

УДК 628.316

ПРИМЕНЕНИЕ ОЗОНИРОВАНИЯ И БЕЗНАПОРНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ДЛЯ УДАЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗА И МАРГАНЦА ИЗ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

А. А. Волчек¹, Г. О. Наумчик², В. С. Белов³

¹ Д. г. н. РФ и РБ, профессор, профессор кафедры природообустройства, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: prof.volchak@yandex.by

² К. т. н., доцент кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: gonaumchik@bstu.by

³ Аспирант, УО «Брестский государственный технический университет», инженер-проектировщик, ЧУП «Сифания-экотехника», Брест, Беларусь, e-mail: belovadim@mail.ru

Реферат

Статья посвящена проблеме повышения энергоэффективности и технологической надежности станций обезжелезивания и деманганации подземных вод в условиях Республики Беларусь. Авторами проведен анализ химических форм присутствия железа в природных водах, включая органически связанные и коллоидные формы, которые характеризуются устойчивостью к традиционным методам аэрации.

В работе представлен сравнительный технико-экономический анализ двух технологических схем водоподготовки, таких как традиционная система напорной аэрации с напорными фильтрами с зернистой загрузкой и предлагаемой системы безнапорного озонирования с применением самопромывных фильтров непрерывного действия. Приведена принципиальная технологическая схема безнапорной станции обезжелезивания с детальным описанием основных узлов и гидравлических режимов работы. Выполнены расчеты требуемой дозы озона с учетом стехиометрии окислительных реакций Fe^{2+} и Mn^{2+} , включая корректировочные коэффициенты на конкурирующие процессы окисления органических веществ. Произведен расчет энергозатрат для станции производительностью 10 000 м³/сут, включающий затраты скважинных насосов, систем окисления, фильтрации и промывки для обеих технологий. На основе расчетных данных обосновано преимущество второй технологии, позволяющее снизить удельное энергопотребление с 0,2 до 0,12 кВт·ч/м³, что обеспечивает общую экономию электроэнергии порядка 40 %.

Особое внимание уделено окислительной способности озона в отношении трудноудаляемых форм железа и марганца. В статье подчеркивается необходимость проведения предварительных лабораторных и полевых испытаний исходной воды для разработки надежной и эффективной технологической схемы. Рассмотрены возможности реализации данной технологии с использованием отечественного оборудования производства компаний «Сифания-Экотехника» и «Тор Сурт», что подтверждает возможность импортозамещения и внедрения высокоэффективных решений в практику водоснабжения Республики Беларусь.

Ключевые слова: обезжелезивание, деманганация, озонирование, безнапорная фильтрация, энергоэффективность, органически связанное железо, самопромывные фильтры.

APPLICATION OF OZONATION AND GRAVITY FILTRATION FOR IRON AND MANGANESE REMOVAL FROM GROUNDWATER

A. A. Volchak, G. O. Naumchik, V. S. Belov

Abstract

The article addresses the problem of improving energy efficiency and technological reliability of iron and manganese removal stations for groundwater treatment in the Republic of Belarus. The authors have analyzed the chemical forms of iron present in natural waters, including organically bound and colloidal forms, which are characterized by resistance to traditional aeration methods.

The paper presents a comparative technical and economic analysis of two water treatment technological schemes, such as the traditional pressurized aeration system with pressure filters containing granular media and the proposed gravity ozonation system using continuous self-washing filters. A schematic diagram of a gravity-type iron removal station is provided with a detailed description of the main units and hydraulic operating modes. Calculations of the required ozone dose have been performed taking into account the stoichiometry of Fe^{2+} and Mn^{2+} oxidation reactions, including correction factors for competing oxidation processes of organic substances. Energy consumption calculations have been carried out for a plant with a capacity of 10,000 m³/day, including the costs of well pumps, oxidation systems, filtration and backwashing for both technologies. Based on the calculated data, the advantage of the second technology has been substantiated, allowing for a reduction in specific energy consumption from 0.2 to 0.12 kWh/m³, which provides overall electricity savings of approximately 40 %.

Special attention is given to the oxidizing capacity of ozone with respect to difficult-to-remove forms of iron and manganese. The article emphasizes the necessity of conducting preliminary laboratory and field tests of raw water for the development of a reliable and efficient technological scheme. The possibilities of implementing this technology using domestic equipment manufactured by "Sifania-Ecotechnika" and "Tor Surt" companies are considered, which confirms the potential for import substitution and implementation of highly efficient solutions in the water supply practice of the Republic of Belarus.

Keywords: iron removal, manganese removal, ozonation, gravity filtration, energy efficiency, organically bound iron, self-washing filters.

Введение

В Республике Беларусь подземные воды, являются основным источником хозяйственно-питьевого водоснабжения, как во всех крупных городах, так и в сельской местности. По предварительным данным, объем добычи вод за 2022 год составил 1,42 млрд м³, в том числе подземных 813 млн м³ и поверхностных 614 млн м³. По сравнению с предыдущим периодом, данный показатель вырос на 7 %. В том числе добыча подземных вод увеличилась на 1,7 % за счет роста объема водоснабжения Минска [1].

