

ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 628.544

DOI 10.52928/2070-1683-2024-37-2-87-95

АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ ДЕЗИНФЕКЦИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ
ВОДНЫМИ РАСТВОРАМИ ОЗОНА И ГИПОХЛОРИТА НАТРИЯ

*А.В. ПОСПЕЛОВ¹⁾, М.А. КОМАРОВ²⁾, Н.Г. КОРОБ³⁾, А.Н. ХОТЬКО⁴⁾
(¹⁻³⁾ Белорусский государственный технологический университет, Минск,
⁴⁾ филиал БГТУ «Белорусский государственный колледж промышленности
и строительных материалов», Минск)*

Водные растворы озона представляют перспективную альтернативу хлорсодержащим дезинфицирующим веществам, что подтверждено предыдущими исследованиями. Дезинфекция поверхностей остается малоизученной областью. В статье рассматриваются технические аспекты использования озона и гипохлоритов, включая генерацию озона, растворение в воде, контроль параметров, деструкцию озона, эффективность инактивации микроорганизмов и безопасность. Результаты исследования указывают на преимущества использования озона. Важно также формирование микро- и нанопузырьков при дезинфекции озоном. Период полураспада озона в 20 минут обеспечивает высокую эффективность инактивации микроорганизмов и отсутствие необходимости последующей деструкции остаточного озона. Сравнение с гипохлоритами показывает существенное превосходство озона в инактивации микроорганизмов на различных поверхностях. Это позволяет сократить время дезинфекции и уменьшить коррозию материалов. Экономические показатели использования озона сравнимы с хлорсодержащими реагентами, при этом экологические характеристики озона значительно лучше. Исследование подчеркивает техническую и экологическую целесообразность применения озона для дезинфекции поверхностей, предоставляя важные данные для разработки соответствующих технологий.

***Ключевые слова:** дезинфекция поверхности, технические аспекты, растворение озона, деструкция озона, инактивация.*

Введение. В ходе анализа литературных источников было выявлено, что большинство работ посвящено изучению инактивации различных микроорганизмов в объеме. При этом исследований об эффективности инактивации микроорганизмов на поверхностях очень мало, а тем более сравнительного анализа инактивации на поверхности различных материалов. Также только единичные работы позволяют сравнительно оценить эффективность дезинфекции поверхностей с использованием различных веществ. В опубликованных ранее исследованиях было показано, что водные растворы озона являются перспективной альтернативой хлорсодержащим дезинфицирующим веществам. Использование таких веществ может вызвать негативные последствия для экосистемы на всех этапах жизненного цикла [1–4]. С технической точки зрения использование озона в качестве дезинфицирующего средства обладает рядом преимуществ [8–11]. Также быстрая и эффективная инактивация микроорганизмов снижает разрушительное воздействие на материал обрабатываемых поверхностей [12–17].

Разработка технологических подходов к использованию озона для дезинфекции поверхностей состоит из нескольких ключевых этапов, которые необходимо учитывать [18–22]. Эти этапы включают в себя вопросы генерации озона (из воздуха или кислорода) и растворения озона в воде (многочисленные аспекты массопереноса из газовой фазы в жидкую); контроль параметров (температура, pH, концентрация озона); деструкцию озона в воде; эффективность инактивации микроорганизмов (вирусы, бактерии, грибы, время обработки для достижения требуемого эффекта инактивации); безопасность и ряд других.

В настоящей статье приведены данные, суммирующие предыдущие исследования в этой области, сопровождаемые новыми результатами, полученными авторами. Цель исследования заключалась в анализе технических аспектов дезинфекции поверхностей водными растворами озона и гипохлоритами.

Методология исследований. Для исследований по насыщению озоном водопроводной воды, а также изучению кинетики деструкции озона в воде использовали водонапорную колонну высотой 3 м и диаметром 20 см. Насыщение озоном проводили при помощи озонатора с расходом озono-воздушной среды на выходе 13,2 л/мин и концентрацией озона в газовой смеси 2,7 г/м³. Концентрация озона в воде определялась по ГОСТ 18301-72.

Основные выводы по сравнительной эффективности инактивации микроорганизмов различных видов на металлических и полимерных поверхностях были сделаны на основании неопубликованных работ, выполненных авторами.

Основные выводы по коррозии поверхностей сделаны на основании опубликованных работ авторов. Дополнительный сравнительный анализ влияния озона и гипохлорит иона на коррозию низкоуглеродистой стали выполнен на атомно-силовом микроскопе с анализом шероховатости и потенциала поверхности.

Основная часть. Озон имеет высокий окислительно-восстановительный потенциал равный 2,07 В (для сравнения у $\text{Cl}_2 - 1,36$ В, у $\text{O}_2 - 1,23$ В), что является главной причиной его активности по отношению к различного рода загрязнениям воды, включая широкий спектр вирусов (SARS-CoV-1, MCoV, HSV-1 и BoHV, HAV, Poliovirus Type 1), бактерий (*Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus*, *Enterococcus hirae*, *Streptococcus*, *Staphylococcus*, *Aerococcus* и др.), грибов (*Microsporum canis*, *Microsporum gypseum*, *Trichophyton rubrum*, *Trichophyton interdigitale*, *Candida albicans*, *Aspergillus brasiliensis*).

В работе [23] было показано, что уровень остаточного озона 0,4 мг/л и воздействие в течение 4–6 мин являются достаточной гарантией для инактивации полиовирусов. Кроме того, в данной работе было введено понятие «С·Т» – критерия, который входит в так называемый закон Ватсона [23]:

$$\log_{10} (N_0/N) = k \cdot C \cdot t / 2,303,$$

где N_0 и N – концентрация микрофлоры в начальный (0) и текущий (t) момент времени;

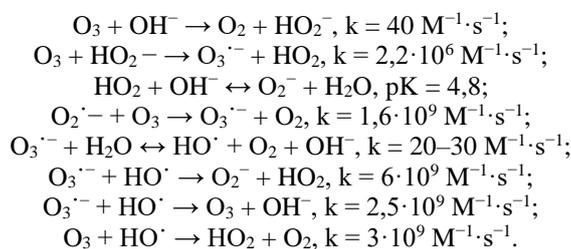
C – концентрация озона в дезинфицирующем растворе;

t – время обработки, мин;

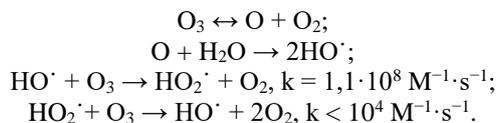
k – константа скорости псевдопервого порядка инактивации микроорганизма озоном, л/(мг·мин).

