

ДИАГНОСТИКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ ВОДНЫХ ФИЛЬТРОВАЛЬНЫХ УСТАНОВОК С КВАРЦЕВЫМ ПЕСКОМ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА МОРФОЛОГИИ И ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ФИЛЬТРУЮЩЕГО МАТЕРИАЛА

А. А. Теплоухов¹✉, Д. В. Постников¹, А. Р. Закранцов¹, К. Е. Грязнов²

¹Омский государственный технический университет, Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

²ООО «ТКС», Россия, 644012, г. Омск, ул. Малиновского, 14, к. 2

✉ a.a.lektor@mail.ru

Статья посвящена исследованию работы кварцевого песка как фильтрующего материала для систем водоподготовки теплоснабжающих установок, а также разработке количественных критериев для прогнозирования срока его службы. Установлено, что в процессе эксплуатации фильтра кварцевый песок трансформируется в композитный материал с покрытием из оксидов алюминия и железа, которые образуются в результате адсорбции и осаждения ионов из исходной воды.

Методами растровой электронной микроскопии и энергодисперсионного анализа обнаружено, что при работе фильтра на исходной воде с содержанием $Al \approx 0,58$ мг/л и $Fe \approx 0,44$ мг/л происходит значительное изменение микрорельефа поверхности частиц песка с развитием микропор. Установлено, что достижение массовых долей алюминия и железа в кварцевом песке порядка 11,78 и 7,11 % является индикатором предельной выработки адсорбционной ёмкости фильтра и обоснованием для планирования его замены.

Предложенный подход позволяет осуществить переход от календарного регламента к прогностическому управлению сроком службы фильтра, а также обеспечивает предотвращение превышения предельно допустимой концентрации загрязнителей в сетевой воде и оптимизацию затрат на водоподготовку.

Ключевые слова: водоподготовка, кварцевый песок, фильтрация, адсорбция, растровая электронная микроскопия, энергодисперсионный анализ

Для цитирования: Теплоухов А. А., Постников Д. В., Закранцов А. Р., Грязнов К. Е. Диагностика и прогнозирование срока службы водных фильтровальных установок с кварцевым песком на основе анализа морфологии и элементного состава фильтрующего материала. *Омский научный вестник. Серия «Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение»*. 2026. Т. 10, № 1. С. 33–38. <https://doi.org/10.25206/2588-0373-2026-10-1-33-38>. EDN: JOUVHG.



© Теплоухов А. А., Постников Д. В., Закранцов А. Р., Грязнов К. Е., 2026.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

DIAGNOSTICS AND PREDICTIONS OF THE SERVICE LIFE OF WATER SILT WITH QUARTZ SAND BASED ON ANALYSIS OF MORPHOLOGY AND ELEMENT COMPOSITION OF THE FILTER MATERIAL

A. A. Teploukhov¹✉, D. V. Postnikov¹, A. R. Zakrantsov¹, K. E. Gryaznov²

¹Omsk State Technical University, Mira Ave., 11, 644050, Omsk, Russia

²LLC "TKS", Malinovskogo St., 14, bld. 2, 644012, Omsk, Russia

✉ a.a.lektor@mail.ru

The paper considers the investigation of quartz sand as a filter material for water treatment systems of heat supply installations and to the development of quantitative criteria for forecasting its service life.

The quartz sand filter is transformed into a composite material covered with aluminum and iron oxides, which are formed because of adsorption and deposition of ions from the source water during operation.

With the methods of electron microscopy and energy dispersion analysis it has been found that when a filter is operated on source water with an $Al \approx 0.58 \text{ mg/l}$ and $Fe \approx 0.44 \text{ mg/l}$, there is a significant change in the microlattice surface of the sand particles with the development of the micropore. The authors established that the achievement of mass proportions of aluminum and iron in quartz sand of the 11.78 and 7.11 % order is an indicator of the maximum capacity of the filter adsorption and a justification for planning its replacement.

The proposed approach enables a transition from a calendar-based maintenance schedule to a predictive management of the filter's service life, prevents the exceedance of permissible concentration limits of contaminants in network water and the optimization of costs for water preparation.

Keywords: water preparation, quartz sand, filtration, adsorption, raster electron microscopy, energy dispersion analysis

For citation: Teploukhov A. A., Postnikov D. V., Zakrantsov A. R., Gryaznov K. E. Diagnostics and predictions of the service life of water silt with quartz sand based on analysis of morphology and element composition of the filter material. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2026;10(1):33–38. <https://doi.org/10.25206/2588-0373-2026-10-1-33-38>. EDN: JOUVHG. (In Russ.).