На территории Республики Беларусь разведано 662 месторождений (участков водозаборов) с эксплуатационными запасами пресных подземных вод в количестве 6,38 млн м³/сут. из них на 658 участках (водозаборах) запасы подземных вод разведаны и утверждены

для хозяйственно-питьевых целей и на четырех участках (водозаборах) – для технических. Использование пресных подземных вод хозяйственно-питьевого назначения с утвержденными запасами осуществляется на 279 участках (водозаборах) для централизованного водоснабжения 229 городов, промышленных центров и объектов. Однако освоение этих запасов происходит недостаточно активно, не эксплуатируется 306 месторождения, что составляет 49,9 % от числа разведанных [2].

Подземные воды, особенно в районах гумидного климата, включая большую часть территории Республики Беларусь, часто содержат избыточные концентрации железа (Fe) и марганца (Mn). Их присутствие обусловлено геохимическими условиями формирования водоносных горизонтов. Основными источниками являются водоносные горизонты кайнозойских и меловых отложений [3].

Распространение вод с повышенным содержанием железа и марганца носит региональный характер. Наиболее проблемными являются Полесский регион (Гомельская, Брестская области), где глубокие меловые и палеоген-неогеновые горизонты часто содержат железистые воды (до 5–10 мг/дм³ Fe и более) с высокой цветностью, связанной с наличием органических веществ таких как гумусовые кислоты. Центральную и северную части страны (Минская, Витебская области) характеризуют повышенные концентрации железа (1–3 мг/дм³) характерные для четвертичных и меловых водоносных комплексов. Содержание марганца часто коррелирует с содержанием железа [4].

В анаэробных условиях в породах и в водоносных горизонтах преобладает растворимая двухвалентная форма железа Fe²⁺ и марганца Mn²⁺. Эти ионы стабильны в бескислородной среде и легко вымываются в грунтовые воды. При контакте с кислородом Fe²⁺ окисляется до Fe³⁺, который образует нерастворимые гидроксиды и выпадает в осадок. Аналогично Mn²⁺ может окисляться до оксидных форм марганца, но для марганца обычно требуются более сильные окислители или более длительная стадия созревания [5].

Помимо типичной растворённой неорганической формы Fe²⁺, подземные воды могут содержать органически связанное железо, а также коллоидные формы железа, стабилизированные природными органическими веществами [6]. Органически связанное железо образуется, когда ионы железа (чаще Fe³⁺, реже Fe²⁺) вступают в химическое взаимодействие с органическими лигандами – главным образом, гуминовыми и фульвокислотами, которые присутствуют в водоносных горизонтах, богатых торфяными включениями или органогенными отложениями. Гуминовые вещества обладают множеством функциональных групп (карбоксильные, фенольные, карбонильные), которые способны хелатировать Fe³⁺. В результате образуются стабильные хелатные комплексы, размер которых варьируется от нескольких нанометров до десятков нанометров. Эти комплексы не склонны к быстрой коагуляции или осаждению, поскольку органическая оболочка препятствует агрегации частиц и снижает их плотность заряда. Коллоидные формы железа даже после частичного окисления Fe²⁺ в водной системе могут образовываться нерастворимые гидроксиды Fe(OH)₃, которые формируют частицы диаметром 10–500 нм. В присутствии природной органики эти частицы покрываются адсорбированными органическими молекулами, а также становятся коллоидно-устойчивыми за счёт двойного электрического слоя и стерической стабилизации. [7] Данные частицы сохраняются в воде в виде опалесцирующей или слегка мутной взвеси, которую сложно удалить обычной фильтрацией. Указанные выше формы загрязнений ведут себя существенно иначе, чем обычное растворённое железо, и требуют более сильных или специализированных методов окисления и фильтрации поскольку имеют малый размер и большую поверхностную энергию. Эффективное удаление такого рода загрязнений требует либо довольно дорогостоящего процесса коагуляции/флокуляции, либо разрушения органической оболочки сильным окислителем типа озона, либо применения специальных фильтров, чувствительных к очень мелким взвесям [8].

В Республике Беларусь в период с 2006 по 2010 год реализовывалась государственная программа «Чистая вода», в рамках которой было запланировано и построено или реконструировано порядка 110 станций обезжелезивания [9]. В период с 2021 по 2025 годы реализовывалась государственная программа «Комфортное жилье и благоприятная среда», в рамках которой было запланировано строительство и реконструкция порядка 800 станций обезжелезивания [10]. К примеру, согласно архивным данным за 2023 год, взятым с сайта goszakupki.by, объявлялось о проведении государственных тендеров на закупку 106 станций обезжелезивания, общей мощностью 1040 м³/ч, на сумму 18 835 272 рублей.

