

EDN: WNJVAJ

УДК 628.16

Analysis of Ozonation Technology in the Framework of Drinking Water Treatment

Antonina A. Filimonova, Alena Y. Vlasova*,
Natalia D. Chichirova and Ruzina F. Kamalievа
*Kazan State Power Engineering University
Kazan, Russian Federation*

Received 20.05.2024, received in revised form 15.07.2024, accepted 04.08.2024

Abstract. Purification of natural water from a surface water source is complicated by anthropogenic environmental factors. Industrial, household, and agricultural human activities negatively affect the quality of natural water, as the proportion of chemical and organic compounds increases, which significantly reduce the efficiency of purification. This work is devoted to improving the quality indicators of natural water purification to drinking requirements. The experimental part was carried out at a water treatment plant located on the banks of the Oka River. The experimental studies are based on the step-by-step analysis of the operating ozonation plant with the determination of the output concentration of ozone in the ozone-air mixture, as well as testing of primary and secondary ozonation at a laboratory ozonation plant. As part of the experiment, key water quality indicators were determined to be able to interpret the effect of ozonation on various types of waters with different dosages. Based on the results obtained, conclusions were drawn on the possibility of using primary ozonation for the water under study, and the optimal dosage was determined. Taking into account the specifics of ozone treatment of natural river water, recommendations for reducing the concentration of by-products of the ozonation process are described. The effect of secondary ozonation on the organoleptic characteristics of purified water was also determined as part of the experiment.

Keywords: ozonation, drinking water, primary and secondary ozonation, bactericidal effect.

Acknowledgements. The results were obtained with the financial support of the Ministry of Education and Science “Study of processes and hybrid power plant fuel cell – gas turbine” project code FZSW-2022–0001.

Citation: Filimonova A. A., Vlasova A. Y., Chichirova N. D., Kamalievа R. F. Analysis of ozonation technology in the framework of drinking water treatment. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2024, 17(5), 565–577. EDN: WNJVAJ



Анализ технологии озонирования в рамках подготовки воды питьевого качества

**А. А. Филимонова, А. Ю. Власова,
Н. Д. Чичирова, Р. Ф. Камалиева**

*Казанский государственный энергетический университет
Российская Федерация, Казань*

Аннотация. Очистка природной воды поверхностного водоисточника осложняется антропогенными факторами среды. Промышленная, бытовая, сельскохозяйственная деятельности человека негативно сказываются на качестве природной воды, так как увеличивается доля химических и органических соединений, которые существенно снижают эффективность очистки. Данная работа посвящена вопросам улучшения показателей качества очистки природной воды до питьевых требований. Экспериментальная часть проводилась на станции очистки воды, расположенной на берегу реки Оки. В основе экспериментальных исследований лежит поэтапная работа анализа действующей озонаторной установки с определением выходной концентрации озона в озono-воздушной смеси, а также апробирование на лабораторной озонаторной установке первичного и вторичного озонирования. В рамках эксперимента определялись ключевые показатели качества воды для возможности интерпретирования влияния озонирования на различные типы вод с отличными дозировками. На основании полученных результатов сделаны выводы по возможности применения первичного озонирования для исследуемой воды, определена оптимальная дозировка. Учитывая специфику обработки озоном природной речной воды, описаны рекомендации по снижению концентрации побочных продуктов процесса озонирования. Также в рамках эксперимента определено влияние вторичного озонирования на органолептические характеристики очищенной воды.

Ключевые слова: озонирование, вода питьевого качества, первичное и вторичное озонирование, бактерицидное действие.

Благодарности. Результаты получены при финансовой поддержке Минобрнауки «Изучение процессов в гибридной энергетической установке топливный элемент – газовая турбина» шифр проекта FZSW-2022–0001.

Цитирование: Филимонова А. А. Анализ технологии озонирования в рамках подготовки воды питьевого качества / Филимонова А. А., Власова А. Ю., Чичирова Н. Д., Камалиева Р. Ф. // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2024, 17(5). С. 565–577. EDN: WNJVAJ

Введение

Вода природных поверхностных источников содержит в различном количественном соотношении минеральные и органические соединения. Минеральный состав определяется характеристикой грунтовых вод, которыми подпитывается водоем. А органические примеси формируются за счет соединений, которые вымываются из пород, а также образуются в водоеме в результате биохимических процессов. Также стоит учитывать, что как минеральные, так и органические примеси могут попадать в водоисточник с бытовыми и промышленными сточными водами [1].

Часто наличие органических соединений является причиной появления запаха и привкуса в воде. В районах с высокой промышленной нагрузкой в воде нередко можно обнаружить нефтепродукты, фенольные соединения и специфичные для деятельности предприятий ве-

щества. Наличие подобных химических и органических компонентов существенно ухудшает эффективность очистки воды, а традиционные методы не могут снизить содержание данных комплексов до нормированных значений. Поэтому для очистки таких вод требуются специальные технологии.