Ниже представлены реакции озона, происходящие в щелочной и кислотной среде.

В щелочной среде:



В кислотной среде:



В настоящее время критерий С·Т является общепризнанным. Конечно, недостатками озонирования является отсутствие консервирующего эффекта и, следовательно, опасность последующего инфицирования объема воды. Однако для быстрой и эффективной дезинфекции поверхности озон представляет прекрасную альтернативу хлорсодержащим и органическим дезинфицирующим веществам.

Перед проектированием установки дезинфекции с использованием озона необходимо выделить целевые микроорганизмы, которые требуется инактивировать на поверхностях, а также оценить их чувствительность к озону, чтобы определить необходимые концентрации и время обработки. Все исследования показывают высокую эффективность озона в сравнении с хлорсодержащими дезинфицирующими веществами.

Необходимо выбрать генератор озона, который может создавать достаточное количество озона для эффективной дезинфекции. Генераторы озона могут быть классифицированы по разным критериям, включая принцип работы, назначение и тип применения. При использовании озона для насыщения воды с целью последующей дезинфекции по принципу работы озонатор должен генерировать озон методом коронный. Этот тип генераторов создает озон путем применения электрического разряда кислорода в воздухе или чистом кислороде. Генераторы, работающие на кислороде, дают большую концентрацию озона в газовой смеси на выходе. В нашей работе мы показали, что концентрации озона в воде 0,5 мг/л достаточно для проведения эффективной дезинфекции. При этом могут использоваться как промышленные, так и небольшие генераторы, в зависимости от объемов насыщаемой воды. Также это могут быть как стационарные системы, так и мобильные, например, для дезинфекции водозаборных скважин и т.п.

При проектировании установок по насыщению воды озоном необходимо обеспечить максимальное его поглощение или повторное использование озоновооздушной смеси с целью максимально-эффективного использования озона, так как он относится к веществам первого класса опасности.

Как видно на рисунке 1, в процессе насыщения пузырьки, содержащие озono-газовую смесь, имеют разные свойства в зависимости от их размера. В частности, крупные пузырьки, известные как макропузырьки, быстро поднимаются прямо к поверхности жидкости, где они лопаются. По сравнению с обычными большими пузырьками, микропузырьки обладают несколькими интересными особенностями, такими как более долгое нахождение в водных растворах из-за низкой скорости подъема и большей площади границы раздела газ-жидкость и, что наиболее важно, образование гидроксильных радикалов при их коллапсе, что обеспечивает окислительную способность и делает растворение проще. В частности, данное свойство микропузырьков – высокая площадь поверхности на единицу объема – использовалось для разложения органических загрязнителей и дезинфекции воды. Тем

не менее, было обнаружено, что они нестабильны в течение определенного периода времени (~мин), медленно поднимаясь к поверхности жидкости. Пузырьки меньшего размера, чем микропузырьки, классифицируемые как нанопузырьки, демонстрируют примечательную стабильность, приводящую к долгому времени нахождения в воде. Нанопузырьки могут оставаться стабильными в водном растворе в течение длительного периода времени (недель) из-за их незначительной плавучести и превосходной устойчивости к коалесценции. Учитывая их уникальные характеристики, они улучшают массоперенос и окислительную способность, потому что площадь контакта газ/жидкость увеличивается. Более того, растворимость газа и химические реакции на границе раздела газ-жидкость значительно улучшаются. Подытоживая, можно сказать, что с уменьшением размера пузырьков увеличивается массоперенос, уменьшается скорость подъема пузырьков, увеличиваются устойчивость и энергия схлопывания пузырька.

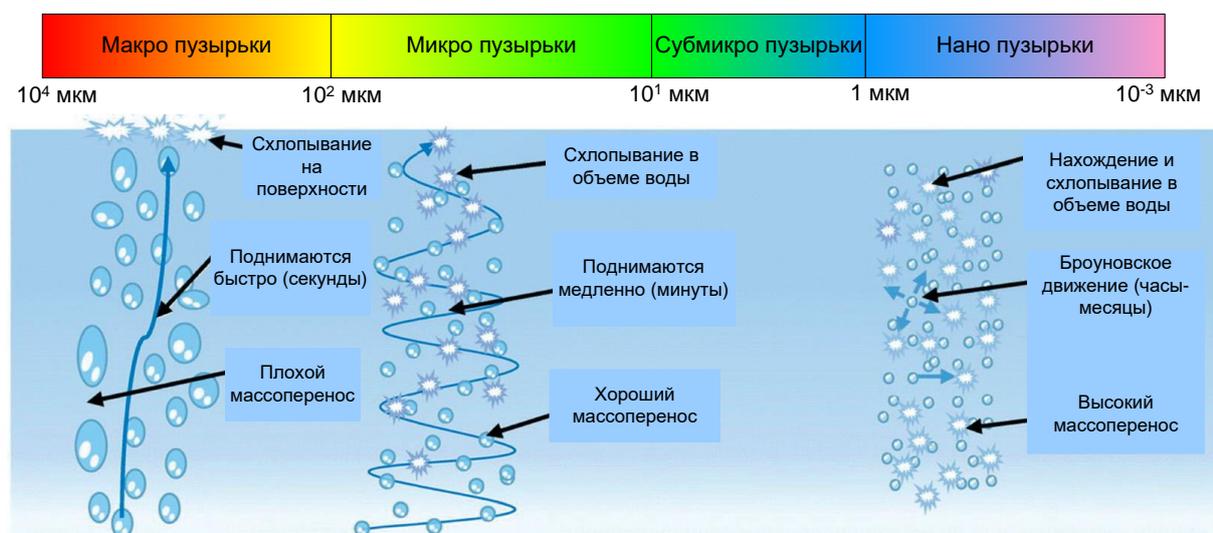


Рисунок 1. – Влияние размеров газовых пузырьков на их свойства в жидкости

Размеры пузырьков газа, образующихся при использовании керамических аэраторов, составляют до 5 мм, и в случае поднятия роя пузырьков при размерах до 3 мм скорость всплытия составляет до 20 см/с, и при размерах 3–5 мм остается 20 см/с. Тогда можно представить график зависимости времени поднятия пузырьков газа по высоте столба жидкости (рисунок 2).

