



УДК 628.162

И. В. СУВОРОВ, аспирант кафедры водопользования и экологии

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ЗАГРУЗКИ ДЛЯ ОЧИСТКИ ПРОМЫВНЫХ ВОД СТАНЦИЙ ОБЕЗЖЕЛЕЗИВАНИЯ

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.

Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.

Тел.: (812) 575-05-34, эл. почта: rector@spbgasu.ru

Ключевые слова: промывные воды, станции обезжелезивания, многокомпонентная загрузка, железо, марганец, фильтрация, перепад давления, водоподготовка.

В статье представлены результаты оценки эффективности многокомпонентной загрузки (МКЗ) при очистке промывных вод станций обезжелезивания подземных вод. Актуальность работы обусловлена образованием значительных объемов промывных вод при эксплуатации станций обезжелезивания и необходимостью разработки локальных ресурсосберегающих технологий их очистки с одновременным вовлечением отходов водоподготовки во вторичное использование.

Введение

Станции обезжелезивания подземных вод широко применяются в системах хозяйственно-питьевого водоснабжения Республики Беларусь и других стран СНГ. Наиболее распространенной технологической схемой является упрощенная аэрация с последующим фильтрованием на напорных фильтрах с зернистыми нагрузками. Вместе с тем эксплуатация таких сооружений сопровождается образованием значительных объемов промывных вод, содержащих оксиды и гидроксиды железа, соединения марганца, взвешенные минеральные и органические примеси. Объем промывных вод может достигать 10–15 % производительности станции [1–3], что создает дополнительную нагрузку на системы водоотведения и усложняет эксплуатацию объектов водоподготовки.

В работах автора и соавторов рассмотрены современные безреагентные и реагентные методы удаления железа из воды, а также конструктивные и эксплуатационные особенности станций обезжелезивания [1, 2]. Отдельный цикл исследований был посвящен изучению торфа, шлама водоподготовки и совокупности природных и техногенных материалов как потенциальных компонентов фильтрующих загрузок [4–7]. Возможности использования торфа и шлама водоподготовки в технологиях очистки воды, а также вопросы утилизации шламов рассмотрены в работах [3, 6]. Однако для практического внедрения принципиально важно оценить не только свойства отдельных компонентов, но и эффективность их совместного применения в составе многокомпонентной загрузки, работающей как самостоятельная фильтрующая система в условиях, приближенных к реальной эксплуатации.

Результаты предварительных исследований показали, что среди рассмотренных вариантов наибольший интерес представляет МКЗ, включающая природный органический компонент, техногенный железосодержащий компонент



и щелочной компонент. Эффективность такой загрузки обусловлена сочетанием развитой поверхности, способности к сорбционному закреплению гидролизированных железосодержащих фаз и приемлемых гидравлических характеристик фильтрующего слоя.

В связи с этим целью настоящей работы являлась оценка эффективности применения многокомпонентной загрузки для очистки промывных вод станций обезжелезивания по показателям удаления железа, марганца и перепада давления на фильтре. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: проведены сравнительные опытно-промышленные испытания многокомпонентной и стандартных загрузок; оценена динамика изменения концентраций железа и марганца в фильтрате; определено изменение перепада давления в течение фильтроцикла; установлено влияние объема загрузки на эффективность очистки и гидравлическую устойчивость фильтра.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования являлись промывные воды станций обезжелезивания подземных вод [1, 2]. В сравнительной серии опытно-промышленных испытаний использовали реальные промывные воды, образующиеся после регенерации фильтров станции обезжелезивания. Исходные концентрации загрязняющих компонентов составляли: общее железо – 8,2 мг/л, марганец – 0,2 мг/л. Отбор проб фильтрата осуществляли через каждые 30 мин в течение 6 ч. В качестве контролируемых показателей принимали концентрации общего железа, марганца и перепад давления на фильтре Δp .