Для снижения содержания органики в воде используют методы, в основе которых лежит действие сильных окислителей – озонирование. На сегодняшний день на некоторых станциях очистки используются озонаторы, которые являются хвостовым процессом перед выходом в резервуары чистой воды.

Практическая ценность данной работы заключается в том, что представлены результаты лабораторных экспериментов использования процесса озонирования не только как завершающего (конечного) процесса обработки воды, но и как первичного способа, так как озонирование позволяет снижать цветность и устранять наличие привкусов и запахов воды.

Научная новизна работы заключается в разработке технологических решений применения метода озонирования с обеспечением условия поддержания в малых концентрациях токсичных побочных продуктов путем автоматического контроля показателей качества воды на выходе из установки.

Экспериментальные исследования проводились на действующей станции очистки с применением имеющегося озонаторного оборудования, а также с использованием лабораторного озонатора марки АМ. В рамках данной работы были поставлены следующие задачи: проведение испытаний с различными дозами озона на лабораторном озонаторе, проведение экспериментов по озонированию на природной исходной воде (первичное озонирование), а также определение дозы озона при работе действующей озонаторной установки.

Обзор литературы

По аналитическим данным состояния природной среды и водоемисточников по РФ выявлено значительное превышение по многим показателям. Особое внимание уделяется содержанию в воде фенолов, хлорорганических соединений, нефтепродуктов, а также аммонийного и нитритного азота [1]. Большая часть водоемов, расположенных вблизи промышленных предприятий, загрязнены и требуют оптимизированных процессов подготовки воды до питьевого качества.

На сегодняшний день с учетом развития промышленной сферы в водоемах все чаще фиксируется превышение фенольных соединений, которые попадают со сточными водами предприятий нефтехимического и органического синтеза. При подготовке питьевой воды на стадии обеззараживания хлорным реагентом фенолы образуют хлорфенольные соединения, которые значительно влияют на органолептические показатели очищенной воды, а именно вызывают резкий, неприятный запах [2–5]. Также стоит отметить, что важным критерием дозирования обеззараживающих реагентов является остаточное содержание в очищенной воде хлорорганических соединений. Поэтому увеличение дозы реагентов при хлорировании ограничивается нормированным показателем содержания хлорорганических соединений в подготовленной воде. Учитывая невозможность увеличения дозы хлорных реагентов и недостаточную степень обеззараживания воды, на станциях подготовки воды стали использовать альтернативные методы: ультрафильтрацию, мембранные способы очистки и озонирование.

Процесс озонирования для подготовки воды питьевого качества является весьма привлекательным с точки зрения улучшения как бактериологических, так и органолептических показателей. А эффективность процесса напрямую зависит от концентрации органических соединений, температуры воды, водородного показателя. Расход озono-воздушной смеси для обработки воды должен подбираться экспериментальным путем, так как не всем органическим соединениям свойственна деструкция при взаимодействии с озоном.

Метод озонирования все чаще используется в технологиях водоподготовки. В России процесс озонирования комбинируется с другими технологиями обеззараживания, такими как хлорирование и УФ-обработка. Наиболее традиционно использование озонирования в конце технологической схемы с дозой 0,4–1 мг/л и временем обработки 5 минут. Для европейских стран метод озонирования применяется в другой технологической последовательности. Технология включает следующие стадии: предварительная фильтрация, предварительное озонирование, микрофлокуляция, фильтрация, нейтрализация, озонирование, фильтрация на угольных фильтрах, заключительное обеззараживание [6]. В данной схеме предварительное озонирование выступает в качестве осаждающего процесса, и дальнейшее флокулирование позволяет отделить окисленные органические соединения. Авторы считают, что предварительное озонирование предпочтительнее хлорирования, так как не образуется токсичных хлорорганических соединений. Но стоит учитывать, что в процессе озонирования органические соединения тоже могут окисляться до токсичных веществ. Поэтому оптимальной дозой озона является 1–2 г на 1 г растворенного органического углерода [7]. Стабильность озона в воде напрямую зависит от температуры и водородного показателя. Несмотря на технологическую простоту, озонирование является сложным химическим процессом, так как озон способен вступать в радикальные реакции со многими веществами, которые содержатся в воде. Также важно корректно подбирать дозировку озono-воздушной смеси по результатам лабораторных и опытно-промышленных испытаний. При некорректной дозировке в процессе озонирования может наблюдаться помутнение воды или образование мелких хлопьев, что является причиной дестабилизации частиц под действием озона, либо появление продуктов осаждения из первоначально растворенных органических соединений [7].

Гончаренко Б.И., Пуресев Н.И. и Рязанов В.А. предложили установку обработки воды озоном и способы его дозирования. Изобретение заключается в подаче озono-воздушной смеси ступенями с постоянным расходом на каждой ступени и изменением концентрации озона в озono-воздушной смеси [8]. В данном изобретении описаны рекомендации по дозировкам озона на разных ступенях, представлены оптимальные размеры пузырьков озono-воздушной смеси и способы осушки воздуха перед подачей в генератор озона.