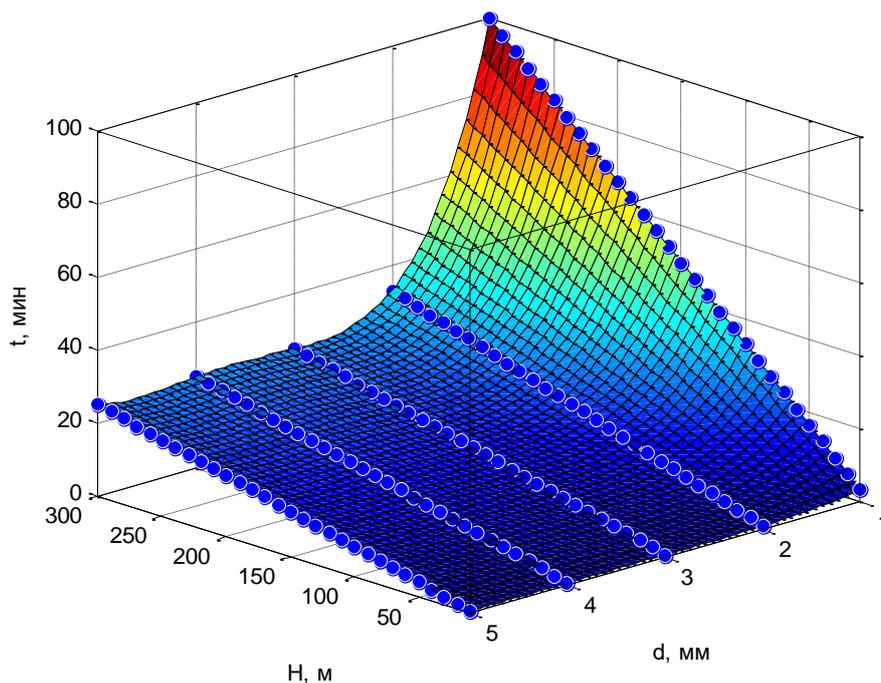


Рисунок 2. – Расчетное время поднятия пузырьков газа в зависимости от их размера и высоты слоя жидкости

График показывает, что при обработке воды в скважине ограничивающим фактором по времени является время поднятия пузырьков газовой смеси диаметром менее 2,5 мм. Для пузырьков этого размера и высоты слоя жидкости более 150 м полное разложение озона происходит до того, как газовые пузырьки достигнут поверхности. В таких случаях предлагается проводить обработку в два этапа, разделяя высоту столба жидкости на две части и начиная обработку с нижней части, затем переходя к обработке верхней части. Например, при высоте слоя жидкости 200 м рекомендуется обработать скважину сначала в фильтровой зоне, а затем на глубине 100 м от статического уровня. В обоих случаях после прекращения подачи озона в скважину рекомендуется выдерживать ее закрытой не менее 20 минут для полной деструкции озона и обеспечения дезинфекции от статического уровня до оголовка.

Также важным аспектом является тот, что деструкция озона в воде происходит достаточно быстро. Период его полураспада зависит от температуры и составляет около 20 мин при температуре воды 20 °С. С точки зрения работы с веществом первого класса опасности это является положительным фактором, так как достаточно продержат его в системе около 30–40 мин, чтобы обеспечить полную деструкцию. С другой стороны, это значительно ограничивает его использование, например, в случае дезинфекции трубопроводов. Однако известно, что можно продлить период полураспада до 1–2 часов, подкисляя воду, к примеру, углекислым газом. На рисунке 3 представлена зависимость деструкции озона от времени при 20 °С в колонне высотой 3 м (насыщение воды озоном проводилось в стационарном режиме с нижней части колонны, вода подавалась из водозаборной скважины).

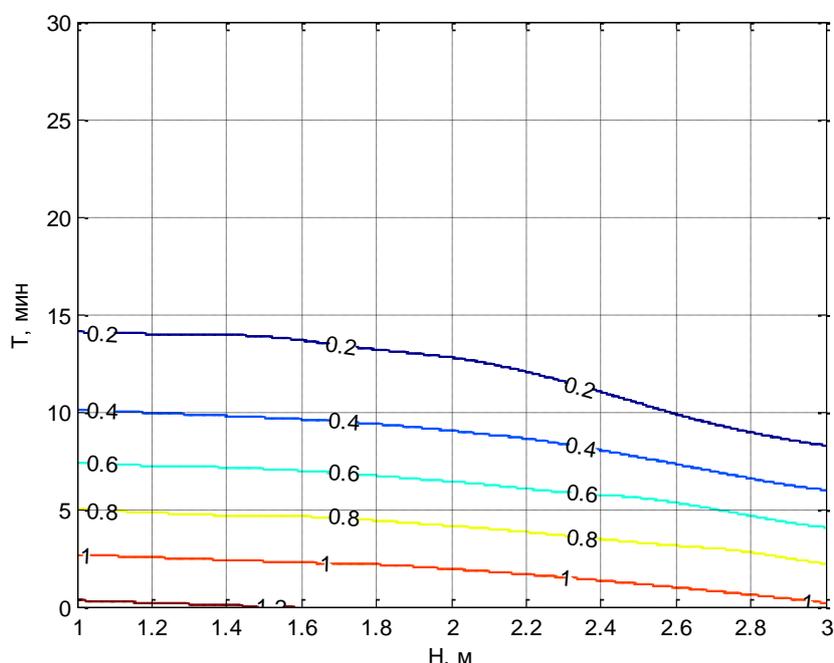


Рисунок 3. – Деструкция растворенного озона в воде по высоте столба жидкости

Уравнение кинетики деструкции первого порядка имеет вид

$$C = C_0 \cdot e^{-kt},$$

где C – концентрация озона по истечении времени t , мг/л;

C_0 – начальная концентрация озона, мг/л;

k – константа реакции первого порядка.