© Teploukhov A. A., Postnikov D. V., Zakrantsov A. R., Gryaznov K. E., 2026.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Процессы подготовки и очистки воды имеют важное значение для обеспечения надежной и экономичной эксплуатации объектов теплоэнергетики (котельных установок, тепловых систем отопления и т. д.). Тепловые нагрузки требуют ограничения допустимой величины отложений на поверхностях теплообмена, в результате проявляются жесткие требования к химическому составу используемой воды в теплоэнергетическом оборудовании [1]. В системах теплоснабжения с открытым водоразбором, характерных для застройки старых районов городов и поселков и используемых для забора горячей воды из тепловой сети, требуется одновременное соблюдение технологической и санитарно-гигиенической надежности сетевой воды. В общем случае вода берется из естественных источников, содержащих в себе различные взвешенные вещества: соли, растворенные формы металлов и газов [2].

Действующие нормативные документы (СанПиН 2.1.4.1074–01, ГОСТ 31870–2012) регламентируют предельно допустимые концентрации вредных химических веществ в составе воды, в том числе железа и алюминия. Для алюминия предельно допустимая концентрация (ПДК) составляет 0,5 мг/л, а для железа — 0,3 мг/л. Повышенная концентрация алюминия в сетевой воде может приводить к ускоренной коррозии металлических теплоэнергетических конструкций [3]. Железо, растворенное в воде для нагревательных котлов, вызывает формирование слизи на стенках оборудования, недопустимо ускоряя образование слоя железистых отложений, что приводит к снижению производительности и коррозионному разрушению [4]. Повышенные концентрации железа в воде приводят к преждевременной коррозии и быстрому износу металлических труб водораспределения [5]. Более того, превышение ПДК указанных элементов оказывает негативное влияние на организм и здоровье населения при длительном воздействии [6].

Эффективность и надежность систем водоподготовки во многом определяется состоянием и режимом работы фильтровальных установок, расположенных на начальных ступенях технологической

схемы очистки воды. Песчано-кварцевая фильтрация — распространенный метод удаления примесных загрязнений на начальных этапах как для питьевой, так и для технической воды.

Кварцевый песок (SiO_2) является традиционно-применяемым материалом в качестве фильтрующего материала для водных фильтровальных установок. Данный материал представляет собой твердый износостойкий силикатный минерал молочно-белого или полупрозрачного цвета. Фильтрующие материалы из кварцевого песка устойчивы к сжатию и истиранию, проявляют химическую стойкость и обладают высокой очистительной способностью. Научные исследования свидетельствуют о выраженной адсорбционной способности кварцевого песка по отношению к ряду катионов и анионов, включая тяжелые металлы, железо и фосфаты [7]. Опыт эксплуатации песчаных фильтров свидетельствует о том, что конечный срок службы фильтрующего элемента определяется совокупным влиянием физического истирания, зарастания биопленками, а также накоплением оксидов металлов и изменением гранулометрического состава [8]. Рекомендуемая периодичность замены песчаного фильтра для котлов горячего водоснабжения составляет 3–6 месяцев.

В отечественной практике замены кварцевого песка в фильтрах для водоподготовки котельных установок часто связаны с периодами текущих и капитальных ремонтов. Досрочная закупка и хранение больших объемов загрузки экономически невыгодны, а отсутствие фильтрующего материала в момент выхода фильтра из строя может привести к подаче населению воды, не соответствующей нормам, или к нарушению технологических режимов производства. В этих условиях необходим переход от регламентного календарного подхода к прогнозному управлению сроком службы фильтра, основанному на объективных диагностических критериях.

Современные методы растровой электронной микроскопии (РЭМ) в сочетании с энергодисперсионным анализом (ЭДА) могут быть применены для исследования поверхности и элементного состава фильтрующих материалов.



Рис. 1. Установка ФОВ
Fig. 1. Installation of the water purification filter

Целью данной работы является определение эффективности кварцевого песка для использования в водных фильтрах и прогнозирование срока службы механических фильтров на его основе. В работе представлено исследование зависимости изменения морфологии и элементного состава кварцевого песка методами РЭМ и ЭДА, а также сопоставление этих изменений с динамикой содержания алюминия и железа в предочищенной воде в рамках методики установки критерия по срокам замены кварцевого наполнителя.