В работе Белова С.Г. и Наумчик Г.О. представлены результаты эксперимента по обеззараживанию питьевой воды с различными дозами озона [9–11]. Для эксперимента были выбраны дозы в диапазоне от 1 до 2,5 мг/л. Результаты эксперимента оценивались с помощью спектрофотометрической методики поглощения, спектры были сняты в диапазоне длин волн 200–400 нм. Значение при D 400 характеризует цветность исследуемой среды, и по площади пика можно определить количественное содержание. Значение при D 254 характеризует содержание органических соединений, но, как правило, для данного показателя верно рассматривать диа-

пазон длин волн 200–300 нм. В ходе экспериментальных исследований было определено, что основное количество органических веществ уже окисляется при дозе озона 1 мг/л, при этом время контакта составило всего 30 минут.

В работах Гриневича В.И., Извековой Т.В., Пластининой Н.А. описывается опыт обработки природной воды озонированием и воздействием в диэлектрическом поверхностно-барьерном разряде. Авторы утверждают, что данные способы обработки природной воды являются более полезными, так как при биологической обработке хлорсодержащими реагентами природной воды образуются хлорорганические соединения, которые являются токсичными, и их содержание строго нормируется. Действительно, после хлорирования содержание хлорорганических соединений в питьевой воде увеличивается в 1,2–24 раза, а после озонирования и обработки в диэлектрическом поверхностно-барьерном разряде снижается в 1,2–48 раз и 1,3–146 раз соответственно. Но также стоит отметить, что в процессе озонирования и обработки в диэлектрическом поверхностно-барьерном разряде органические соединения раскладываются, и в качестве побочного продукта образуется формальдегид. Поэтому полностью отказаться от процесса хлорирования не является возможным, а процессы озонирования и обработки в диэлектрическом поверхностно-барьерном разряде можно использовать в качестве замены первой стадии хлорирования [12, 13].

Исследователи Крупнов Е.И., Кормашова Е.Р., Ковшиков Р.С. и Захарченко А.С. в своей работе представили анализ проблем, возникающих при обработке воды методом озонирования. Основная сложность, с которой сталкивается большая часть очистных станций при эксплуатации озонаторной установки, в том, что эффективность процесса очень низкая. Причиной являются неучтенные изменения качества воды при разработке проектов очистных сооружений с озонированием. На основании данных изменений режим обработки и схема озонирования могут существенно отличаться от первоначальной. На стадии проектирования озонаторной установки важно правильно рассчитывать дозу озона с учетом анализа работы действующей технологии и качества воды на каждой стадии очистки. Озонирование целесообразно применять только в случае повышенного бактериологического загрязнения при наличии в воде патогенных микроорганизмов. Но ошибочно полагать, что озонирование может заменить хлорирование, так как озон в воде быстро разлагается и не обладает длительным бактерицидным действием [14].

На основании анализа литературных источников и научных трудов можно сделать вывод, что технические характеристики метода озонирования подбираются индивидуально, конкретно под объект, где будет использован данный метод. Озонирование является перспективным способом обработки воды с целью улучшения эффективности очистки, и данный процесс рекомендуется проводить при тщательном лабораторном анализе. Технологическая схема и способ обработки воды будут зависеть от качества воды в водоисточнике, а также протяженности водопроводных сетей для исключения возможности размножения бактерий в трубопроводах, ведущих к потребителям.

Методика промышленного эксперимента

Для проведения промышленного эксперимента была выбрана действующая станция очистки, расположенная на берегу реки Оки. Способ подготовки воды организован по тради-

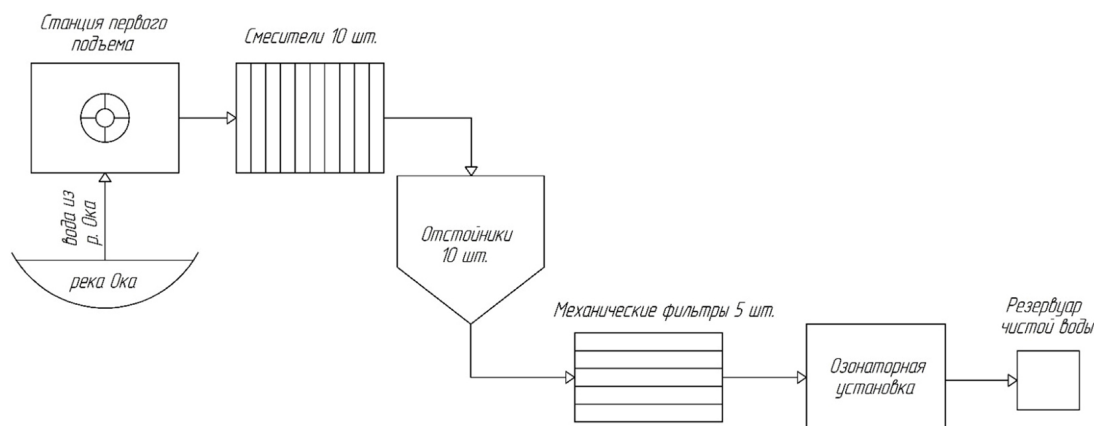


Рис. 1. Действующая технология очистки воды из реки Оки

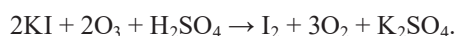
Fig. 1. The current technology of water purification from the Oka River

ционной технологии с использованием следующего оборудования: смесители, отстойники, механические фильтры, озонаторная установка, хранение воды организовано в резервуарах чистой воды (рис. 1).