Авторами статьи были изучены технические задания на закупку этих станций обезжелезивания и сделан ряд определенных наблюдений. Первое наблюдение заключается в том, что практически все закупаемые станции являются напорными станциями обезжелезивания, в блочно-модульном исполнении, из чего можно сделать однозначный вывод, что в нашей стране сформировалась устоявшаяся практика применения технологии «напорного» обезжелезивания, в подавляющем большинстве случаев. Второе наблюдение формируется на том, что в некоторой части технических заданиях имеется требование на проведение пробного обезжелезивания непосредственно у места ее монтажа, перед заключением договора поставки, а также в части из них имеются и уточнения о каталитических нагруз-

ках напорных фильтров, но не во всех. Из этого можно сделать вывод, что ряд заказчиков уже сталкивались с тем, что при заказе установок обезжелезивания, ориентируясь только на ее производительность и общее содержание железа в исходной воде, но без учета фактической формы (органическое / неорганическое / коллоидное), получали в конечном счете установки, которые не могут выйти на требуемые показатели очистки. Авторы статьи посетили довольно много таких станций, в которых было установлено качественное и дорогостоящее оборудование, но ни длительная аэрация, ни даже применение каталитических загрузок в фильтрах не позволяло добиться снижения содержания железа в очищаемой воде до 0,3 мг/дм³ [11]. Можно с уверенностью сказать, что имеется определенная практика проектирования, когда технологическая схема оборудования очень часто закладывается без экспериментальных исследований исходной воды. В случае если исходная вода содержит обычное легко окисляемое неорганическое железо, то подбор оборудования, в теории, может быть осуществлен проектировщиком только лишь «за компьютером», но в случае более сложных форм, такой подход неизбежно приводит к ошибке.

Выше была обозначена одна из основных проблем в практике применения напорных станций обезжелезивания, а именно случаи, когда данное оборудование применяется для той воды, в которой имеются «сложные» формы растворенного железа. Вторым важным фактором эксплуатации напорных станций обезжелезивания является то, что для их нормальной работы требуется создавать давление на входе в станцию не менее 4 Бар. По сравнению с безнапорными системами фильтрации это влечет повышенные энергозатраты [12].

Решением обеих этих проблем может являться применение модульных станций обезжелезивания безнапорного типа с применением озона в качестве окислительного агента. Применение озона в системах обезжелезивания и деманганации подземных вод позволяет принципиально изменить как кинетику окислительных процессов, так и требования к гидравлическому режиму очистных сооружений. Озон является одним из наиболее сильных окислителей, с окислительно-восстановительным потенциалом 2,07 В, что существенно превышает аналогичный показатель молекулярного кислорода и гипохлорита [13]. Это обуславливает его способность эффективно окислять не только легкоокисляемые ионы Fe²⁺, но и более устойчивые формы загрязнений, включая органически связанное железо, коллоидные гидроксидные частицы, а также марганец в форме Mn²⁺. В отличие от традиционной аэрации, где скорость окисления железа и марганца определяется растворимостью кислорода, значением pH и временем контакта, озонирование обеспечивает практически мгновенное протекание реакций окисления в широком диапазоне физико-химических параметров воды. При этом происходит не только перевод Fe²⁺ в Fe³⁺, но и частичное разрушение органических лигандов, стабилизирующих хелатные и коллоидные формы железа в результате чего коллоидные частицы теряют устойчивость и укрупняются, что резко повышает их способность к последующему механическому задержанию на фильтрующей загрузке [14].

Использование озонирования в сочетании с безнапорными сампромывными фильтрами непрерывного действия, такими как фильтры типа «DynaSand», позволяет реализовать технологическую схему, в которой исключается необходимость создания высокого давления перед фильтрами и организации циклической обратной промывки [15]. Фильтры типа «DynaSand» работают в непрерывном режиме с постоянной регенерацией загрузки за счёт внутреннего гидравлического перемещения песка и его промывки очищенной водой, что обеспечивает стабильные гидравлические условия и постоянную эффективность фильтрации без остановки процесса очистки [16]. С точки зрения энергетики данная схема обладает рядом принципиальных преимуществ. Во-первых, отсутствие необходимости поддержания давления 4 бар на входе в фильтры позволяет существенно снизить удельные энергозатраты скважинных насосов. Во-вторых, отсутствие необходимости в периодических напорных промывках фильтров устраняет пиковые нагрузки, связанные с работой промывочных насосов и компрессоров [17]. В-третьих, использование озонаторов, рассчитанных на работу при повышенном давлении, позволяет эффективно организовать процесс барботажного озонирования в безнапорных окислительных колоннах без применения эжекторов, что дополнительно снижает энергопотребление системы в целом и повышает стабильность ее работы. Принципиальная схема устройства такой станции обезжелезивания приведена на рисунке 1 [18].