Материалы и методы

Кварцевый песок для исследования отобран из фильтра отчистки воды (ФОВ) действующей си-

стемы водоподготовки теплофикационной котельной Завода технического угля (г. Омск). Установка ФОВ представлена на рис. 1.

Высота фильтра составляет 4370 мм; диаметр — 3000 мм; высота фильтрующего слоя, состоящая из кварцевого песка, — 1000 мм; объем фильтрующего материала — 7,1 м³; средняя производительность фильтра — 70 м³/час. Данная установка в течение трех лет эксплуатировалась на предприятии для подпитки нагревательного котла (регламентированный срок службы кварцевого песка в фильтровальной установке — 3 года; соответственно, по истечению данного срока происходит его замена), а суммарный объем воды, прошедший через установку, составил 67 392 м³. Всего на предприятии работает не менее пяти таких водоочистительных установок.

В качестве фильтрующего материала используется фракционированный кварцевый песок (SiO₂) с диапазоном гранулометрических фракций 0,8–2,0 мм и средней плотностью — 2650 кг/м³. В ходе эксплуатации фильтра песчаная фракция один раз в сутки перемешивается с воздухом или потоком воды изнутри, что соответствует типичной практике эксплуатации песчаных фильтров водоочистки.

Исходная неочищенная вода, очищаемая установкой ФОВ, характеризовалась следующими типичными концентрациями анализируемых элементов: Al ≈ 0,58 мг/л, Fe ≈ 0,44 мг/л. Эти значения превышали требования СанПиН 2.1.4.1074–01 к сетевой воде для открытых систем теплоснабжения, устанавливающего ПДК алюминия в 0,5 мг/л и суммарного железа в 0,3 мг/л. Аналогичные уровни ПДК для алюминия и железа приводятся в рекомендациях ВОЗ и национальных руководствах ряда стран (0,05–0,2 мг/л для Al и 0,1–0,3 мг/л