Озонаторная установка включает четыре контактные камеры, а максимальная производительность составляет 350000 м³/сутки. В состав озонаторной станции входит четыре озонатора (№ 1, 3, 4 включены в работу, № 2 находится в нерабочем состоянии). Все озонаторы работали на максимальном режиме. В контактных камерах происходит обработка воды озono-воздушной смесью. Согласно технологическому регламенту, очищенная вода подвергается озонированию в том случае, если показатель перманганатной окисляемости более 5 мг/дм³.

Экспериментальная часть была разделена на три этапа. Первый этап заключался в определении концентрации озона в озono-воздушной смеси на действующих озонаторах. Данные результаты позволили оценить эффективность работы каждого озонатора в отдельности. Для определения концентрации на общий коллектор озono-воздушной смеси был установлен редуктор. С помощью волюметрического метода был измерен расход газовой смеси, который составил 0,0327 м³/ч.

Методика определения концентрации озона в озono-воздушной смеси заключалась в следующем: озono-воздушная смесь продувалась через раствор 2 % йодида калия (250 мл), подкисленного раствором серной кислоты (20 мл):



В процессе продувки озон моментально реагирует с йодидом калия с образованием йода, который подкрашивает раствор в желто-коричневый цвет. После окончания продувки колбу герметично закрывали стеклянной крышкой и далее анализировали согласно методике ГОСТ 18301–72 Определение остаточного озона [15].

Определение проводилось последовательно, изначально была измерена концентрация озона при работе всех трех озонаторов, затем был выведен из работы озонатор № 1 и замерена концентрация смеси из озонаторов № 3+№ 4, далее измерили концентрации по отдельности для

№ 3 и № 4. Для озонатора № 1 концентрация озона была найдена как разница между суммарной концентрацией всех озонаторов и концентрацией озонаторов № 3 и № 4.

Второй этап эксперимента основывается на проведении первичного озонирования с помощью лабораторного озонатора марки АМ. Первичное озонирование заключается в обработке исходной природной воды различными дозами озона (0–20 мг/л). Доза зависит от качества исходной природной воды и количества органических соединений, способных окисляться озоном. Вода для эксперимента отбиралась из реки Оки, точка отбора на входе в смеситель. Для эксперимента были выбраны следующие дозировки: 4 мг/л, 6 мг/л, 20 мг/л. Объем проб воды составлял 5 л. Пробы обработанной озоном воды анализировались на следующие показатели: мутность, химическое потребление кислорода (ХПК), перманганатная окисляемость (ПО), общий органический углерод (ООУ), остаточный озон, цветность, общее железо, формальдегид. В качестве приборной базы использовались: УФ-спектрофотометр, анализатор общего органического углерода.

Третий этап эксперимента заключался в проведении вторичного озонирования с помощью лабораторного озонатора. Для проведения эксперимента отбиралась подготовленная (фильтрованная) вода. Производительность озонатора составляла 5 г/ч по озону. Были апробированы следующие дозы: 0,5 мг/л, 1,5 мг/л, 4 мг/л, 6 мг/л, 12,5 мг/л, 20 мг/л, 60 мг/л. Методика эксперимента заключалась в следующем: из пробоотборника отбиралась проба воды в объеме 5 л и продувалась озоном в течение расчетного времени с учетом дозы и производительности озонатора. По окончании продувки отбирались пробы воды на определение следующих показателей: ХПК, биологическое потребление кислорода (БПК), ПО, ООУ, остаточный озон, остаточный хлор, цветность, железо общее, формальдегид.

Результаты эксперимента

Результаты первого этапа экспериментальных исследований представлены в табл. 1.

По паспортной документации максимальная концентрация озона со всей озонаторной установки при максимальном режиме работы должна быть 8 кг/ч. Результаты экспериментальных исследований показали, что озонаторы производят озона меньше на 40 % от заявленной нормы. Результаты второго этапа экспериментальных исследований представлены в табл. 2.