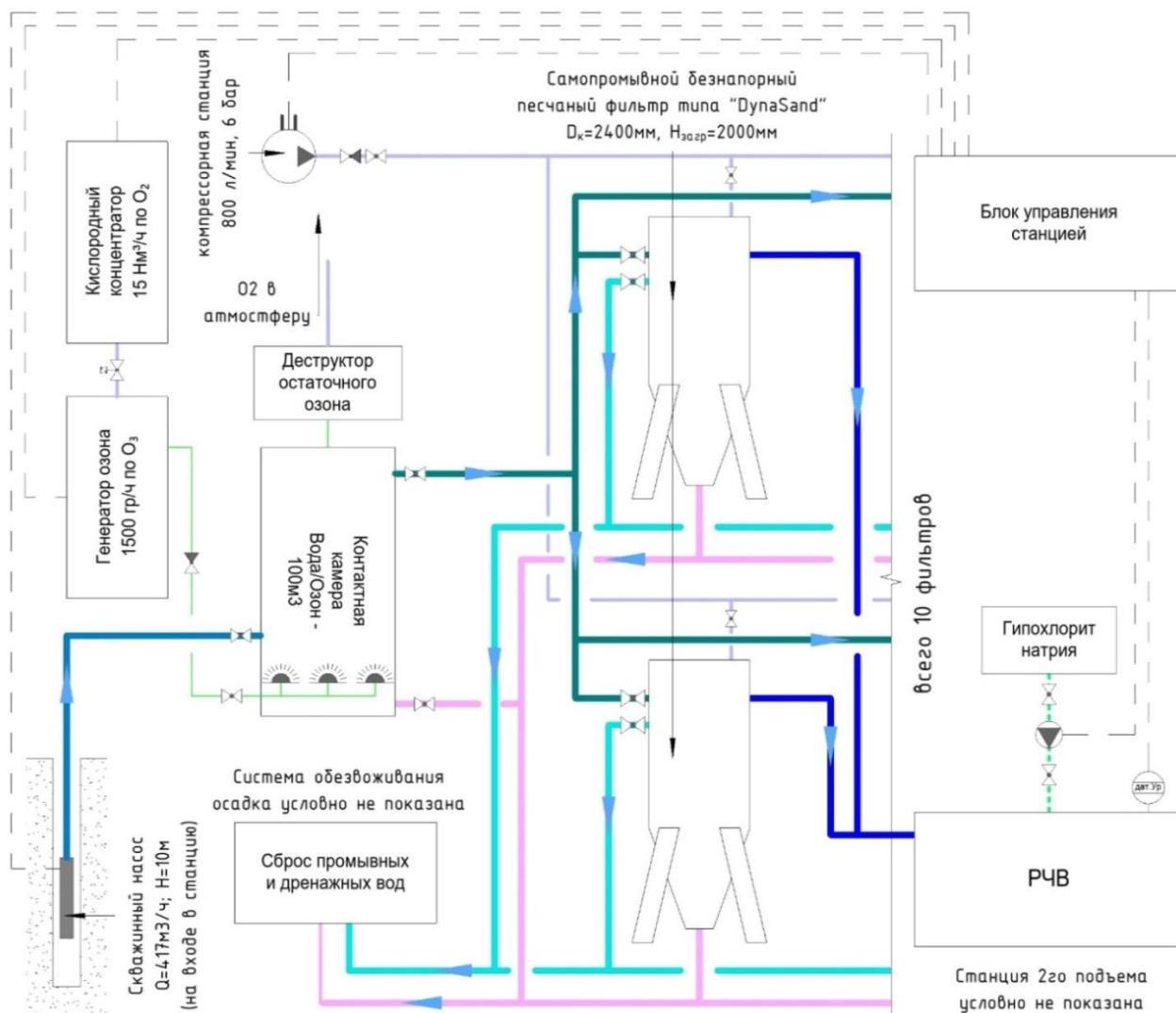


Рисунок 1 – Принципиальная схема безнапорной станции обезжелезивания

Скважинная вода подается в безнапорную герметичную контактную камеру определённого объема, куда дозируется озон при помощи донных барботеров. После окисления вода самотеком поступает в самопромывные безнапорные фильтры. В этих аппаратах процессы очистки воды и промывки фильтрующей загрузки происходят одновременно и непрерывно. Загрязнения удаляются из фильтрующего слоя с помощью встроенного воздушного эрлифта, без остановки основного процесса и без использования внешних промывных насосов. Очищенная вода поступает в РЧВ для дальнейшего использования. Промывная вода собирается в специальном резервуаре накопителе, откуда затем поступает на систему обезвоживания осадка.

Для наглядной демонстрации преимуществ предлагаемой системы обезжелезивания рассчитаем эксплуатационные затраты, в первую очередь энергопотребление, для обеих технологий обезжелезивания на конкретном примере.

Исходные данные для расчета – вода с содержанием $\text{Fe}^{2+} = 2,5 \text{ мг/дм}^3$, $\text{Mn}^{2+} = 1,5 \text{ мг/дм}^3$. Производительность – $10\,000 \text{ м}^3/\text{сутки}$ или $417 \text{ м}^3/\text{час}$. Норматив очистки – $\leq 0,3 \text{ мг/дм}^3$ по Fe и $\leq 0,1 \text{ мг/дм}^3$ по Mn. Непрерывный режим работы – 365 дней в году.