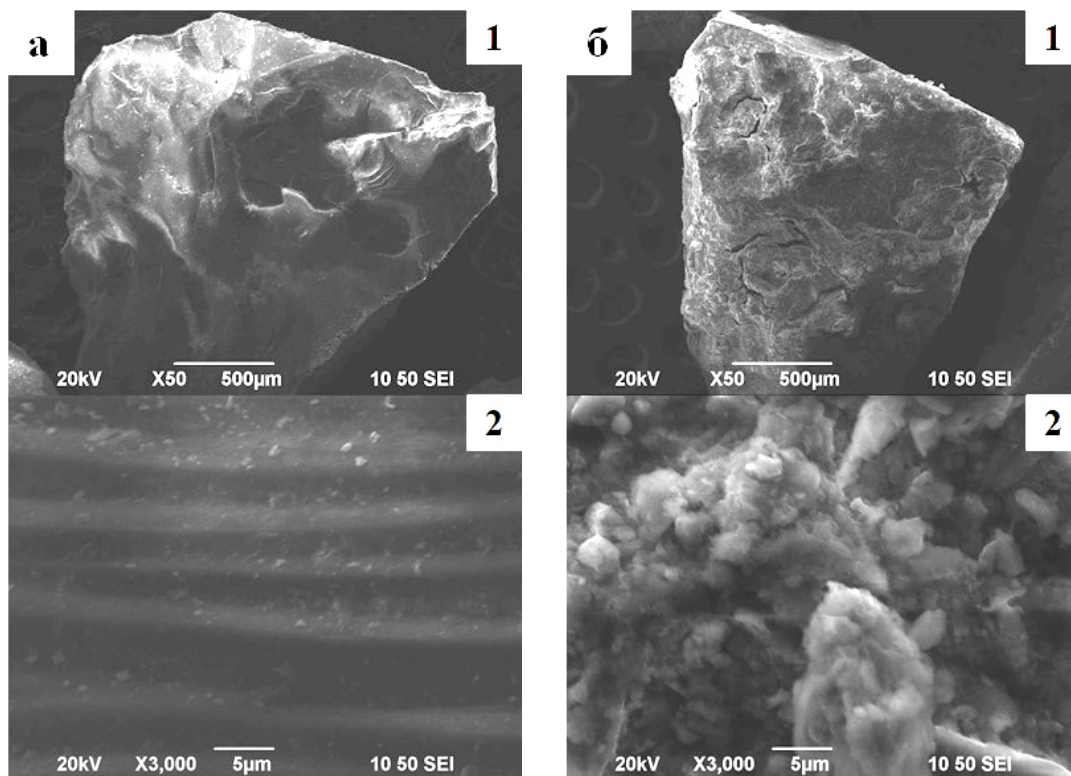


Рис. 2. Микрофотографии частиц кварцевого песка:
а — до эксплуатации; б — после эксплуатации при увеличении в: 1) 50 крат; 2) 3000 крат
Fig. 2. Microphotographs of quartz sand particles:
а — before operation; б — after operation at magnifications of: 1) 50 times; 2) 3000 times

Таблица 1. Элементный состав частиц песка, полученный методом ЭДА
Table 1. Elemental composition of sand particles obtained by EDX method

Элемент	Концентрация, масс. %	
	Исходный образец	Образец после эксплуатации
O	56,19	54,06
Mg	–	0,86
Al	–	11,78
Si	43,81	23,61
K	–	1,64
Ca	–	0,94
Fe	–	7,11
Итого	100,00	100,00

для Fe), что подчёркивает необходимость эффективной очистки. Анализ химического состава воды определялся стандартным фотометрическим методом в соответствии с действующим ГОСТ 18165–2014.

Для исследования морфологии кварцевого песка использовался растровый электронный микроскоп Jeol JSM-5700, позволяющий визуализировать микрорельеф поверхности.

Перед определением элементного состава проводилась пробоподготовка образцов песка: кварцевый песок в течение суток сушился при температуре 105 °С, а затем прокаливался в муфельной печи 4 ч при температуре 500 °С для удаления органических соединений из объекта исследования. Для определения элементного состава использовалась приставка к растровому электронному микроскопу JED-3000.

Обсуждение результатов

На рис. 2 представлены микрофотографии частиц кремниевого песка при различном увеличении до и после эксплуатации в фильтре.

Микрофотографии образцов песка до и после эксплуатации (см. рис. 2) демонстрируют существенное изменение микрорельефа пористой структуры поверхности частиц песка. Поверхность исходной частицы кварцевого песка отличается относительно гладкой поверхностью с характерным «сколом» для песчинок кварца и некоторым количеством микроуглублений. Морфология частиц после эксплуатации в фильтрующих элементах характеризуется развитой морфологией с множеством микропор. На поверхности частиц наблюдаются множественные агрегаты, что особенно заметно при 3000-кратном увеличении. Данные агрегаты предположительно соответствуют оксидам алюминия и железа [9].

В ряде работ описано, что тонкие слои наночастиц оксида железа на поверхности кварцевого песка приводят к заметному увеличению шероховатости и пористости поверхности, благодаря чему повышается способность песка удалять тяжелые металлы и фосфаты из воды [10]. В некоторых работах подчеркивается, что старые фильтры зачастую работают эффективнее новых за счет накопления слоев оксидов металлов на поверхности фильтрующих частиц [11]. Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что кварцевый песок, помещаемый в рассматриваемую фильтровальную установку, не является инертной системой, а по мере эксплуатации трансформируется в композитный материал с ядром из SiO₂ и покрытием в виде оксидов металлов, предположительно алюминия и железа [12].

В табл. 1 приведены результаты ЭДА анализа частиц песка до и после эксплуатации в установке ФОВ.

Для исходного образца суммарный элементный состав представлен преимущественно кислородом и кремнием ~54 и ~36 % соответственно. В образце после эксплуатации помимо кремния и кислорода наблюдаются существенные концентрации алюминия и железа, составляющие ~12 и ~7 % соответственно. Кроме того, наблюдается появление щелочноземельных элементов, таких как калий и кальций. Описанная динамика изменения элементного состава согласуется с предположением о формировании на поверхности песка слоёв оксидов железа и алюминия за счёт адсорбции соответствующих ионов из воды. Определено, что доля железа в элементном составе песка возрастает по мере эксплуатации фильтра, а увеличение толщины оксидного слоя коррелирует с возрастанием эффективности удаления целевого загрязнителя до определённого предела, после чего наступает насыщение и снижение эффективности [13].