Испытания проводили на двух параллельных опытных модулях, каждый из которых включал по две идентичные фильтровальные колонны с одинаковыми геометрическими параметрами и дренажно-распределительными системами. Сравнительные испытания выполняли в два этапа, при этом на каждом этапе одновременно работали две колонны. Для всех исследуемых вариантов задавали одинаковый гидравлический режим: диаметр колонны – 0,5 м, высота фильтрующего слоя – 0,9 м, скорость фильтрации – 10 м/ч.

В работе исследовали четыре варианта загрузок. В качестве основного объекта рассматривали МКЗ, состав которой был сформирован на основании предварительных исследований торфа, шлама водоподготовки и совокупности природных и техногенных материалов [4–6]. Для сравнительной оценки использовали также двухслойную загрузку «антрацит + кварцевый песок + гравий», однородную загрузку «кварцевый песок + гравий» и многослойную загрузку «гидроантрацит + MnO_2 + кварцевый песок + гравий».

Дополнительно была выполнена серия испытаний, направленная на оценку влияния объема МКЗ на эффективность очистки и гидравлические характеристики фильтра. Объем слоя определяли как геометрический объем загрузки, рассчитываемый по диаметру колонны и высоте слоя. В опытах рассматривали объемы: 20, 40, 55, 70, 90 и 115 л, соответствующие высоте слоя: 0,10; 0,20; 0,28; 0,36; 0,46 и 0,59 м. В данной серии испытаний использовали промывную воду с исходными концентрациями железа около 1,5 мг/л и марганца около 0,4 мг/л.

Результаты и обсуждение

1. Сравнительная оценка работы МКЗ и стандартных загрузок

Опытно-промышленные испытания показали, что МКЗ является наиболее устойчивым вариантом среди исследованных систем по совокупности

показателей качества очистки и гидравлической устойчивости. При одинаковом режиме фильтрации и использовании промывной воды МКЗ обеспечивала более стабильную работу по железу и марганцу по сравнению с двухслойной загрузкой «антрацит + кварцевый песок + гравий», однородной загрузкой «кварцевый песок + гравий» и многослойной загрузкой «гидроантрацит + MnO_2 + кварцевый песок + гравий».

Высокая эффективность МКЗ по отношению к железу обусловлена формами его нахождения в промывных водах. В исследованных условиях удаление железа связано, прежде всего, с гидролизом Fe(III) , образованием малорастворимых оксигидроксидных фаз, их закреплением на поверхности частиц загрузки и механическим удержанием в межзерновом пространстве слоя. В связи с этим механизм извлечения железа на МКЗ целесообразно характеризовать как гидролитико-сорбционно-фильтрационный [5, 7, 8].

Удаление марганца протекает сложнее. В исследованных условиях основной вклад в снижение концентрации Mn^{2+} вносили сорбционно-ионообменные взаимодействия [7–10], тогда как вклад окислительных превращений был ограниченным. Именно поэтому марганец следует рассматривать как лимитирующий показатель процесса, определяющий продолжительность эффективной работы фильтра.

Для сравнительной оценки были построены три графика: динамика изменения концентрации общего железа, динамика изменения концентрации марганца и изменение перепада давления Δp при фильтрации на четырех вариантах загрузок.