Технология 1 – Напорная аэрация + напорные фильтры

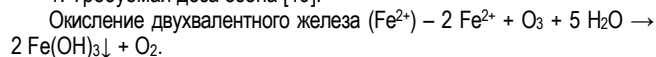
Свободный напор перед станцией не менее 40 м необходим для работы напорной аэрационной колонны и фильтров. Это ключевой момент для корректного расчета энергоэффективности станции в целом, поскольку энергозатраты на первом подъеме из скважины также нужно учитывать, как и энергозатраты на технологическое оборудование внутри станции. Аэрационный компрессор – 15 кВт/ч .

Промывные насосы (усредненная мощность с учетом цикличности работы) – $1,9 \text{ кВт/ч}$.

Технология 2 – Озонирование + самопромывные безнапорные фильтры

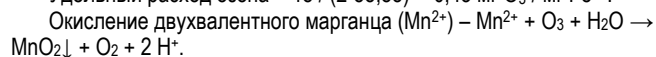
Свободный напор перед станцией 10 м, необходим только для подачи в безнапорную контактную камеру.

1. Требуемая доза озона [19].



Массовое соотношение – $2 \cdot 55,85 \text{ г Fe} : 48 \text{ г O}_3$.

Удельный расход озона – $48 / (2 \cdot 55,85) \approx 0,43 \text{ мг O}_3 / \text{мг Fe}^{2+}$.



Массовое соотношение – $54,94 \text{ г Mn} : 48 \text{ г O}_3$.

Удельный расход озона – $48 / 54,94 \approx 0,87 \text{ мг O}_3 / \text{мг Mn}^{2+}$.

Теоретическая потребность в озоне (на 1 дм^3 воды).

Для железа – $2,5 \text{ мг/дм}^3 \cdot 0,43 \text{ мг/мг} = 1,075 \text{ мг/дм}^3$.

Для марганца – $1,5 \text{ мг/дм}^3 \cdot 0,87 \text{ мг/мг} = 1,305 \text{ мг/дм}^3$.

Суммарная теоретическая доза – $1,075 + 1,305 = 2,38 \text{ мг/дм}^3$.

Теоретической дозы для реальных условий недостаточно и необходимо предусмотреть запас на конкурирующие реакции и неидеальность процесса в размере +20 % – на окисление органического железа и гуминовых кислот, +15 % – на окисление другой сопутствующей органики, +15 % – на "озоновую ненасыщенность" и технологический запас, поскольку часть озона не успевает прореагировать в камере и уходит с отходящими газами [20].

Таким образом, требуемая практическая доза озона составит: $2,38 \text{ мг/дм}^3 \cdot (1 + 0,2 + 0,15 + 0,15) = 3,57 \text{ мг/дм}^3$. Округлим до $3,6 \text{ мг/дм}^3$. Требуемая производительность озонатора – $417 \text{ м}^3/\text{ч} \cdot 3,6 \text{ г/м}^3 \approx 1,5 \text{ кг/ч}$.

Энергозатраты при указанных параметрах системы составят:

- озонатор ($10 \text{ кВт} \cdot \text{ч/кг O}_3$);
- генератор кислорода ($1 \text{ кВт} \cdot \text{ч/Нм}^3 \text{O}_2$);
- компрессор для работы эрлифтов системы самопромывки фильтров – $2,5 \text{ кВт/ч}$.

Таблица 1 – Сводная ведомость расчетов энергопотребления

Статья затрат	Технология 1 Напорная система с аэрацией	Технология 2 Озонирование + Безнапорные фильтры
1. Скважинные насосы	68,1 кВт/ч	17,5 кВт/ч
2. Окисление / Аэрация	15 кВт/ч	30 кВт/ч
3. Фильтрация и промывка	1,9 кВт/ч	2,5 кВт/ч
ИТОГО СУММАРНАЯ МОЩНОСТЬ:	~85 кВт/ч	~50 кВт/ч
Удельное энергопотребле- ние ($\text{кВт} \cdot \text{ч/м}^3$):	0,2 кВт·ч/м ³	0,12 кВт·ч/м ³
Годовое энергопотребление (кВт·ч/год):	~ 744600 кВт·ч	~ 438000 кВт·ч

Данные, представленные в таблице 1, наглядно демонстрируют существенное преимущество технологии озонирования в сочетании с безнапорной фильтрацией по показателям энергопотребления.

Следует особо отметить, что несмотря на более высокие энергозатраты непосредственно на процесс окисления, применение безнапорной схемы фильтрации обеспечивает существенное снижение энергопотребления скважинными насосами. Именно этот фактор определяет итоговую энергоэффективность системы. Возможность работы при свободном напоре всего 10 м. в. с. вместо требуемых 40 м. в. с. для напорной системы позволяет в 3,9 раза снизить затраты энергии на первом подъеме воды, что полностью компенсирует повышенное энергопотребление озонаторного комплекса и генератора кислорода.

Ключевым технологическим преимуществом озонирования является его способность эффективно окислять железо во всех формах его присутствия в природных водах. Особенно важным является способность озона разрушать органические лиганды, стабилизирующие коллоидные формы железа. В результате даже трудноокисляемые формы железа переводятся в легкофильтруемые гидроксидные осадки, которые эффективно задерживаются на песчаной загрузке фильтров. Аналогичная ситуация наблюдается и при удалении марганца. Окисление Mn^{2+} до MnO_2 кислородом воздуха протекает существенно медленнее, чем окисление железа, и часто требует использования каталитических загрузок. Озонирование обеспечивает практически полное окисление марганца без использования каких-либо катализаторов, что упрощает технологическую схему и повышает стабильность процесса очистки.