Период полураспада растворенного озона $t_{1/2}$ определяется как

$$t_{1/2} = 0,693/k.$$

Используя $t_{1/2} = 8,75$ мин и найдя значение $k = 0,0792$ мин⁻¹, получим окончательное уравнение, имеющее вид:

$$C = C_0 \cdot e^{-0,0792 \cdot t}.$$

Разложение газообразного озона в растворенной форме зависит от нескольких факторов, включая ХПК, наличие неорганических ионов, природу обрабатываемой среды/поверхности, температуру и pH воды, и характеризуется сложными реакциями, возникающими спонтанно, что может значительно затруднять оценку механизма деструкции растворенного в воде озона.

В ходе выполнения исследований показано, что при дезинфекции низкоуглеродистой стали она активно корродировала во всех растворах с pH 7,5 и выше, однако наиболее сильная коррозия наблюдалась в растворах

гипохлорита с самой высокой концентрацией. Обработка озоном вызвала значительно меньшую коррозию по сравнению с обработкой гипохлоритом натрия или кальция с концентрацией активного хлора выше 50 мг/л. Хлорсодержащие соединения задерживаются в продуктах коррозии, дефектах и трещинах после дезинфекционной обработки поверхности гипохлоритом и, как было показано, влияют на pH и потенциал воды после промывки. Захваченные хлорсодержащие соединения могут влиять на коррозию стали после дезинфекции. Количество выделенного и растворимого железа в растворах водопроводной воды было существенно ниже (около 1%) по сравнению с общей окисленной массой железа в данных условиях эксперимента, что хорошо согласуется с химическим моделированием. Оценка воздействия на жизненный цикл показала, что использование озона оказывает наименьшее негативное воздействие на окружающую среду, тогда как гипохлорит кальция – наибольшее.

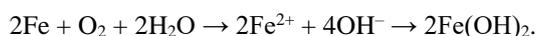
При проведении дезинфекции углеродистых сталей с одинаковой концентрацией активного хлора в исходных дезинфицирующих растворах электрохимические измерения показывают, что наибольшее коррозионное воздействие наблюдается при использовании растворов гипохлорита натрия. Тем не менее, весовые измерения демонстрируют, что наибольшая потеря массы происходит в растворах гипохлорита кальция, что, возможно, связано с более высокими значениями pH раствора гипохлорита натрия и некоторой пассивацией поверхности сталей.

Для нержавеющей стали с одинаковой концентрацией активного хлора в исходных дезинфицирующих растворах наибольшее коррозионное воздействие тоже проявляется при использовании растворов гипохлорита натрия и гипохлорита кальция, а также хлорной извести. Наибольшее вымывание элементов и наибольшие показатели шероховатости вызывают растворы гипохлорита кальция. Эффективность насыщенного раствора озона, измеренная электрохимическими показателями, приближается к питьевой воде, при этом токи коррозии в растворе озона оказываются ниже, чем в воде. Для нержавеющей стали использование насыщенной озона воды не приводит к вымыванию элементов, что определено оптико-эмиссионной спектроскопией с индуктивно-связанной плазмой и делает растворенный озон в воде перспективным дезинфицирующим веществом.

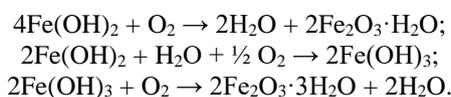
Полученные результаты электрохимических исследований подтверждают, что в процессе дезинфекции озон оказывает меньшее коррозионное воздействие по сравнению с растворами гипохлоритов. Это объясняется тем, что озон образует очень тонкий и плотный слой продуктов коррозии, что в свою очередь способствует снижению коррозии стали по сравнению с растворами гипохлоритов.

Традиционный механизм коррозии стали может быть продемонстрирован следующими реакциями.

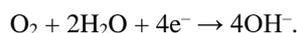
Анодная реакция:



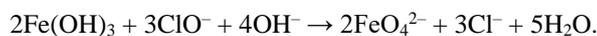
Таким образом, могут образовываться различные виды железосодержащих осадков:



Катодная реакция:



Образование ржавчины (окислей железа) на поверхности стали может создать слой, который частично препятствует диффузии окислителя к поверхности металла, таким образом ограничивая процесс коррозии. Однако в щелочных средах ионы гипохлорита могут взаимодействовать с образовавшимся слоем ржавчины и способствовать его растворению. Это явление часто называется «активацией коррозии» или «растворением ржавчины» и происходит в результате образования комплексов с ионами металла в щелочной среде

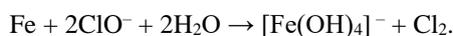


Следовательно, в контексте дезинфекции использование растворов гипохлоритов может сопровождаться активацией коррозии, воздействуя на защитный слой ржавчины и способствуя его растворению. Это одна из причин, по которой озон, создающий тонкий и плотный слой продуктов коррозии, может предпочтительно использоваться для дезинфекции с целью минимизации коррозионных эффектов.

В нейтральной среде ферраты медленно разлагаются



Также может быть предложена прямая реакция железа с ионами гипохлорита:

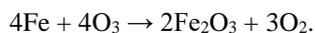


Качественный анализ присутствия ионов железа в растворах после обработки был подтвержден атомно-абсорбционной спектроскопией жидкой фазы.

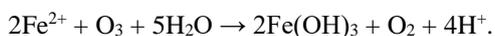
Также следует отметить, что при pH выше, чем нейтральная, Fe^{3+} в растворах может находиться в форме моно- и дигидрокомплексов $[(\text{H}_2\text{O})_5\text{Fe}(\text{OH})]^{2+}$ и $[(\text{H}_2\text{O})_4\text{Fe}(\text{OH})_2]^+$. При концентрациях Fe^{3+} более чем 10^{-3} моль·л⁻¹ могут образовываться такие продукты как $[(\text{H}_2\text{O})_4\text{Fe}-(\text{OH})_2-\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_4]^{4+}$ и $[(\text{H}_2\text{O})_5\text{Fe}-(\text{OH})_2-\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_5]^{4+}$.