Таблица 1. Результаты измерения концентрации озона в озono-воздушной смеси действующих озонаторов
Table 1. The results of measuring the concentration of ozone in the ozone-air mixture of active ozonators

Озонатор	Концентрация озона, кг/ч	Расход воздуха, м ³ /ч/ Напряжение кВт
№ 1+№ 3+№ 4	4,14	750 30/40/40
№ 3+№ 4	3,13	500 40/40
№ 3	1,49	250/ 40
№ 4	1,68	250/40
№ 1	1,01	30

Таблица 2. Результаты эксперимента по озонированию (первичному) исходной речной воды

Table 2. The results of the experiment on ozonation (primary) of the source river water

Конц. О ₃ , мг/л	Ост. О ₃ , мг/л	Цвет., град.	Мутность, мг/л	Железо общ., мг/л	ПО, мгО/л	ООУ, мг/л	ХПК, мО/л	Формальдегид, мг/л
Хол		15	12,8	0,87	7,56	6,18±1,05	40±12	<0,02
4	0,2	10	11,2	0,76	7,13	6,29±1,32	40±12	0,16±0,05
6	0,4	8,75	14,5	1,14	6,8	6,43±1,32	40±12	0,16±0,05
20	0,6	7,5	10,4	0,94	6,3	6,92±1,45	46±14	0,24±0,07

По результатам эксперимента видно, что озонирование не снижает показатели: ХПК, ООУ. Такие показатели, как ПО, мутность, цветность, снижаются. Снижение мутности объясняется флокулирующим эффектом, в данном случае подразумевается явление мицеллизации – демиллизации. Но по полученным результатам видно, что при дозировке 6 мг/л мутность стала выше. При дозе 6–7 мг/л наблюдается обратный процесс, после озонирования количество взвешенных веществ увеличивается в 1,5 раза, что ухудшает условия их осаждения.

Показатель цветности снижается при увеличении концентрации озона. Цветность обусловлена наличием гуминовых коллоидных веществ, придающих воде специфическую окраску, характеризующихся наличием длинных цепочек молекул органических веществ, включающих ароматические кольца и двойные углеродные и азотные связи. Действие озона на органические компоненты приводит к разложению их структуры. Воздействие озона на окрашенные молекулы сопровождается быстрым обесцвечиванием за счет разрыва двойных связей и мостиков между молекулами. При организации первичного озонирования за счет коагулирующего действия снижается дозировка основных химических реагентов (коагулянта и флокулянта). Также, учитывая обеззараживающее действие процесса озонирования, снижается доза хлорсодержащих реагентов. Но при увеличении концентрации озона также повышается содержание формальдегида как побочного продукта окисления, что крайне нежелательно в технологии подготовки воды питьевого качества. Поэтому при проектировании технологии очистки воды с первичным озонированием необходимо предусмотреть сорбционную очистку от формальдегидных соединений. Наилучшей сорбционной способностью обладают активные древесные угли, в данном случае подходит процесс «углевания» с порошкообразным углем. Поэтому для проведения первичного озонирования предлагают следующую технологию подготовки воды: первичное озонирование (3–5 мг/л) – «углевание» порошкообразным активным углем (10–15 мг/л) – реагентная обработка коагулянтом и флокулянтом – отстаивание – механическое фильтрование – вторичное хлорирование дозы 2–6 мг/л – резервуар чистой воды (РЧВ) (рис. 2) [16].

Результаты третьего этапа экспериментальных исследований представлены в табл. 3.

По результатам эксперимента видно, что процесс озонирования влияет на цветность и мутность, а также содержание остаточного хлора снижается в пределах нормативного значения 1–3 г/л. В ходе эксперимента определили, что значения показателей ПО, ХПК, ООУ значительно не снижаются.

Показатель БПК после первых минут обработки может быть увеличен, данное явление объясняется деполимеризацией молекул гуминовых веществ, которые становятся более по-

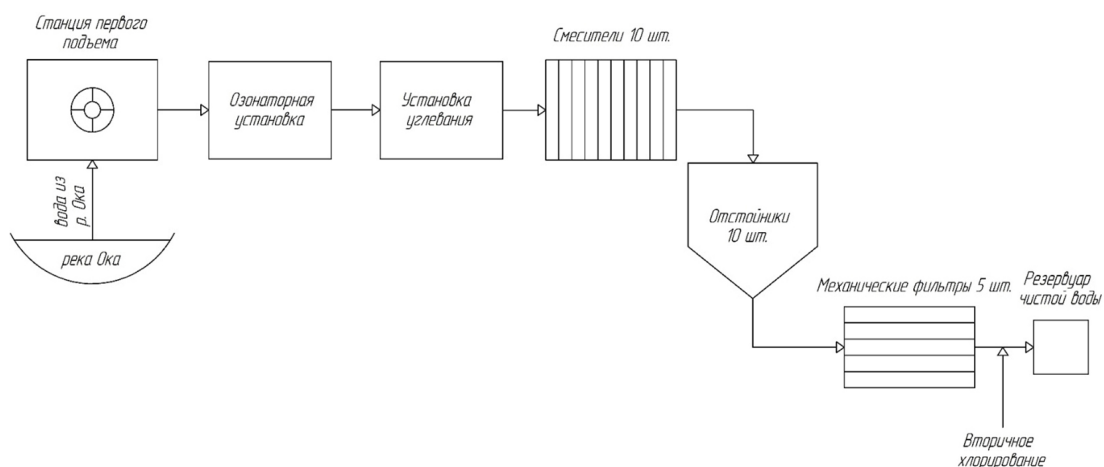


Рис. 2. Технология подготовки воды с первичным озонированием

Fig. 2. Water treatment technology with primary ozonation

Таблица 3. Результаты эксперимента по озонированию (вторичному) фильтрованной воды