Таким образом, применение озонирования делает технологию более универсальной и менее зависимой от конкретного химического состава обрабатываемой воды. Это частично снижает критичность отсутствия предварительных экспериментальных исследований при проектировании, хотя авторы статьи категорически не приветствуют такой подход и настаивают на обязательном предварительном изучении качества исходной воды в каждом конкретном случае. Несмотря на универсальность озонирования как метода окисления, авторы считают необходимым подчеркнуть, что какой бы эффективной ни была выбранная технология, проектирование систем водоподготовки без предварительных лабораторных или полевых испытаний исходной воды является неприемлемым подходом. Только детальное изучение физико-химического состава воды, определение форм присутствия железа и марганца, оценка содержания органических веществ и проведение пробного обезжелезивания с различными окислителями позволяют подобрать наиболее рациональную и экономически оправданную технологическую схему для каждого конкретного объекта.

Следует отметить, что оборудование для реализации технологии безнапорного озонирования с самопромывными фильтрами пока не получило широкого распространения в Республике Беларусь, что может создавать определенные барьеры для проектных организаций в силу отсутствия обширной практики его применения на отечественных объектах. Вместе с тем, авторы считают необходимым проинформировать профессиональное сообщество о наличии в стране компетенций и производственных мощностей для комплектации таких систем.

Компания «Сифания-Экотехника», являющаяся резидентом Брестского научно-технологического парка, занимается разработкой и производством безнапорных самопромывных фильтров непрерывного действия. На настоящий момент предприятием изготовлено и поставлено на объекты Российской Федерации более сорока единиц фильтров собственной оригинальной конструкции. Накопленный опыт эксплуатации этого оборудования подтверждает его высокую эффективность и надёжность при работе в системах фильтрации различного назначения.

Конструктивные особенности фильтров «Сифания-Экотехника» обеспечивают непрерывную регенерацию фильтрующей загрузки за счёт гидравлического перемещения песка внутри корпуса и его промывки очищенной водой в специальной зоне. Это исключает необходимость периодической остановки процесса фильтрации для промывки, обеспечивает стабильное качество фильтрата и постоянное гидравлическое сопротивление, что критически важно для безнапорных систем.

Также в г. Бресте имеется компания «Тор Сурт», осуществляющая разработку и производство генераторов озона различной производительности. Ключевой конструктивной особенностью озонаторов данного производителя является возможность генерации озона при повышенном давлении газа (до 2-х бар) на выходе. Эта характеристика имеет ключевое значение для реализации безнапорных схем озонирования с повышенными показателями энергоэффективности. В традиционных озонаторных установках, где генератор работает при атмосферном или близком к нему давлении, для введения озонсодержащего газа в воду, находящуюся под давлением, применяются эжекторы, требующие создания значительного перепада давления и, соответственно, дополнительных энергозатрат на подающие насосы. Озонаторы «Тор Сурт», генерирующие озон под избыточным давлением, позволяют осуществлять прямое барботажное введение газа в безнапорную контактную камеру с гидростатическим давлением воды на уровне 10 м без использования каких-либо инжекционных устройств. Это упрощает технологическую схему, повышает надёжность системы и снижает эксплуатационные затраты. Важно отметить, что удельное энергопотребление озонаторов «Тор Сурт» составляет порядка 10 кВт/ч на килограмм генерируемого озона, что сопоставимо с показателями ведущих мировых производителей озонаторного оборудования, таких как Ozonia и Wedeco. Такая энергоэффективность в сочетании с возможностью работы на повышенном давлении делает данное оборудование оптимальным выбором для комплектации безнапорных систем озонирования.

Компании «Сифания-Экотехника» и «Тор Сурт» осуществляют тесное технологическое сотрудничество в области продвижения комплексных решений по обезжелезиванию и деманганации природных вод на основе безнапорного озонирования с применением самопромывных фильтров непрерывного действия. Специалисты обеих организаций готовы предоставить всю необходимую техническую документацию, консультационную поддержку и данные по результатам пилотных испытаний всем заинтересованным проектным организациям, эксплуатирующим предприятия и потенциальным заказчикам.

Заключение

Авторы статьи призывают проектировщиков и специалистов в области водоподготовки не опасаться внедрения данной технологии в силу её относительной новизны для отечественной практики. Наличие в Республике Беларусь компетентных производителей ключевого оборудования, готовых обеспечить полное техническое сопровождение проектов от стадии предпроектных изысканий и пилотных испытаний до пусконаладочных работ и гарантийного обслуживания создаёт все необходимые предпосылки для успешной реализации таких систем.

При грамотном подходе, включающем обязательное предварительное изучение качества исходной воды и проведение лабораторных или полевых испытаний различных технологических схем, применение безнапорного озонирования с самопромывными фильтрами

позволяет достичь гарантированного качества очистки воды при существенном снижении как капитальных, так и эксплуатационных затрат по сравнению с традиционными напорными системами.