По информации о воздействии озона, его молекулы абсорбируются на поверхности стали, после чего происходит их разложение на молекулу кислорода и кислородный радикал. Этот процесс приводит к формированию тонкой пленки ржавчины. Это отличается от механизма действия гипохлоритов, которые, как упоминалось ранее, могут вызывать растворение слоя ржавчины.

Прямое окисление железа непосредственно до Fe_2O_3 :

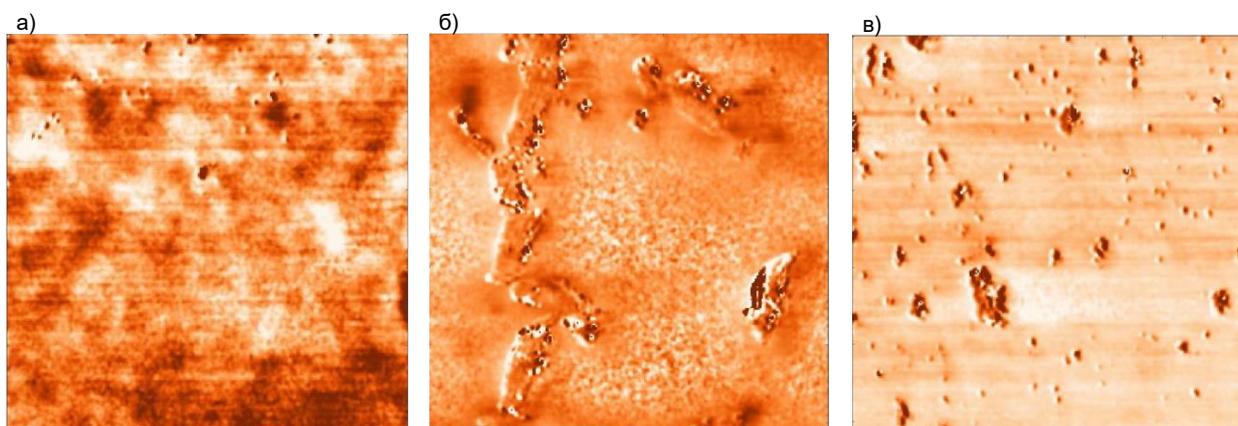


Или участие озона при окислении Fe^{2+} :



Ряд проведенных нами исследований при использовании различных типов стали показывает, что использование озона для дезинфекции поверхностей вызывает в 3,5 и более раз меньше коррозии в сравнении с растворами гипохлоритов.

В качестве наглядного примера представим изменение шероховатости поверхности низкоуглеродистой стали при 20-минутной обработке раствором озона в воде концентрацией 1 мг/л и 1-минутной обработке раствором гипохлорита натрия с концентрацией 150 мг/л по активному хлору (рисунок 4, таблица 1). Результаты получены на атомно-силовом микроскопе.



а) – 20 минут в водопроводной воде; б) – 1 минута в растворе гипохлорита натрия (150 мг/л);
в) – 20 минут в насыщенной (1 мг/л) озоном воде. Размер изображения 1×1 мкм

Рисунок 4. – Изменение шероховатости поверхности низкоуглеродистой стали при обработке

Таблица 1. – Изменение шероховатости поверхности низкоуглеродистой стали при обработке: 20 минут в водопроводной воде, 1 минута в растворе гипохлорита натрия (150 мг/л) и 20 минут в насыщенной (1 мг/л) озоном воде

Параметр	Сталь	ClO^-	aqO_3
Потенциал, мВ	-425 ± 2	-69 ± 8	-223 ± 3
Шероховатость, нм	1,65	25,4	2,7

В работе [24] показано, что среди проанализированных дезинфицирующих веществ интегральная оценка воздействия на окружающую среду уменьшается в ряду гипохлорит кальция > хлорная известь > гипохлорит натрия > раствор озона в воде. На стадии получения дезинфицирующих веществ наибольшее воздействие на окружающую среду оказывают производства гипохлорита кальция и хлорной извести. Основным недостатком всех хлорсодержащих дезинфицирующих веществ является необходимость обеззараживания отработанных растворов и проведения нескольких промывок обрабатываемых поверхностей. Если полностью учитывать рекомендации по процедуре дезинфекции сооружений водоснабжения, то использование озона имеет сравнимые затраты с хлорсодержащими дезинфицирующими веществами.

Заключение. В результате проведения исследований можно сделать следующие выводы:

- для подготовки водных растворов озона достаточно использования генераторов озона, работающих на воздухе;
- при использовании озона для дезинфекции желателен получение микро- и нанопузырьков;
- период полураспада озона составляет около 20 мин, что достаточно для близкой к 100% эффективности инактивации и последующей полной самодеструкции остаточного озона, что исключает необходимость его дополнительного разложения (термического или каталитического);
- эффективность озона для инактивации микроорганизмов на металлических и полимерных поверхностях в сотни раз выше, чем при использовании гипохлоритов;

– за счет высокой эффективности инактивации микроорганизмов на поверхностях требуемое время дезинфекции сильно снижается, что приводит к значительно меньшему коррозионному воздействию на материалы поверхностей (от 3,5 раз и выше);

– экономические показатели использования озона сравнимы с использованием хлорсодержащих реагентов, но при этом экологические показатели использования озона значительно ниже.