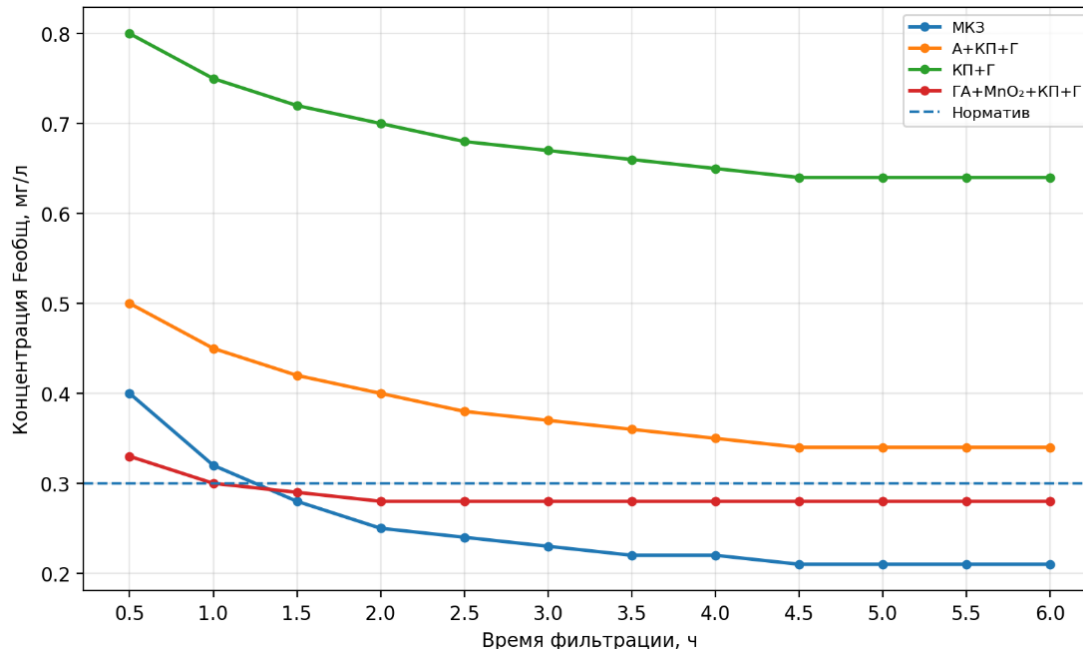


Рис. 1. Динамика изменения концентрации общего железа в фильтрате при использовании МКЗ и стандартных загрузок

Как видно из рис. 1, через 0,5 ч после начала фильтрации концентрация $\text{Fe}_{\text{общ}}$ в фильтрате составила 0,40 мг/л для МКЗ, 0,50 мг/л для загрузки А+КП+Г,



0,80 мг/л для КП+Г и 0,33 мг/л для загрузки ГА+MnO₂+КП+Г. Уже через 1,5–2,0 ч МКЗ обеспечивала снижение концентрации Fe_{общ} до 0,28–0,25 мг/л, то есть до нормативного уровня не более 0,3 мг/л, после чего показатель стабилизировался в интервале 0,21–0,25 мг/л до конца опыта. Для загрузки ГА+MnO₂+КП+Г значения Fe_{общ} находились в пределах 0,33–0,28 мг/л, то есть норматив достигался, но с меньшим запасом. Двухслойная загрузка А+КП+Г снижала Fe_{общ} до 0,34–0,50 мг/л, а однородная загрузка КП+Г – до 0,64–0,80 мг/л, что не обеспечивало нормативного качества очищенной воды по железу. Таким образом, МКЗ показала наилучший результат по устойчивости удаления железа.