Определено, что в состав очищенной воды входит алюминий и железо в концентрациях ~0,14 и ~0,11 мг/л соответственно, что удовлетворяет требованиям СанПиН 2.1.4.1074–01, но находится на пределе разрешенных значений. В ходе эксплуатации фильтра проводился периодический контроль элементного состава фильтрующего материала. Было выявлено, что концентрация загрязняющих веществ в кварцевом песке не изменялась (или изменялась незначительно) в течение последних 4 месяцев работы фильтра и составила ~12 % для алюминия и ~7 % для железа. Данные факторы свидетельствуют о том, что за время эксплуатации фильтр приблизился к экстремуму своей адсорбционной емкости по алюминию и железу соответственно. Фильтр находился на пределе своей очищающей способности, а фильтрующий материал требовал замены.

Адсорбция на поверхности кремниевых материалов, таких как SiO₂, характеризуется сложной нелинейной кинетикой, описываемой изотермами Ленгмюра и Фрейндлиха. Таким образом, при большом количестве загрязнений в воде (сорбата) и большом числе активных центров на кремнии скорость адсорбции высока и растёт до того момента, пока активные центры не заполнятся, после чего адсорбция становится равномерной [14]. При этом алюминий и железо на поверхности кварцевого песка увеличивают число активных центров, из-за чего возрастает фильтрующая способность фильтра. По мере накопления загрязнений поверхностный

слой из оксидов алюминия и железа становится толще. Следовательно, снижается число активных центров. С течением времени оксидная пленка на поверхности частиц становится настолько толстой, что препятствует протеканию воды через фильтрующий материал (из-за сужения межзерновых каналов). В результате, загрязнители начинают вымываться с поверхности фильтрующего материала, вызывая дополнительное загрязнение воды [15].

Кроме того, по результатам ЭДА определено, что по мере эксплуатации снижается содержание кремния, которое вызвано его вымыванием из частиц SiO_2 . Таким образом, повышается количество микропор на поверхности. Данный фактор свидетельствует об увеличении числа активных центров в результате повышения площади поверхности и, как следствие, повышению области двойного слоя, наличие которого обуславливает адсорбционную способность SiO_2 по катионам металлов, из-за чего повышается эффективность кварцевого песка как фильтрующего материала [16].

Определено, что методы РЭМ совместно с ЭДА могут выступать как высокоточные методы для анализа и прогнозирования срока службы фильтровального материала водного фильтра на основе кварцевого песка. Полученные в работе концентрации алюминия (~12 %) и железа (~7 %) в составе кварцевого песка предполагается использовать в качестве критерия его максимальной выработки как фильтрующего материала.

Заключение

В ходе исследования проведен комплексный анализ работы фильтровальной установки ФОВ на основе кварцевого песка. Показано, что при исходных концентрациях $\text{Al} \approx 0,58$ мг/л и $\text{Fe} \approx 0,44$ мг/л фильтр обеспечивает снижение содержания алюминия и железа до ~0,14 и ~0,11 мг/л, что соответствует требованиям СанПиН 2.1.4.1074–01, рекомендациям ВОЗ и международным нормативам по качеству питьевой и сетевой воды.

Методами растровой электронной микроскопии и энергодисперсионного анализа определено, что в процессе эксплуатации кварцевый песок перестает быть инертным механическим очистителем. На его поверхности формируются агрегаты оксидов алюминия и железа, увеличиваются пористость и развитость микрорельефа, что обеспечивает значительный вклад адсорбционного механизма в удаление растворённых форм Al и Fe .

Установлено, что в момент, когда показатели качества предпочищенной воды по алюминию и железу на выходе ФОВ приближаются к предельным значениям по СанПиН 2.1.4.1074–01, массовые доли алюминия и железа в песке достигают порядка 11,78 и 7,11 % от общей массы элементов. Это позволяет интерпретировать указанные значения как порог насыщения адсорбента по Al и Fe .

Выявленный характер изменения состояния песка и эффективности очистки воды согласуется с нелинейными кинетическими моделями адсорбции для кремниевых материалов (изотермами Ленгмюра и Фрейндлиха), согласно которым на ранних стадиях эксплуатации наблюдается быстрый рост адсорбционной ёмкости, а по мере заполнения активных центров — её насыщение и последующее снижение производительности.

Предложен количественный критерий прогноза срока службы кварцевой загрузки механического фильтра: достижение массовых долей алюминия

и железа в кварцевом песке порядка ~12 и ~8 % следует рассматривать как критерий предельной выработки адсорбционной ёмкости фильтра по Al и Fe , а также как основание для планирования замены загрузки в ближайший ремонтный период. Указанный подход обеспечивает возможность заранее предотвращать превышение ПДК алюминия и железа в сетевой воде, позволяет оптимизировать затраты на закупку и замену загрузок, исключить излишнее возможное применение коагулянтов, повысить надёжность работы систем теплоснабжения и обеспечить устойчивое соблюдение санитарных нормативов по содержанию алюминия и железа.