Table 3. The results of the experiment on ozonation (secondary) of filtered water

Конц. O_3 , мг/л	Ост. O_3 , мг/л	Цвет., град.	Мут- ть, мг/л	Ост. хлор, мг/л	Железо общ., мг/л	ПО, мгО/л	ООУ, мг/л	ХПК, МО/л	Формаль- дегид, мг/л	БПК мг O_2 /дм 3
Хол	-	6,0	0,58	-	<0,1	2,77	3,79±0,8	28±9	<0,02	-
0,5	0,49	4,2	0,01	1,6	<0,1	2,57	4,25±0,89	29±9	-	1,0±0,3
1,5	0,77	6,88	0,24	-	<0,1	2,9	3,84±0,81	30±9	-	-
4	0,98	3,7	0,01	1,46	<0,1	2,61	3,94±0,83	31±9	0,09±0,019	-
6	0,48	4,17	0,11	-	<0,1	2,85	3,89±0,82	30±9	-	-
12,5	0,77	3,55	0,1	-	<0,1	2,61	3,95±0,83	29±9	-	-
20	1,08	2,5	0,00	1,17	<0,1	2,65	4,56±0,96	31±9	0,09±0,020	0,5±0,13
60	0,72	1,05	0,09	-	<0,1	2,38	3,86±0,81	25±7	-	-

датливыми к биологическому окислению. В данном случае происходит снижение показателя БПК с увеличением концентрации озона. Учитывая сильное окисляющее действие озона после вторичного озонирования, рекомендована установка угольных фильтров для снижения концентрации окисленных органических соединений (формальдегиды), которые являются канцерогенами. После фильтрации необходим постоянный контроль за содержанием формальдегида в воде. Технологическая схема с включением установки озонирования с последующей механической фильтрацией имеет вид: станция первого подъема – реагентная обработка коагулянтном и флокулянтном в смесителях – отстойники – механическая фильтрация – установка озонирования (6–10 мг/л) – механическая фильтрация на угольных фильтрах – РЧВ (рис. 3) [16].

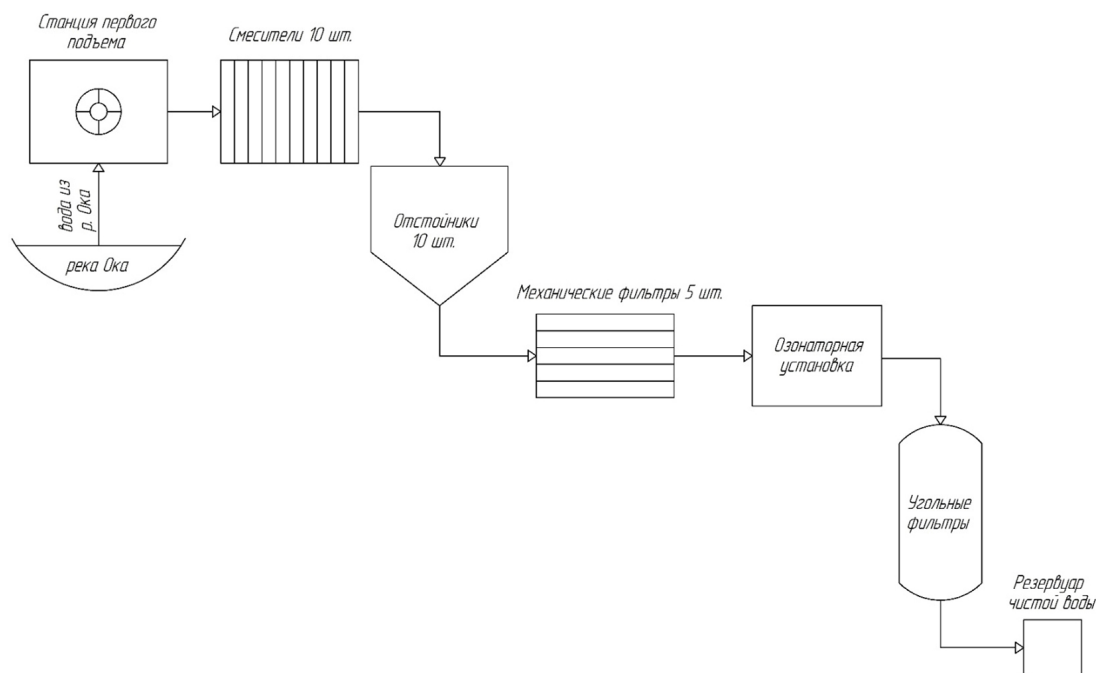


Рис. 3. Технология подготовки воды с озонированием

Fig. 3. Technology of water treatment with ozonation

Заключение

Результаты экспериментальных исследований показали, что процесс озонирования не снижает содержание остаточного хлора ниже требований нормативной документации на питьевую воду, поэтому повторное хлорирование не требуется. Также при корректной настройке работы можно частично отказаться от первичного хлорирования или уменьшить дозу хлора, но исключить обеззараживание хлором не представляется возможным. Причина в том, что озон быстро разлагается в воде и не обладает длительным бактерицидным действием.