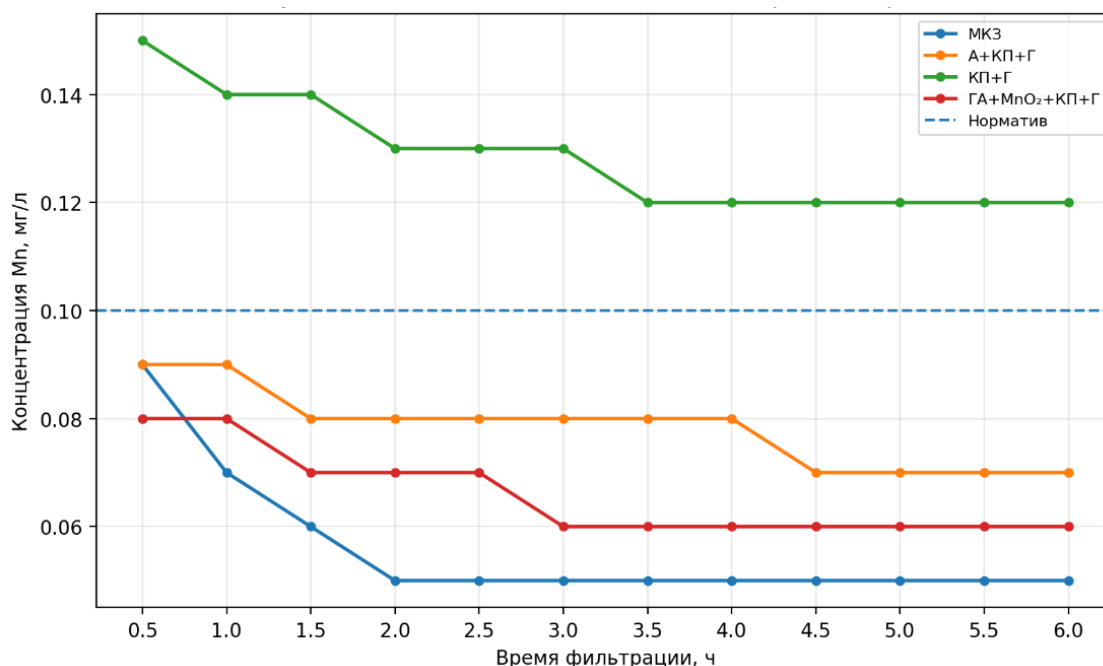


Рис. 2. Динамика изменения концентрации марганца в фильтрате при использовании МКЗ и стандартных загрузок

Как видно из рис. 2, изменение концентрации марганца в фильтрате носило менее контрастный характер, чем по железу. Через 0,5 ч концентрация Mn составила 0,09 мг/л для МКЗ, 0,09 мг/л для А+КП+Г, 0,15 мг/л для КП+Г и 0,08 мг/л для ГА+MnO₂+КП+Г. В дальнейшем МКЗ обеспечивала снижение содержания марганца до 0,05–0,07 мг/л и сохраняла этот уровень на протяжении всего опыта. Загрузка ГА+MnO₂+КП+Г демонстрировала сопоставимые значения – 0,06–0,08 мг/л. Для двухслойной загрузки А+КП+Г концентрация марганца составляла 0,07–0,09 мг/л, а для КП+Г – 0,12–0,15 мг/л. Следовательно, по марганцу наиболее эффективными вариантами оказались МКЗ и ГА+MnO₂+КП+Г, тогда как кварцевый песок без активных компонентов показал наихудшие результаты.

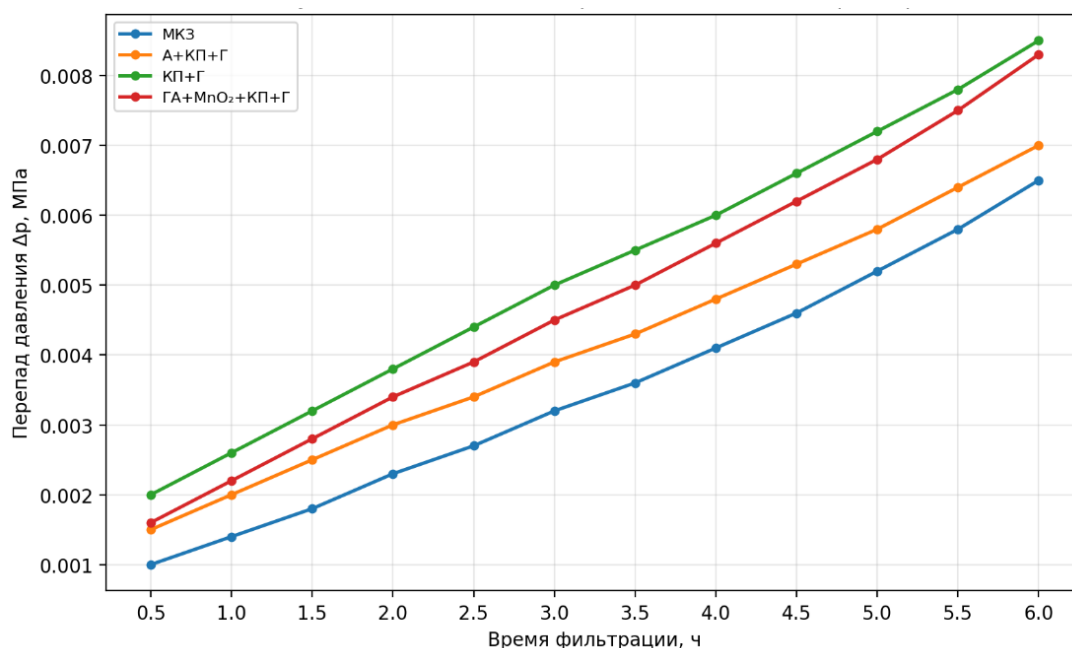


Рис. 3. Изменение перепада давления на фильтре при использовании МКЗ и стандартных нагрузок