Работа выполнена при поддержке ГПНИ «Химические процессы, реагенты и технологии, биорегуляторы и биооргхимия», задания 2.1.02 «Сорбционные, каталитические и мембранные материалы для водоочистки и водоподготовки», НИР 5 «Физико-химические основы коррозии материалов в дезинфицирующих средах и разработка экологичных и высокоэффективных способов дезинфекции» (2021–2023 гг.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Дезинфекция озоном водозаборных скважин и трубопроводов систем питьевого водоснабжения / В.И. Романовский, А.Д. Гуринович, Ю.Н. Чайка и др. // Тр. БГТУ. Химия и технология неорган. в-в. – 2013. – № 3(159). – С. 55–60.
2. Ozone disinfection of water intake wells and pipelines of drinking water supply systems / V.I. Romanouski, A.D. Gurinovich, Yu.N. Chaika et al. // Proceedings of BSTU. Chemistry and technology of inorganic substances. – 2013. – № 3(159). – P. 51–56.
3. Hurynovich A.D., Romanouski V.I., Wawrzeniuk P. Analiza efektywności kaskadowego generatora ozonu // *Economia i środowisko*. – 2013. – № 1(44). – S. 156–164.
4. Исследование технических характеристик турбоозонатора с высокочастотным резонансным электроионизационным генератором озона / В.И. Романовский, А.Д. Гуринович, И.Д. Куницкая и др. // *Водоочистка*. – 2014. – № 3. – С. 66–69.
5. Романовский В.И., Жилинский В.В., Бессонова Ю.Н. Сравнительный анализ коррозионной устойчивости углеродистых сталей к дезинфицирующим растворам электрохимическим методом // *Вестн. БрГТУ. Водохоз. стр-во, теплоэнергетика и геоэкология*. – 2016. – № 2(98). – С. 126–129.
6. Романовский В.И., Чайка Ю.Н. Коррозионная устойчивость углеродистых сталей к дезинфицирующим растворам // *Тр. БГТУ. Химия и технология неорган. в-в*. – 2014. – № 3(167). – С. 47–50.
7. Romanovski V.I., Chaika Yu.N. Carbon steels corrosion resistance to disinfectants // *Proceedings of BSTU. Chemistry and technology of inorganic substances*. – 2014. – № 3(167). – P. 40–43.
8. Романовский В.И., Жилинский В.В. Коррозионная устойчивость стали 15 к дезинфицирующим растворам // *Тр. БГТУ. Химия и технология неорган. в-в*. – 2015. – № 3(176). – С. 29–34.
9. Коррозия нержавеющей стали в дезинфицирующих растворах / А.В. Поспелов, И.В. Мацукевич, А.А. Касач и др. // *Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Стр-во. Приклад. науки*. – 2023. – № 1(33). – С. 90–93. DOI: 10.52928/2070-1683-2023-33-1-90-93.
10. Коррозия углеродистых сталей в дезинфицирующих растворах / А.В. Поспелов, И.В. Мацукевич, А.А. Касач и др. // *Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Стр-во. Приклад. науки*. – 2022. – № 14(32). – С. 89–93.
11. Efficacy of different concentrations of sodium hypochlorite and chlorhexidine in disinfection of contaminated Resilon cones / V. Zand, A. Salem-Milani, S. Shahi et al. // *Medicina oral, patologia oral y cirugia bucal*. – 2012. – № 17(2). – P. e352. DOI: 10.4317/medoral.17467.
12. The Disinfection Characteristics of Ebola Virus Outbreak Variants / B.W M. Cook, T.A. Cutts, A.M. Nikiforuk et al. // *Sci. Rep.* – 2016. – № 6. – P. 38293. DOI: 10.1038/srep38293.
13. Gallandat K., Wolfe M.K., Lantagne D. Surface cleaning and disinfection: Efficacy assessment of four chlorine types using *Escherichia coli* and the Ebola surrogate Phi6 // *Environmental science & technology*. – 2017. – № 51(8). – P. 4624–4631. DOI: 10.1021/acs.est.6b06014.
14. Романовский В.И., Гуринович А.Д., Вавженюк П. Эффективность использования озона в технологии водоподготовки // *Водоочистка*. – 2014. – № 2. – С. 66–70.
15. Романовский В.И., Лихавицкий В.В., Гуринович А.Д. Исследование растворимости озона в воде по высоте столба жидкости // *Тр. БГТУ. Химия и технология неорган. в-в*. – 2015. – № 3(176). – С. 113–118.
16. Технические аспекты использования озона в водоподготовке / В.И. Романовский, А.Д. Гуринович, Ю.Н. Бессонова и др. // *Вода magazine*. – 2016. – № 2(102). – С. 36–41.
17. Анализ эффективности дезинфекции сооружений питьевого водоснабжения с использованием хлорсодержащих дезинфицирующих средств и озона / В.И. Романовский, М.В. Рымовская, Ю.Н. Бессонова и др. // *Вестн. БрГТУ. Водохоз. стр-во, теплоэнергетика и геоэкология*. – 2015. – № 2(92). – С. 68–71.
18. Романовский В.И., Рымовская И.В., Янь Фэн С. Сравнительный анализ эффективности дезинфекции сооружений водоснабжения дезинфицирующими растворами // *Вода magazine*. – 2015. – № 10(98). – С. 18–21.
19. Определение основных параметров дезинфекции и обеззараживания озона сооружений питьевого водоснабжения / В.И. Романовский, В.В. Лихавицкий, М.В. Рымовская и др. // *Тр. БГТУ. Химия и технология неорган. в-в*. – 2015. – № 3(176). – С. 108–112.
20. Гуринович А.Д., Романовский В.И., Бессонова Ю.Н. Эффективность дезинфекции озоном сооружений систем водоснабжения // *Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение*. – 2016. – № 10. – С. 48–51.
21. Романовский В.И., Бессонова Ю.Н. Сравнительный анализ способов дезинфекции водозаборных скважин и сооружений водоснабжения // *Перспективы развития и организационно-экономические проблемы управления производством: материалы междунар. науч.-техн. конф. В 2 т. / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск: Право и экономика, 2015. – Т. 1. – С. 211–226.*
22. Рымовская М.В., Романовский В.И. Воздействие отработанных растворов дезинфекции сооружений водоснабжения на почву // *Тр. БГТУ. Химия и технология неорган. в-в*. – 2016. – № 4(186). – С. 214–219.
23. Драгинский В.Л., Алексеева Л.П., Самойлович В.Г. Озонирование в процессах очистки воды / под ред. В.Л. Драгинского. – М.: ДеЛи принт, 2007. – 400 с.
24. Romanovski V., Claesson P.M., Hedberg Y.S. Comparison of different surface disinfection treatments of drinking water facilities from a corrosion and environmental perspective // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2020. – № 27(11). – P. 12704–12716.