Список цитированных источников

1. Минприроды: объем добычи вод за 2022 год составил 1,42 млрд куб.м // Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь. – URL: <https://minpriroda.gov.by/ru/news-ru/view/minprirody-objem-dobychi-vod-za-2022-god-sostavil-142-mlrd-kubm-4728> (дата обращения: 12.03.2026).
2. Пресные подземные воды // Экологический портал Республики Беларусь. – URL: <https://ecoportal.gov.by/nedra/mineralno-syrevaya-baza/dobyvaemoe-syre/presnye-podzemnye-vody> (дата обращения: 12.03.2026).
3. Голубое золото Беларуси // Газета «Навука». – URL: <https://gazeta-navuka.innosfera.by/novosti/1158-goluboe-zoloto-belarusi> (дата обращения: 24.03.2026).
4. Кудельский, А. В. Подземные воды Беларуси / А. В. Кудельский, В. И. Пашкевич, М. Г. Ясоевев. – Минск : Институт геологических наук НАН Беларуси, 1998. – 260 с.
5. Stumm, W. Chemistry of the Solid-Water Interface / W. Stumm. – New York : Wiley-Interscience, 1992. – 428 p.
6. Журба, М. Г. Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений / М. Г. Журба, В. П. Капустин, Л. И. Соколов. – М. : АСВ, 2011. – 384 с.
7. Драгинский, В. Л. Коагуляция в технологии очистки природных вод / В. Л. Драгинский, Л. П. Алексеева, С. В. Гетманцев. – М. : Научное издание, 2005. – 576 с.
8. Когановский, А. М. Коагуляция и флокуляция в процессах очистки воды / А. М. Когановский, Н. А. Клименко. – Киев : Наукова думка, 1978. – 260 с.
9. Филонов, В. П. Деятельность, связанная с установлением целевых показателей в Республике Беларусь, достигнутый прогресс и задачи на будущее по вопросам доступа к питьевому водоснабжению = Activities related to setting targets under the Protocol on Water and Health in Belarus: progress achieved and challenges ahead in access to drinking water supply / В. П. Филонов // Семинар по отчетности в рамках Протокола по проблемам воды и здоровья = Workshop on reporting under the Protocol on Water and Health: материалы семинара, Женева, 10–11 февр. 2009 г. – Женева, 2009. – 12 с.
10. О Государственной программе “Комфортное жилье и благоприятная среда” на 2021–2025 годы : постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 28 янв. 2021 г. № 50 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22100050> (дата обращения: 17.05.2026).
11. Канализация. Наружные сети и сооружения. Строительные нормы и правила : СН 4.01.02-2019 / Мин-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь. – Минск : Минстройархитектуры, 2019. – 85 с.
12. Рябчиков, Б. Е. Современные методы подготовки воды для промышленного и бытового использования / Б. Е. Рябчиков. – М. : ДеЛи принт, 2004. – 328 с.
13. Кульский, Л. А. Теоретические основы и технология кондиционирования воды: процессы и аппараты / Л. А. Кульский ; Акад. наук УССР, Ин-т коллоид. химии и химии воды им. А. В. Думанского. – 4-е изд., перераб. и доп. – Киев : Наукова думка, 1983. – 528 с.
14. Gottschalk, C. Ozonation of Water and Waste Water / C. Gottschalk, J. A. Libra, A. Saupe. – Weinheim : Wiley-VCH, 2010. – 368 p.
15. Абрамов, Н. Н. Водоснабжение. Учебник для вузов / Н. Н. Абрамов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1974. – 480 с.
16. Wachinski, A. M. Continuous self-cleaning filter : pat. 5582722 USA : IPC B01D 24/46 / A. M. Wachinski, Y. Xia, J. Bengoechea ; applicant Ashbrook-Simon-Hartley Corp. – № 357284 ; filed 13.12.1994 ; publ. 10.12.1996.
17. Непрерывные фильтры: проверенная технология с последними инновациями (DynaSand) / Nordic Water Products AB. – URL: <https://ekoumvel.ru/upload/iblock/cd0/cd062d246c43d2fb0edcdddb663c2be.pdf> (дата обращения: 03.04.2026).
18. Rakness, K. L. Ozone in Drinking Water Treatment: Process Design, Operation, and Optimization / K. L. Rakness. – Denver : AWWA, 2005. – 480 p.