Как видно из рис. 3, перепад давления Δp увеличивался для всех исследованных вариантов нагрузок по мере накопления осадка в межзерновом пространстве фильтрующего слоя. Через 0,5 ч величина Δp составляла 0,0010 МПа для МКЗ, 0,0015 МПа для А+КП+Г, 0,0020 МПа для КП+Г и 0,0016 МПа для ГА+MnO₂+КП+Г. К концу 6-часового цикла Δp увеличивался соответственно до 0,0065; 0,0070; 0,0085 и 0,0083 МПа. Наименьший рост гидравлического сопротивления наблюдался у МКЗ, тогда как наибольший – у загрузки КП+Г и многослойной загрузки ГА+MnO₂+КП+Г. Следовательно, МКЗ не только обеспечивала лучшее качество очистки по железу и высокую эффективность по марганцу, но и характеризовалась наиболее благоприятной гидравлической устойчивостью в пределах рассматриваемого фильтроцикла.

2. Влияние объема загрузки на показатели очистки и гидравлическую устойчивость

Результаты опытно-промышленных испытаний при различных объемах фильтрующего слоя подтвердили более высокую эффективность многокомпонентной загрузки по сравнению со стандартной многослойной загрузкой (ГА+MnO₂+КП+Г).

По железу во всем исследованном диапазоне объемов МКЗ обеспечивала практически полное удаление загрязнения: концентрация Fe в фильтрате не превышала 0,02 мг/л, что существенно ниже нормативного значения 0,3 мг/л. Проскока железа в пределах длительности испытаний не наблюдалось. В то же время стандартная многослойная загрузка снижала концентрацию Fe лишь до 0,19–0,25 мг/л, то есть обеспечивала соответствие нормативу по железу с меньшим эксплуатационным запасом.

Для марганца выявлена выраженная зависимость эффективности от объема слоя. При минимальном объеме МКЗ 20 л концентрация Mn в фильтрате



составляла около 0,12 мг/л, что превышало нормативное значение 0,1 мг/л. При увеличении объема до 40–55 л наблюдалось снижение концентрации до 0,05–0,07 мг/л, а при 70–115 л она стабилизировалась на уровне 0,03–0,04 мг/л. Таким образом, нормативное требование по марганцу обеспечивалось, начиная с объема 55 л. Время до «проскока» по марганцу возрастало от 2,5 ч при объеме 20 л до 10–11 ч при объемах 90–115 л, что указывает на прямую зависимость ресурса фильтра от объема загрузки. В отличие от МКЗ, стандартная многослойная загрузка снижала концентрацию Mn только до 0,13–0,18 мг/л и не обеспечивала нормативных требований даже при максимальном объеме слоя.

По гидравлическому сопротивлению различия между МКЗ и стандартной загрузкой были менее выраженными. Для МКЗ перепад давления Δp возрастал от 0,003–0,004 МПа при объемах 20–55 л до 0,008 МПа при объеме 115 л. Для стандартной многослойной загрузки Δp составлял 0,003–0,005 МПа. Таким образом, при несколько меньших гидравлических потерях стандартная загрузка уступала МКЗ по эффективности удаления железа и особенно марганца.

С инженерной точки зрения рациональным является диапазон объемов 55–90 л, при котором обеспечивается соответствие нормативным требованиям по Fe и Mn при умеренном росте перепада давления Δp . Применение стандартной многослойной загрузки в рассматриваемой серии не обеспечило норматив по марганцу, что ограничивает ее использование при повышенных исходных концентрациях Mn.