Список источников / References

1. Бондаренко С. И., Лукина Г. В., Самаркина Е. В. Использование отходов слюды для очистки воды на объектах теплоэнергетики // Вестник ИрГЦХА. 2012. № 51. С. 104–111. EDN: OYZOGL.
2. Bondarenko S. I., Lukina G. V., Samarkina E. V. Application of mica waste for water treatment at thermal power facilities. *Vestnik IrGSHA*. 2012;51:104–111. EDN: OYZOGL. (In Russ.).
3. Maiyo J. K., Dasika S., Jafvert C. T. Slow sand filters for the 21st century: A review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2023;20(2):1019. <https://doi.org/10.3390/ijerph20021019>. EDN: DRVZOT.
4. Новиков Ю. В., Тулакин А. В., Цыплакова Г. В. [и др.]. Влияние продуктов коррозии и обрастания трубопроводов на качество питьевой воды // Гигиена и санитария. 1998. № 2. С. 10–13.
5. Novikov Yu. V., Tulakin A. V., Tsyplakova G. V. [et al.]. Influence of corrosion products and pipe fouling on drinking water quality. *Hygiene and Sanitation*. 1998;2:10–13. (In Russ.).
6. Сколупович Ю. Л., Войтов Е. Л., Цыба А. А. [и др.]. Технология очистки и утилизации поверхностных сточных вод и осадков // Academia. Архитектура и строительство. 2020. № 1. С. 131–137. <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2020-1-131-137>. EDN: RXPUNK.
7. Skolubovich Yu. L., Voitov E. L., Tsyba A. A. [et al.]. Technology for cleaning and disposal surface waste water and sediments. *Academia. Architecture and Construction*. 2020;1: 131–137. <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2020-1-131-137>. EDN: RXPUNK. (In Russ.).
8. Tripathi V. K., Rajput T. B. S., Patel N. Performance of different filter combinations with surface and subsurface drip irrigation systems for utilizing municipal wastewater. *Irrigation Science*. 2014;32(5):379–391. <https://doi.org/10.1007/s00271-014-0421-z>. EDN: LFISEY.
9. Высокый С. П., Степаненко Т. И. Проблемы загрязнения питьевой воды соединениями алюминия, железа и меди // Вести Автомобильно-дорожного института. 2016. № 1. С. 96–104. EDN: WYBGDX.
10. Vysotskiy S. P., Stepanenko T. I. Problems of drinking water pollution by aluminum, iron and copper compounds. *Bulletin of the Automobile and Road Institute*. 2016;1:96–104. EDN: WYBGDX. (In Russ.).
11. Benjamin M., Sletten R., Bailey R. [et al.]. Sorption and filtration of metals using iron-oxide-coated sand. *Water Research*. 1996;30(11):2609–2620. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(96\)00161-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(96)00161-3).
12. Liu L., Fua Y., Weib Q. [et al.]. Applying bio-slow sand filtration for water treatment. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2019;28(4). <https://doi.org/10.15244/pjoes/90588>.
13. Велюго Е. С., Ермак А. А., Ющенко В. Д. Гидрохимические модели удаления железа и марганца на кварцевом песке и сорбенте АС // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия Ф. Строительство. Прикладные науки. 2025. № 2. С. 23–30. <https://doi.org/10.52928/2070-1683-2025-41-2-23-30>. EDN: HDXXMC.

Velyugo E. S., Yermak A. A., Yushchenko V. D. Hydrochemical models of iron and manganese removal on quartz sand and sorbent AC. *Vestnik of Polotsk State University. Part F. Constructions. Applied Sciences*. 2025;2:23–30. <https://doi.org/10.52928/2070-1683-2025-41-2-23-30>. EDN: HDXXMC. (In Russ.).

10. Farahbakhsh J., Najafi M., Golgoli M. [et al.]. Microplastics and dye removal from textile wastewater using MIL-53 (Fe) metal-organic framework-based ultrafiltration membranes. *Chemosphere*. 2024;364:143–170. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143170>.