Озонирование, применяемое как самостоятельная ступень в технологии очистки воды, не всегда позволяет до конца решить задачу повышения качества воды. Все же после озонирования возникает потребность в проведении сорбционной очистки воды с использованием порошкообразных или гранулированных дробленых активных углей, загруженных в сорбционные фильтры (применение при кратковременном ухудшении качества исходной воды в водоисточнике). Также сорбционная очистка позволяет очистить воду от продуктов окисления органических веществ озоном, к таким соединениям относятся: формальдегид, ацетальдегид, глиоксаль и метилглиоксаль. В работе представлена технологическая схема подготовки воды с включением угольных фильтров.

Эксперименты по первичному озонированию показали, что обработка озоном способствует увеличению образования побочных продуктов – формальдегида, чем больше содержание органических веществ в воде, тем больше образуется формальдегида, который опасен для здоровья. Поэтому первичное озонирование возможно проводить, но с дополнительной сорбционной очисткой на активных порошкообразных углях, которые хорошо «снимают» побочные

продукты. Первичное озонирование с дозами 3–5 мг/л также может быть использовано для улучшения процесса коагуляции-флокуляции. Более высокие дозы озона не допустимы, так как происходит обратный эффект, согласно экспериментальным данным. На основании полученных результатов предложена технологическая схема, включающая озонаторную станцию и установку «углевания».

Также доказано, что озонирование положительно влияет на органолептические характеристики, снижаются показатели цветности и мутности. По полученным данным, влияние озона на ХПК и ООУ не выявлено, что является логичным, так как в процессе озонирования происходит окисление органических соединений и меняется их структура, а количественное содержание остается на прежнем уровне.

Выводы

На основании результатов экспериментальных исследований можно сделать вывод, что озонаторные установки на станциях очистки работают с уменьшенной выходной концентрацией озона. Причиной является возможный износ оборудования и распределительной системы. Процесс озонирования служит эффективным методом, который можно использовать для обеззараживания воды. Но данная технология эффективна в комбинировании с хлорированием, так как отказаться полностью от хлорирования не представляется возможным.

Список литературы / References

[1] Драгинский В. Л., Алексеева Л. П., Самойлович В. Г. *Озонирование в процессах очистки воды*, М.: ДеЛи принт, 2007, 400. [Draginsky V. L., Alekseeva L. P., Samoilovich V. G. *Ozonation in water purification processes*, Moscow, Delhi Print, 2007, 400 (in Rus.)].

[2] Ковалев Р. А., Шейнкман Л. Э., Дергунов Д. В. Повышение эффективности очистки сточных вод угольных предприятий, содержащих фенольные соединения, *Известия ТулГУ. Естественные науки*, 2011, 3, 276–284. [Kovalev R. A., Sheinkman L. E., Dergunov D. V. Improving the efficiency of wastewater treatment of coal enterprises containing phenolic compounds, *Izvestia TulsU. Natural Sciences*, 2011, 3, 276–284 (in Rus.)].

[3] Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2009 году», М.: Центр «Минерал» ФГУНПП «Аэрогеология», 2010, 400. [State report «On the state and use of mineral resources of the Russian Federation in 2009», Moscow, Center «Mineral» FGUNPP «Aerogeologiya», 2010, 400].

[4] Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2009 году», М.: ООО «РППР РусКонсалтингГрупп», 2010, 523. [State Report «On the state and environmental protection of the Russian Federation in 2009», Moscow, LLC «RPPR RusConsultingGroup», 2010, 523].

[5] Соколов Э. М., Шейнкман Л. Э., Дмитриева Т. В., Чернова М. В., Дергунов Д. В. Исследование деградации фенольных соединений в водных системах под действием физико-химических факторов, *Безопасность жизнедеятельности*, 2009, 4, 25–32. [Sokolov E. M., Sheinkman L. E., Dmitrieva T. V., Chernova M. V., Dergunov D. V. Investigation of degradation of phenolic compounds in aquatic systems under the influence of physico-chemical factors, *Life safety*, 2009, 4, 25–32 (in Rus.)].

[6] Кузубова Л.И., Кобрина В.Н. Химические методы подготовки воды (хлорирование, озонирование, фторирование), *Экология. Серия аналитических обзоров мировой литературы*, 1996, 42, 1–132. [Kuzubova L. I., Kobrina V. N. Chemical methods of water treatment (chlorination, ozonation, fluorination), *Ecology. A series of analytical reviews of world literature*, 1996, 42, 1–132 (in Rus.).]