REFERENCES

1. Romanovskii, V.I., Gurinovich, A.D., Chaika, Yu.N. & Vavzhenyuk, P. (2013). Dezinfektsiya ozonom vodozabornyykh skvazhin i truboprovodov sistem pit'evogo vodosnabzheniya [Disinfection with ozone of water wells and pipelines of drinking water supply systems]. *Tr. BGTU. Khimiya i tekhnologiya neorgan. v-v [Proceedings of BSTU. Chemistry and technology of inorganic substances]*, 3(159), 55–60. (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Romanovskii, V.I., Gurinovich, A.D., Chaika, Yu.N. & Wawzhenyuk, P. (2013). Disinfection with ozone of water wells and pipelines of drinking water supply systems. *Proceedings of BSTU. Chemistry and technology of inorganic substances*, 3(159), 55–60.
3. Hurynovich, A.D., Romanowski, V.I. & Wawrzeniuk, P. (2013). Analiza efektywności kaskadowego generatora ozonu. *Economia i środowisko*, 1(44), 156–164. (In Polish).
4. Romanovskii, V.I., Gurinovich, A.D., Kunitskaya, I.D. & Likhavitskii, V.V. (2014). Issledovanie tekhnicheskikh kharakteristik turboozonatora s vysokochastotnym rezonansnym elektro-ionizatsionnym generatorom ozona [Study of the technical characteristics of a turbo ozonizer with a high-frequency resonant electroionization ozone generator]. *Vodoochistka [Water treatment]*, (3), 66–69. (In Russ., abstr. in Engl.).
5. Romanovskii, V.I., Zhilinskii, V.V. & Bessonova, Yu.N. (2016). Sravnitel'nyi analiz korrozionnoi ustoychivosti uglerodistykh staley k dezinfitsiruyushchim rastvoram elektrokhimicheskim metodom [The comparative analysis of corrosion stability carbonaceous stalya to the elektrokhimicheskim disinfecting solutions by method]. *Vestn. BrGTU. Vodokhoz. str-vo, teploenergetika i geoekologiya [Bulletin of BrSTU. Water management construction, heat power engineering and geoecology]*, 2(98), 126–129. (In Russ., abstr. in Engl.).
6. Romanovskii, V.I. & Chaika, Yu.N. (2014). Korrozionnaya ustoychivost' uglerodistykh staley k dezinfitsiruyushchim rastvoram [Corrosion resistance of carbon steels to disinfectant solutions]. *Tr. BGTU. Khimiya i tekhnologiya neorgan. v-v [Proceedings of BSTU. Chemistry and technology of inorganic substances]*, 3(167), 47–50. (In Russ., abstr. in Engl.).
7. Romanovskii, V.I. & Chaika, Yu.N. (2014). Carbon steels corrosion resistance to disinfectants. *Proceedings of BSTU. Chemistry and technology of inorganic substances*, 3(167), 40–43.
8. Romanovskii, V.I. & Zhilinskii, V.V. (2015). Korrozionnaya ustoychivost' stali 15 k dezinfitsiruyushchim rastvoram [Corrosion resistance of steel 15 to disinfectant solutions]. *Tr. BGTU. Khimiya i tekhnologiya neorgan. v-v [Proceedings of BSTU. Chemistry and technology of inorganic substances]*, 3(176), 29–34. (In Russ., abstr. in Engl.).
9. Pospelov, A.V., Matsukevich, I.V., Kasach, A.A., Komarov, M.A. & Rozhko, S.N. (2023). Korroziya nerzhavayushchikh staley v dezinfitsiruyushchikh rastvorakh [Corrosion of stainless steels in disinfectant solutions]. *Vestn. Polotsk gos. un-ta. Ser. F, Str-vo. Priklad. nauki [Herald of Polotsk State University. Series F, Civil engineering. Applied sciences]*, 1(33), 90–93. DOI: 10.52928/2070-1683-2023-33-1-90-93. (In Russ., abstr. in Engl.).
10. Pospelov, A.V., Matsukevich, I.V., Kasach, A.A., Komarov, M.A. & Rozhko, S.N. (2022). Korroziya uglerodistykh staley v dezinfitsiruyushchikh rastvorakh [Corrosion of carbon steels in disinfectant solutions]. *Vestn. Polotsk gos. un-ta. Ser. F, Str-vo. Priklad. nauki [Herald of Polotsk State University. Series F, Civil engineering. Applied sciences]*, 14(32), 89–93. DOI: 10.52928/2070-1683-2022-32-14-89-93. (In Russ., abstr. in Engl.).
11. Zand, V., Salem-Milani, A., Shahi, S., Akhi, M.T. & Vazifekah, S. (2012). Efficacy of different concentrations of sodium hypochlorite and chlorhexidine in disinfection of contaminated Resilon cones. *Medicina oral, patologia oral y cirugia bucal*, 17(2), e352. DOI: 10.4317/medoral.17467.
12. Cook, B.W.M., Cutts, T.A., Nikiforuk, A.M., Leung, A., Kobasa, D. & Theriault, S.S. (2016). The Disinfection Characteristics of Ebola Virus Outbreak Variants. *Sci. Rep.*, 6, 38293. DOI: 10.1038/srep38293.
13. Gallandat, K., Wolfe, M.K. & Lantagne, D. (2017). Surface cleaning and disinfection: Efficacy assessment of four chlorine types using *Escherichia coli* and the Ebola surrogate Phi6. *Environmental science & technology*, 51(8), 4624–4631. DOI: 10.1021/acs.est.6b06014.
14. Romanovskii, V.I., Gurinovich, A.D. & Vavzhenyuk, P. (2014). Effektivnost' ispol'zovaniya ozona v tekhnologii vodopodgotovki [Efficiency of ozone use in water treatment technology]. *Vodoochistka [Water treatment]*, (2), 66–70. (In Russ., abstr. in Engl.).
15. Romanovskii, V.I., Likhavitskii, V.V. & Gurinovich, A.D. (2015). Issledovanie rastvorimosti ozona v vode po vysote stolba zhidkosti [Study of ozone solubility in water based on the height of the liquid column]. *Tr. BGTU. Khimiya i tekhnologiya neorgan. v-v [Proceedings of BSTU. Chemistry and technology of inorganic substances]*, 3(176), 113–118. (In Russ., abstr. in Engl.).
16. Romanovskii, V.I., Gurinovich, A.D., Bessonova, Yu.N. & Kryshilovich, E.V. (2016). Tekhnicheskie aspekty ispol'zovaniya ozona v vodopodgotovke [Technical aspects of the use of ozone in water treatment]. *Voda magazine [Water magazine]*, 2(102), 36–41. (In Russ., abstr. in Engl.).
17. Romanovskii, V.I., Rymovskaya, M.V., Bessonova, Yu.N., Kovalevskaya, A.M. & Likhavitskii, V.V. (2015). Analiz effektivnosti dezinfektsii sooruzhenii pit'evogo vodosnabzheniya s ispol'zovaniem khlorsoderzhashchikh dezinfitsiruyushchikh sredstv i ozona [Analysis of the effectiveness of disinfection of drinking water supply structures using chlorine-containing disinfectants and ozone]. *Vestn. BrGTU. Vodokhoz. str-vo, teploenergetika i geoekologiya [Bulletin of BrSTU. Water management construction, heat power engineering and geoecology]*, 2(92), 68–71. (In Russ., abstr. in Engl.).
18. Romanovskii, V.I., Rymovskaya, I.V. & Yan' Fen, S. (2015). Sravnitel'nyi analiz effektivnosti dezinfektsii sooruzhenii vodosnabzheniya dezinfitsiruyushchimi rastvorami [Comparative analysis of the effectiveness of disinfection of water supply facilities with disinfectant solutions]. *Voda magazine [Water magazine]*, 10(98), 18–21. (In Russ., abstr. in Engl.).
19. Romanovskii, V.I., Likhavitskii, V.V., Rymovskaya, I.V. & Gurinovich, A.D. (2015). Opredelenie osnovnykh parametrov dezinfektsii i obezrazhivaniya ozonom sooruzhenii pit'evogo vodosnabzheniya [Determination of the main parameters of disinfection and ozone disinfection of drinking water supply structures]. *Tr. BGTU. Khimiya i tekhnologiya neorgan. v-v [Proceedings of BSTU. Chemistry and technology of inorganic substances]*, 3(176), 108–112. (In Russ., abstr. in Engl.).
20. Gurinovich, A.D., Romanovskii, V.I. & Bessonova, Yu.N. (2016). Effektivnost' dezinfektsii ozonom sooruzhenii sistem vodosnabzheniya [Efficiency of ozone disinfection of water supply system structures]. *Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie [Vodoochistka. Water treatment. Water supply]*, (10), 48–51. (In Russ., abstr. in Engl.).
21. Romanovskii, V.I. & Bessonova, Yu.N. (2015). Sravnitel'nyi analiz sposobov dezinfektsii vodozabornyykh skvazhin i sooruzhenii vodosnabzheniya. *Perspektivy razvitiya i organizatsionno-ekonomicheskie problemy upravleniya proizvodstvom: materialy mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. V 2 t. T. 1 (211–226)*. Minsk: Pravo i ekonomika. (In Russ.).