11. Ayoub G. M., Koopman B., Pandya N. Iron and aluminum hydroxy (oxide) coated filter media for low-concentration phosphorus removal. *Water Environment Research*. 2001;73(4):478–485. <https://doi.org/10.2175/106143001X139533>.

12. Zinicovscaia I., Yushin N., Humelnicu D. [et al.]. Adsorption capacity of silica SBA-15 and titanosilicate ETS-10 toward indium ions. *Materials*. 2023;16(8):3201. <https://doi.org/10.3390/ma16083201>.

13. Khidani M., Zarrabi M., Foroughi M. Urban runoff treatment using nano-sized iron oxide coated sand with and without magnetic field applying. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*. 2013;11(1):43. <https://doi.org/10.1186/2052-336X-11-43>. EDN: FIKBDS.

14. Hraiech I., Zallama B., Belkhiria S. [et al.]. Experimental characterization of silica gel adsorption and desorption isotherms under varying temperature and relative humidity in a fixed bed reactor. *Scientific Reports*. 2025;15(1):29041. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-14677-7>. EDN: SKQHLLG.

15. McNeill L. S., Edwards M. Soluble arsenic removal at water treatment plants. *Journal American Water Works Association*. 1995;87(4):105–113. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1995.tb06374.x>.

16. Luo C., Yu Y., Tang Y. [et al.]. Enhanced retention of small-sized microplastics by iron-containing sand filtration system: Effectiveness and mechanisms. *Journal of Hazardous Materials*. 2025;489:137–678. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.137678>. EDN: YECAYN.

Вклад авторов:

А. А. Теплоухов. Постановка целей и задач исследования, анализ состояния вопроса.

Д. В. Постников. Проведение обзора, формулирование выводов.

А. Р. Закранцов. Разработка системы и анализ результатов, подготовка текста статьи.

К. Е. Грязнов. Поиск способа интеграции разработанной системы в существующую архитектуру, подготовка текста статьи.

Authors' contribution:

Andrey A. Teploukhov. Setting the aims and objectives of the study, analysis of the problem.

Denis V. Postnikov. Conducting a review, formulating conclusions.

Alexandr R. Zakrantsov. Development of the system and analysis of results, preparing the text of the article.

Kirill E. Gryaznov. Finding a way to integrate the developed system into the existing architecture, preparing the text of the article.

Информация об авторах:

ТЕПЛОУХОВ Андрей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Физика» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 6836-1254

AuthorID (РИНЦ): 859681

AuthorID (SCOPUS): 57189517666

ORCID: 0000-0002-5649-2871

e-mail: a.a.lektor@mail.ru

ПОСТНИКОВ Денис Васильевич, кандидат физико-математических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Физика» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 7241-2418

AuthorID (РИНЦ): 684679

AuthorID (SCOPUS): 41762428800

ORCID: 0000-0002-4570-9721

e-mail: dvpostnikov@omgtu.ru

ЗАКРАНЦОВ Александр Романович, ассистент кафедры «Физика» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 6740-3422

AuthorID (РИНЦ): 1285352

ORCID: 0009-0007-2653-2637

e-mail: zakrantsovar@mail.ru

ГРЯЗНОВ Кирил Евгеньевич, главный инженер ООО «ТКС», г. Омск.

e-mail: kg82@bk.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Статья поступила в редакцию 09.02.2026; одобрена после рецензирования 04.03.2026; принята к публикации 17.03.2026.

ТЕПЛОУХОВ Andrey Anatolyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Physics Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 6836-1254

AuthorID (RSCI): 859681

AuthorID (SCOPUS): 57189517666

ORCID: 0000-0002-5649-2871

e-mail: a.a.lektor@mail.ru

POSTNIKOV Denis Vasilyevich, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Physics Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 7241-2418

AuthorID (RSCI): 684679

AuthorID (SCOPUS): 41762428800

ORCID: 0000-0002-4570-9721

e-mail: dvpostnikov@omgtu.ru

ZAKRANTSOV Alexandr Romanovich, Assistant of the Physics Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 6740-3422

AuthorID (RSCI): 1285352

ORCID: 0009-0007-2653-2637

e-mail: zakrantsovar@mail.ru

GRYAZNOV Kirill Evgenievich, Chief Engineer of the LLC "TKS", Omsk.

e-mail: kg82@bk.ru

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The authors have read and approved the final manuscript.

The article was submitted 09.02.2026; approved after reviewing 04.03.2026; accepted for publication 17.03.2026.