Таблица 1

Результаты опытно-промышленных испытаний при различных объемах МКЗ и стандартной многослойной загрузки

Объем загрузки, л	Высота слоя, м	Fe, мг/л		Mn, мг/л		Δp , МПа		Время до «проскока» Fe, ч		Время до «проскока» Mn, ч
		МКЗ	СЗ	МКЗ	СЗ	МКЗ	СЗ	МКЗ	СЗ	МКЗ
20	0,10	0,02	0,25	0,12	0,18	0,003	0,003	>11		2,5
40	0,20	0,01	0,23	0,07	0,17	0,004	0,003	>11		4,0
55	0,28	0,01	0,22	0,05	0,16	0,004	0,004	>11		6,0
70	0,36	0,01	0,21	0,04	0,15	0,005	0,004	>11		8,0
90	0,46	0,01	0,20	0,04	0,14	0,006	0,005	>11		10,0
115	0,59	0,01	0,19	0,03	0,13	0,008	0,005	>11		11,0

Примечание. МКЗ – многокомпонентная загрузка; СЗ – стандартная многослойная загрузка; Δp – перепад давления на фильтре; знак >11 означает, что проскок по железу в пределах продолжительности опыта не наблюдался для рассматриваемых вариантов загрузки.

Практическое значение результатов

Практическое значение полученных результатов состоит в подтверждении возможности применения многокомпонентной загрузки в качестве рабочего фильтрующего материала для локальной очистки промывных вод станций обезжелезивания. Установлено, что МКЗ обеспечивает высокую эффективность удаления железа, устойчивую работу по марганцу и приемлемые гидравлические



характеристики, что позволяет рассматривать ее как перспективную загрузку для включения в состав блочно-модульных установок водоподготовки.

В отличие от ранее опубликованных работ, посвященных исследованию отдельных компонентов загрузки – торфа, шлама водоподготовки и других природных и техногенных материалов [4–9], в настоящей статье дана оценка эффективности многокомпонентной системы в целом в условиях опытно-промышленных испытаний. Это позволяет перейти от обоснования выбора компонентов к практической оценке работоспособности сформированной загрузки в реальном технологическом режиме.

Дополнительная практическая значимость результатов связана с возможностью вовлечения шлама водоподготовки во вторичное использование. Такой подход соответствует принципам ресурсосбережения и позволяет рассматривать разработанную технологию не только как средство очистки промывных вод, но и как одно из направлений экологически безопасного обращения с отходами водоподготовки [3, 6].

Выводы

1. В опытно-промышленных испытаниях на реальных промывных водах станции обезжелезивания при исходных концентрациях общего железа – 8,2 мг/л, марганца – 0,2 мг/л, установлено, что многокомпонентная загрузка обеспечивает более устойчивую работу по сравнению со стандартными зернистыми загрузками по совокупности показателей качества очистки и гидравлической устойчивости.

2. Показано, что удаление железа на многокомпонентной загрузке протекает по гидролитико-сорбционно-фильтрационному механизму и связано с удержанием гидролизированных форм Fe(III) на поверхности частиц и в поровом пространстве фильтрующего слоя.

3. Установлено, что лимитирующим показателем процесса является марганец, по которому в наибольшей степени оценивается продолжительность эффективной работы фильтра.

4. При увеличении объема многокомпонентной загрузки от 20 до 115 л концентрация железа в фильтрате снижается с 0,02 до 0,01 мг/л, концентрация марганца – с 0,12 до 0,03 мг/л, а время до «проскока» по марганцу возрастает с 2,5 до 11,0 ч.

5. Увеличение объема загрузки сопровождается ростом перепада давления от 0,003 до 0,008 МПа, что указывает на необходимость учета соотношения между ресурсом фильтра и гидравлическим сопротивлением при выборе параметров фильтрующего слоя.

6. Рациональным диапазоном объема многокомпонентной загрузки для блочно-модульных установок водоподготовки является 55–90 л, что соответствует высоте слоя 0,28–0,46 м и обеспечивает наиболее благоприятное сочетание качества очистки и гидравлической устойчивости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Суворов, И. В. Современные безреагентные и реагентные методы удаления железа из воды / И. В. Суворов, Д. В. Ульрих // Современные технологии в инженерных системах и городском хозяйстве : сборник материалов Национальной (всероссийской) научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 18–22 марта 2024 года. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2024. – С. 251–262. – EDN GIUGUE.