22. Rymovskaya, M.V. & Romanovskii, V.I. (2016). Vozdeistvie otrabotannykh rastvorov dezinfektsii sooruzhenii vodosnabzheniya na pochvu [Impact of spent disinfection solutions of water supply structures on soil]. *Tr. BGTU. Khimiya i tekhnologiya neorgan. v-v* [Proceedings of BSTU. Chemistry and technology of inorganic substances], 4(186), 214–219. (In Russ., abstr. in Engl.).
23. Draginskii, V.L., Alekseeva, L.P. & Samoilovich, V.G. (2007). *Ozonirovanie v protsessakh ochistki vody*. Moscow: DeLi print. (In Russ.).
24. Romanovski, V., Claesson, P.M. & Hedberg, Y.S. (2020). Comparison of different surface disinfection treatments of drinking water facilities from a corrosion and environmental perspective. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(11), 12704–12716.

Поступила 27.12.2023

ANALYSIS OF TECHNICAL ASPECTS OF DISINFECTION OF SURFACES WITH AQUEOUS SOLUTIONS OF OZONE AND SODIUM HYPOCHLORITE

A. POSPELOV¹⁾, M. KOMAROV²⁾, N. KOROB³⁾, A. KHOTKO⁴⁾

⁽¹⁾⁻³⁾ Belarusian State Technological University, Minsk,

⁴⁾ Belarusian State College of Construction Materials Industry,
Branch of the educational institution «Belarusian State Technological University», Minsk)

Aqueous solutions of ozone represent a promising alternative to chlorine-containing disinfectants, which has been confirmed by previous studies. Disinfection of surfaces, unlike bulk water, remains a poorly understood area. The article discusses the technical aspects of the use of ozone and hypochlorites, including ozone generation, dissolution in water, parameter control, ozone destruction, microbial inactivation efficiency and safety. The study results point to the benefits of using ozone. The formation of micro and nanobubbles during disinfection with ozone is also important. The ozone half-life of 20 minutes ensures high efficiency of inactivation of microorganisms and no need for subsequent destruction of residual ozone. Comparison with hypochlorites shows the significant superiority of ozone in inactivating microorganisms on various surfaces. This allows you to reduce disinfection time and reduce corrosion of materials. The economic indicators of using ozone are comparable to chlorine-containing reagents, while the environmental characteristics of ozone are much better. The study highlights the technical and environmental feasibility of using ozone to disinfect surfaces, providing important data for the development of appropriate technologies.

Keywords: surface disinfection, technical aspects, ozone dissolution, ozone destruction, inactivation.