[7] Волкова Г. А., Ануфриев В. Н. Особенности методов обработки поверхностных вод озонированием и активированным углем, *Инновационные технологии в водном, коммунальном хозяйстве и водном транспорте: Материалы республиканской научно-технической конференции*. Минск: БНТУ, 2021, 1, 81–86 [Volkova G. A., Anufriev V. N. Features of surface water treatment methods by ozonation and activated carbon, *Innovative technologies in water, municipal services and water transport: Materials of the Republican scientific and technical conference*. Minsk: BNTU, 2021, 1, 81–86 (in Rus.).]

[8] Гончаренко Б. И., Пуресев Н. И., Рязанов В. А. Установка для обработки воды озоном и способы его дозирования (варианты). Патент России № 2553949. 2015. [Goncharenko B. I., Puresev N. I., Ryazanov V. A. Installation for water treatment with ozone and methods of its dosing (options). Russian Patent No. 2553949. 2015 (in Rus.).]

[9] Заяц Е. Д., Шляжко О. В., Белов С. Г., Наумчик Г. О. Подготовка бутилированной питьевой воды методом озонирования, *Инженерно-экологические аспекты и перспективы развития систем водоснабжения и водоотведения: сборник научных статей Международной научно-практической конференции молодых учёных, приуроченной ко Всемирному дню Водных ресурсов*. Брест: БрГТУ, 2024, 1, 32–37. [Zayats E. D., Shlyazhko O. V., Belov S. G., Naumchik G. O. Preparation of bottled drinking water by ozonation, *Engineering and environmental aspects and prospects for the development of water supply and sanitation systems: a collection of scientific articles of the International Scientific and Practical Conference of Young Scientists dedicated to World Water Day*. Brest: BSTU, 2024, 1, 32–37 (in Rus.).]

[10] Гончарук В. В., Потапченко Н. Г. Обеззараживание воды озоном. Влияние неорганических примесей на кинетику обеззараживания воды, *Химия и технология воды*, 2001, 23, 2, 198–208. [Goncharuk V. V., Potapchenko N. G. Disinfection of water with ozone. The effect of inorganic impurities on the kinetics of water disinfection, *Chemistry and Technology of water*, 2001, 23, 2, 198–208 (in Rus.).]

[11] Белов С. Г., Наумчик Г. О. Разработка метода точного дозирования высоких удельных доз озона при обработке воды, *Вестник БрГТУ. Серия: Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология*, 2011, 2, 73–81. [Belov S. G., Naumchik G. O. Development of a method for precise dosing of high specific doses of ozone in water treatment, *Bulletin of BrGTU. Series: Water Management Construction, Thermal Power Engineering and Geoecology*, 2011, 2, 73–81 (in Rus.).]

[12] Гриневич В. И., Извекова Т. В., Пластинина Н. А., Шурэнцэцэг Х. Очистка природных вод озонированием и в диэлектрическом поверхностно-барьерном разряде, *Известия ВУЗов. Химия и химическая технология*, 2009, 9, 110–112. [Grinevich V. I., Izvekova T. V., Plastinina N. A., Shurentsetseg H. Purification of natural waters by ozonation and in a dielectric surface barrier discharge, *Proceedings of Universities. Chemistry and Chemical Technology*, 2009, 9, 110–112 (in Rus.).]

[13] Гриневич В. И., Гушин А. А., Пластинина Н. А. Деструкция фенола и синтетических поверхностно-активных веществ под действием озона, *Известия высших учебных за-*

ведений. *Химия и химическая технология*, 2008, 51, 6, 86–90. [Grinevich V.I., Gushchin A.A., Platinina N.A. Destruction of phenol and synthetic surfactants under the action of ozone, *Proceedings of higher educational institutions. Chemistry and Chemical technology*, 2008, 51, 6, 86–90 (in Rus.)].

[14] Крупнов Е.И., Кормашова Е.Р., Ковшиков Р.С., Захарченко А.С. Анализ проблем очистки воды озонированием, *Информационная среда вуза*, 2016, 1(23), 420–423. [Krupnov E.I., Kormashova E.R., Kovshikov R.S., Zakharchenko A.S. Analysis of water purification problems by ozonation, *Information environment of the university*, 2016, 1(23), 420–423 (in Rus.)].

[15] ГОСТ 18301–72. Вода питьевая. Методы определения содержания остаточного озона. Дата введения 1974–01–01.

[16] Филимонова А.А., Власова А.Ю., Чичирова Н.Д., Камалиева Р.Ф. Апробирование гибридной технологии с использованием порошкообразного сорбента для получения воды питьевого качества в периоды ухудшения показателей водоисточника, *Журнал СФУ. Техника и технологии*, 2024, 17(2), 148–161. [Filimonova A.A., Vlasova A. Yu., Chichirova N.D., Kamaleeva R. F. Testing of hybrid technology using powdered sorbent to obtain drinking-quality water during periods of deterioration of water source indicators, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2024, 17(2), 148–161 (in Rus.)].