2. Суворов, И. В. Особенности устройства и эксплуатации станций обезжелезивания воды / И. В. Суворов, Д. В. Ульрих // Современные технологии в инженерных системах и городском хозяйстве : сборник материалов LXXVII Национальной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Актуальные проблемы современного строительства», Санкт-Петербург, 15–18 октября 2024 года. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2025. – С. 17–25.

3. Experimental study for sand filter backwash water management: low-cost treatment for recycling and residual sludge utilization for radium removal / M. Shafiquzzaman, S. S. AlSaleem, H. Haider [et al.] // Water. – 2021. – Vol. 13, No 20. – Art. 2799. – DOI 10.3390/w13202799.

4. Торф в очистке природных вод. Сравнительный анализ фильтрационных свойств различных типов торфа / И. В. Суворов, Д. В. Ульрих, Т. М. Лонзингер, В. В. Шабалин // Инновации и инвестиции. – 2025. – № 7. – С. 507–511.

5. Комплексная характеристика шлама водоподготовки : химический состав, морфология и фильтрационные свойства / И. В. Суворов, Д. В. Ульрих, Т. М. Лонзингер, В. В. Шабалин // Инновации и инвестиции. – 2025. – № 8. – С. 694–698.

6. Sustainable utilization of water treatment residue as a porous geopolymer for iron and manganese removals from groundwater / P. K. Pachana, U. Rattanasak, K. Nuithitikul // Journal of environmental management. – 2022. – Vol. 302. – Art. 114036. – DOI 10.1016/j.jenvman.2021.114036.

7. Propolsky, D. Iron and manganese removal from groundwater: comprehensive review of filter media performance and pathways to polyfunctional applications / D. Propolsky, V. Romanovski // Environmental science : Water research & technology. – 2025. – DOI 10.1039/D5EW00751H.

8. Efficient chemical and microbial removal of iron and manganese in a rapid sand filter and impact of regular backwash / S. Haukelidsaeter, A. S Boersma, L. Piso [et al.] // Applied geochemistry. – 2024. – Vol. 162 (2). – Art. 105904. – DOI 10.1016/j.apgeochem.2024.105904.

9. Start-up of bench-scale biofilters for manganese removal under tropical conditions: a comparative study using virgin pumice, silica sand, and anthracite filter media / J. A. Araya-Obando, L. C. Rietveld, A. Quesada-González [et al.] // Environmental science : water research & technology. – 2021. – Vol. 7. – P. 1504–1515. – DOI 10.1039/D1EW00093D.

10. Improvement of removal rates for Iron and manganese in groundwater using dual-media filters filled with manganese-oxide-coated sand and ceramic in Nepal / A. M. Shrestha, S. Kazama, B. B. Sawangjang, S. Takizawa // Water. – 2024. – Vol. 16, No. 17. – Art. 2450. – DOI 10.3390/w16172450.

SUVOROV Ilya Vitalievich, postgraduate student of the chair of water use and ecology

EFFICIENCY OF MULTICOMPONENT FILTER MEDIA FOR TREATING BACKWASH WATER FROM IRON-REMOVAL PLANTS

St Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering.

4, 2nd Krasnoarmeiskaya St., St Petersburg, 190005, Russia.

Tel.: (812) 575-05-34, e-mail: rector@spbgasu.ru

Key words: backwash water, iron removal plants, multicomponent filter media, iron, manganese, filtration, pressure drop, water treatment.



The paper presents the results of assessing the efficiency of a multicomponent filter media (MFM) for the treatment of backwash water generated at groundwater iron-removal plants. The relevance of the study is determined by the formation of significant volumes of backwash water during the operation of iron-removal facilities and by the need to develop local resource-saving treatment technologies that also enable the reuse of water treatment waste.

