemnykh istochnikov* [Iron bacteria in drinking water supply systems from underground sources]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* ["Water Supply and Sanitary Engineering" Magazine]. 2006. No. 7. Pp. 25–32. [In Russian]
4. Zh.M. Govorova, O.B. Govorov. *Issledovanie i opyt vnedreniya tekhnologii obezhelezivaniya i umyagcheniya podzemnoj vody v Moskovskoy oblasti* [Research and experience with implementing groundwater iron removal and softening technology in the Moscow Region]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* ["Water Supply and Sanitary Engineering" Magazine]. 2016. No. 9. Pp. 6–15. [In Russian]
5. Yu.P. Sedlukho. *Vliyaniye aeratsionno-degazatsionnykh protsessov na svoystva podzemnykh vod i tekhnologii ikh biologicheskogo okisleniya obezhelezivaniya i demanganatsii* [The impact of aeration-degassing processes on the properties of groundwater and technologies for their biological oxidation, iron removal, and demanganization]. *Voda* ["Water" Magazine]. 2012. No. 7–8. Pp. 2–5. [In Russian]
6. V.E. Fattakhov, A.A. Danilov. *Rekonstruktsiya stantsii obezhelezivaniya vody* [Reconstruction of a water iron removal station]. *Santekhnika* ["Plumbing" Magazine]. 2025. No. 4. Pp. 30–33. [In Russian]
7. Yu.O. Bobylev. *Tekhnologiya vodoochistki. Aeromagnitnaya obrabotka vody* [Water purification technology. Aeromagnetic water treatment]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* ["Ecology and Industry of Russia" Magazine]. 2013. No. 11. Pp. 12–15. [In Russian]
8. Patent of the Russian Federation (RU) 2855938 C1. International Patent Classification (IPC): V01D 24/28 (2025.08). *Vertikal'no-radial'nyy reaktor-fil'tr* [Vertical-radial reactor-filter]. V.O. Govorov, O.B. Govorov, A.O. Govorova. No. 2025107586. Decl.: March 28, 2025. Publ.: February 5, 2026. Bull. No. 4. [In Russian]
9. V.O. Govorov, O.G. Primin. *K voprosu obosnovaniya bezreagentnogo obezhelezivaniya vody s ispol'zovaniem krupnogranel'nogo fil'truyushchego materiala* [On the justification of non-reagent water iron removal using coarse-granulated filter material]. *Aktual'nye problemy stroitel'noy otrasli i obrazovaniya: Sb. dokl. V Nats. nauch. konf.* [Current Issues in the Construction Industry and Education: Coll. vol. of the V National Scientific Conference]. December 16, 2024. Moscow. Izd-vo MISI-MGSU [Publishing House of the Moscow State University of Civil Engineering (MISI-MGSU Publishing House)]. 2025. Pp. 495–499. [In Russian]
10. M.N. Shevtsov. *Ekologicheskie problemy vodorazvaystvennogo kompleksa* [Environmental issues in the water management complex]. Khabarovsk. *Izd-vo TOGU* [Publishing House of Pacific State University]. 2016. 187 p. [In Russian]
11. A.M. Fominykh, E.L. Vojtov. *Doochistka biologicheskii ochishchennykh stochnykh vod fil'trovaniem na radial'nykh fil'trach* [Post-treatment of biologically treated wastewater by filtration on radial filters]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* ["Water Supply and Sanitary Engineering" Magazine]. 1977. No. 7. Pp. 8–10. [In Russian]
12. V.V. Dzyubo, L.I. Alferova. *Tekhnologicheskoe i konstruktivnoe oformlenie radial'nogo fil'trovaniya prirodnykh vod* [Technological and structural design of radial filtration of natural waters]. *Vestnik TGASU* [Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering]. 2013. No. 3. Pp. 329–344. [In Russian]