References

1. Minprirody: ob'em dobychi vod za 2022 god sostavil 1,42 mlrd kub.m // Ministerstvo prirodnyh resursov i ohrany okruzhayushchej sredy Respubliki Belarus'. – URL: <https://minpriroda.gov.by/ru/news-ru/view/minprirody-objem-dobychi-vod-za-2022-god-sostavil-142-mlrd-kubm-4728> (data obrashcheniya: 12.03.2026).
2. Presnye podzemnye vody // Ekologicheskij portal Respubliki Belarus'. – URL: <https://ecoportal.gov.by/nedra/mineralno-syrevaya-baza/dobyvaemoe-syre/presnye-podzemnye-vody> (data obrashcheniya: 12.03.2026).
3. Goluboe zoloto Belarusi // Gazeta «Navuka». – URL: <https://gazeta-navuka.innosfera.by/novosti/1158-goluboe-zoloto-belarusi> (data obrashcheniya: 24.03.2026).
4. Kudel'skij, A. V. Podzemnye vody Belarusi / A. V. Kudel'skij, V. I. Pashkevich, M. G. YAsoveev. – Minsk : Institut geologicheskikh nauk NAN Belarusi, 1998. – 260 s.
5. Stumm, W. Chemistry of the Solid-Water Interface / W. Stumm. – New York : Wiley-Interscience, 1992. – 428 p.
6. ZHurba, M. G. Vodosnabzhenie. Proektirovanie sistem i sooruzhenij / M. G. ZHurba, V. P. Kapustin, L. I. Sokolov. – M. : ASV, 2011. – 384 s.
7. Draginskij, V. L. Koagulyaciya v tekhnologii ochistki prirodnyh vod / V. L. Draginskij, L. P. Alekseeva, S. V. Getmancev. – M. : Nauchnoe izdanie, 2005. – 576 s.
8. Koganovskij, A. M. Koagulyaciya i flokulyaciya v processah ochistki vody / A. M. Koganovskij, N. A. Klimenko. – Kiev : Naukova dumka, 1978. – 260 s.
9. Filonov, V. P. Deyatel'nost', svyazannaya s ustanovleniem celevyh pokazatelej v Respublike Belarus', dostignutyj progress i zadachi na budushchee po voprosam dostupa k pit'evomu vodosnabzheniyu = Activities related to setting targets under the Protocol on Water and Health in Belarus: progress achieved and challenges ahead in access to drinking water supply / V. P. Filonov // Seminar po otchetnosti v ramkah Protokola po problemam vody i zdorov'ya = Workshop on reporting under the Protocol on Water and Health: materialy seminar, ZHeneva, 10–11 fevr. 2009 g. – ZHeneva, 2009. – 12 s.
10. O Gosudarstvennoj programme “Komfortnoe zhil'e i blagopriyatnaya sreda” na 2021–2025 gody : postanovlenie Soveta Ministrov Resp. Belarus' ot 28 yanv. 2021 g. № 50 // Nacional'nyj pravovoj Internet-portal Respubliki Belarus'. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22100050> (data obrashcheniya: 17.05.2026).
11. Kanalizaciya. Naruzhnye seti i sooruzheniya. Stroitel'nye normy i pravila : SN 4.01.02-2019 / Min-vo arhitektury i stroitel'stva Resp. Belarus'. – Minsk : Minstrojarhitektury, 2019. – 85 s.
12. Ryabchikov, B. E. Sovremennye metody podgotovki vody dlya promyshlennogo i bytovogo ispol'zovaniya / B. E. Ryabchikov. – M. : DeLi print, 2004. – 328 s.
13. Kul'skij, L. A. Teoreticheskie osnovy i tekhnologiya kondicionirovaniya vody: processy i apparaty / L. A. Kul'skij ; Akad. nauk USSR, In-t kolloid. himii i himii vody im. A. V. Dumanskogo. – 4-e izd., pererab. i dop. – Kiev : Naukova dumka, 1983. – 528 s.
14. Gottschalk, C. Ozonation of Water and Waste Water / C. Gottschalk, J. A. Libra, A. Saupe. – Weinheim : Wiley-VCH, 2010. – 368 p.
15. Abramov, N. N. Vodosnabzhenie. Uchebnik dlya vuzov / N. N. Abramov. – 2-e izd., pererab. i dop. – M. : Strojizdat, 1974. – 480 s.
16. Wachinski, A. M. Continuous self-cleaning filter : pat. 5582722 USA : IPC B01D 24/46 / A. M. Wachinski, Y. Xia, J. Bengoechea ; applicant Ashbrook-Simon-Hartley Corp. – № 357284 ; filed 13.12.1994 ; publ. 10.12.1996.
17. Nepriyvnye fil'try: proverennaya tekhnologiya s poslednimi innovacijami (DynaSand) / Nordic Water Products AB. – URL: <https://ekoumvel.ru/upload/iblock/cd0/cd062d246c43d2fb0edcdddb663c2be.pdf> (data obrashcheniya: 03.04.2026).
18. Rakness, K. L. Ozone in Drinking Water Treatment: Process Design, Operation, and Optimization / K. L. Rakness. – Denver : AWWA, 2005. – 480 p.
19. Lunin, V. V. Fizicheskaya himiya ozona / V. V. Lunin, M. P. Popovich, S. N. Tkachenko. – M. : Izd-vo MGU, 1998. – 480 s.
20. Kul'skij, L. A. Tekhnologiya ochistki prirodnyh vod / L. A. Kul'skij, P. P. Strokach. – Kiev : Vishcha shkola, 1986. – 352 s.

Материал поступил 22.06.2026, одобрен 07.07.2026, принят к публикации 13.07.2026