REFERENCES

1. Suvorov I. V., Ulrikh D. V. Sovremennye bezreagentnye i reagentnye metody udaleniya zheleza iz vody [Modern non-reagent and reagent methods of iron removal from water]. Sovremennye tekhnologii v inzhenernykh sistemakh i gorodskom khozyaystve [Modern Technologies in Engineering Systems and Urban Utilities]: sbornik materialov Natsionalnoy (vserossiyskoy) nauchno-prakticheskoy konferentsii, Saint Petersburg, March 18–22, 2024. Saint Petersburg, Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy arkhitekturno-stroitelnyy universitet, 2024, P. 251–262. EDN GIUGUE.
2. Suvorov I. V., Ulrikh D. V. Osobennosti ustroystva i ekspluatatsii stantsiy obezazhelezivaniya vody [Design and operation features of iron removal water treatment plants]. Sovremennye tekhnologii v inzhenernykh sistemakh i gorodskom khozyaystve [Modern Technologies in Engineering Systems and Urban Utilities]: sbornik materialov LXXVII Natsionalnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh “Aktualnye problemy sovremennogo stroitelstva”, Saint Petersburg, October 15–18, 2024. Saint Petersburg, Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy arkhitekturno-stroitelnyy universitet, 2025, P. 17–25.
3. Shafiquzzaman M., AlSaleem S. S., Haider H., Alresheedi M. T., Thabit H. Experimental study for sand filter backwash water management: low-cost treatment for recycling and residual sludge utilization for radium removal. *Water*, 2021, Vol. 13, No. 20, Art. 2799. DOI: 10.3390/w13202799.
4. Suvorov I. V., Ulrikh D. V., Lonzinger T. M., Shabalin V. V. Torf v ochistke prirodnkh vod. Sravnitelnyy analiz filtratsionnykh svoystv razlichnykh tipov torfa [Peat in natural water treatment. Comparative analysis of filtration properties of different peat types]. Innovatsii i investitsii [Innovations and Investments], 2025, № 7, P. 507–511.
5. Suvorov I. V., Ulrikh D. V., Lonzinger T. M., Shabalin V. V. Kompleksnaya kharakteristika shlama vodopodgotovki: khimicheskii sostav, morfologiya i filtratsionnye svoystva [Comprehensive characterization of water treatment sludge: chemical composition, morphology and filtration properties]. Innovatsii i investitsii [Innovations and Investments], 2025, № 8, P. 694–698.
6. Pachana P. K., Rattanasak U., Nuithitikul K., Horpibulsuk S., Chindaprasirt P. Sustainable utilization of water treatment residue as a porous geopolymer for iron and manganese removals from groundwater. *Journal of Environmental Management*, 2022, Vol. 302, Art. 114036. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.114036.
7. Propolsky D., Romanovski V. Iron and manganese removal from groundwater: comprehensive review of filter media performance and pathways to polyfunctional applications. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2025. DOI: 10.1039/D5EW00751H.
8. Haukelidsaeter S., Boersma A. S., Piso L., Lenstra W. K., van Helmond N. A. G. M., Schoonenberg F., van der Pol E., Hurtarte L. C. C., van der Wielen P. W. J. J., Behrends T., van Kessel M. A. H. J., Lückner S., Slomp C. P. Efficient chemical and microbial removal of iron and manganese in a rapid sand filter and impact of regular backwash. *Applied Geochemistry*, 2024, Vol. 162, Art. 105904. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2024.105904.
9. Araya-Obando J. A., Rietveld L. C., Quesada-González A., Caballero-Chavarría A., Pacini V., Romero-Esquivel L. G. Start-up of bench-scale biofilters for manganese removal under tropical conditions: a comparative study using virgin pumice, silica sand, and anthracite



filter media. Environmental Science: Water Research & Technology, 2021, Vol. 7, P. 1504–1515. DOI: 10.1039/D1EW00093D.

10. Shrestha A. M., Kazama S., Sawangjang B., Takizawa S. Improvement of removal rates for iron and manganese in groundwater using dual-media filters filled with manganese-oxide-coated sand and ceramic in Nepal. Water, 2024, Vol. 16, No. 17, Art. 2450. DOI: 10.3390/w16172450.

© И. В. Суворов, 2026

Получено: 12.05.2026 г.