

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет»
(национальный исследовательский университет)
Институт «Архитектурно-строительный»
Кафедра «Градостроительство, инженерные сети и системы»

ВКР МАГИСТРА
ПРОВЕРЕНА
Рецензент
Ващенко Е.А.

_____ 2021 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой
Д.В. Ульрих

_____ 2021 г.

Сравнительный анализ методов обеззараживания природных вод

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ МАГИСТРА
ЮУрГУ–08.04.01.2021.305-04.045 ПЗ ВКР

Руководитель ВКР
магистра

_____ Е.В. Николаенко _____

_____ 2021 г.

Автор ВКР
магистр группы АС-227

_____ М.Е. Цубко _____

_____ 2021 г.

Нормоконтролер

_____ Е.В. Николаенко _____

_____ 2021 г.

Челябинск
2021

РЕФЕРАТ

Цубко М.Е. Выпускная квалификационная работа «Сравнительный анализ методов обеззараживания природных вод» - Челябинск: ЮУрГУ, Архитектурно-строительный институт, 2021 – 94 с., 7 табл., 14 илл. – библ. 30 назв

Ключевые слова: обеззараживание, питьевая вода, эпидемиологическая безопасность, анализ, реагенты

В выпускной квалификационной работе произведен сравнительный анализ методов обеззараживания природных вод.

Цель работы – изучить существующие на данный момент методы обеззараживания воды для питьевых целей, выполнить сравнительный анализ по основным показателям, на основании которого сделать выводы о эффективности и применимости каждого представленного метода.

В первом разделе приведены основные сведения о эпидемиологической безопасности питьевой воды и её влиянии на санитарное состояние населенных пунктов.

Второй раздел посвящен краткому обзору существующих методов обеззараживания. Кратко описаны сущность каждого метода, их преимущества и недостатки.

В третьем разделе приведены сведения об особенностях обеззараживания воды хлорсодержащими реагентами. Описаны свойства хлора, определяющие его бактерицидное действие, приведены технологические схемы хлорирования воды при использовании различных хлорсодержащих реагентов.

Четвертый раздел посвящен рассмотрению озонирования как способа обеззараживания питьевой воды. Определен механизм бактерицидного действия озона, описаны основные особенности технологических схем при озонировании воды для питьевых целей, выделены основные преимущества и недостатки.

Пятый раздел содержит сведения о методе ультрафиолетового обеззараживания природной воды. Определен механизм воздействия ультрафиолетовых лучей на живые клетки, описаны технологические схемы обработки воды ультрафиолетовым излучением.

Шестой раздел посвящен гидродинамическому способу обеззараживания воды. Приведены сведения о механизме воздействия образующихся пузырьков газа на бактериальные клетки; представлены технологические схемы кавитационного обеззараживания, рассмотрены основные преимущества и недостатки данного метода.

В седьмом разделе рассмотрен олигодинамический способ обеззараживания – определен механизм воздействия активных ионов некоторых металлов на бактериальные клетки; рассмотрен эксперимент по воздействию на обрабатываемую воду ионами серебра на ионном каркасе из оксида алюминия.

Восьмой раздел посвящен сравнительному анализу приведенных методов обеззараживания – в сводной таблице приведены основные преимущества, недостатки и особенности каждого метода. Сделаны выводы о применимости методов в конкретных условиях

В девятом разделе даны краткие указания о возможности применения проанализированных методов в конкретных условиях.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	10
1 ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ПИТЬЕВОЙ ВОДЫ	11
2 КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ ПРИРОДНЫХ ВОД.....	13
2.1 Хлорирование воды	13
2.2 Метод озонирования	16
2.3 Ультрафиолетовое обеззараживание воды.....	16
2.5 Олигодинамический способ обеззараживания воды	17
2.6 Термический способ обеззараживания воды.....	18
2.7 Механическое обеззараживание воды	18
2.8 Ультразвуковой способ дезинфекции	18
2.9 Электролизный метод	19
3 ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЕ ВОДЫ ХЛОРСОДЕРЖАЩИМИ РЕАГЕНТАМИ	20
3.1 Обеззараживание воды жидким хлором	20
3.1.1 Свойства хлора и его соединений	20
3.1.2 Механизмы бактерицидного действия хлора.....	21
3.1.3 Действие хлора на человека.....	24
3.1.4 Химические процессы хлорирования воды.....	26
3.1.5 Технология обеззараживания воды жидким хлором.....	27
3.2 Обеззараживание гипохлоритом натрия.....	33
3.2.1 Основы процесса обеззараживания гипохлоритом натрия.....	33
3.2.2 Технология применения высоко- и низкоконтрированного гипохлорита натрия.....	35
3.3 Обеззараживание диоксидом хлора.....	42
3.3.1 Свойства диоксида хлора	42
3.3.2 Способы получения диоксида хлора	44
3.4 Обеззараживание питьевой воды «Анолитом».....	49
3.4.1 Свойства «Анолита».....	49
3.4.2 Получение «Анолита»	50

3.4.3	Химический состав анолита «АНК»	51
3.5	Выводы по разделу.....	53
4	ОЗОНИРОВАНИЕ	55
4.1	Механизм воздействия озона	55
4.2	Технологические схемы озонирования воды	63
4.3	Выводы по разделу.....	65
5	ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЕ ВОДЫ УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ.....	66
5.1	Механизм воздействия ультрафиолетовых лучей на бактериальные клетки	66
5.2	Технологические схемы обработки воды ультрафиолетовым излучением.....	67
5.2	Выводы по разделу.....	68
6	ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ СПОСОБ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ ВОДЫ	70
6.1	Механизм бактерицидного действия кавитационных жидкостей..	70
6.2	Технологические схемы кавитационного обеззараживания воды .	70
6.3	Выводы по разделу.....	76
7	ОЛИГОДИНАМИЧЕСКИЙ СПОСОБ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ ВОДЫ	77
7.1	Сущность метода олигодинамической обработки	77
7.2	Выводы по разделу.....	80
8	СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРЕДСТАВЛЕННЫХ МЕТОДОВ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ	82
8.1	Сравнительный анализ основных методов	82
8.2	Выводы по разделу.....	85
9	РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ.....	87
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	89
	БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	90

ВВЕДЕНИЕ

Проблемы очистки и обеззараживания воды с каждым годом становятся все более актуальными. Увеличение количества бытовых и промышленных отходов в крупных городах отрицательно сказывается на окружающей экосистеме, отрицательно сказываясь на качестве воды для конечного потребителя. Падает общее качество жизни населения, снижается общая продолжительность жизни из-за возникновения неблагоприятных последствий от потребления воды некондиционного качества.

Для очистки природной воды от бактериальных загрязнений централизованные водоочистные сооружения используют большое число различных по способу воздействия и технологии применения методов. Данная проблема особо остро ощущается весной, когда вода особенно сильно загрязнена, так как при таянии снега большое количество вредных веществ попадает в источники питьевой воды. В данный период для доведения воды до требований, предъявляемых к таковой для питьевых целей, необходимо использовать увеличенное количество химических реагентов, что в отдельных случаях приводит к ухудшению органолептических показателей воды для населения, особенно в части ухудшения вкуса и запаха.

Целью работы является анализ влияния показателей качества воды источника водоснабжения на выбор источника с учетом технико-экономических критериев.

Для достижения этой цели были определены следующие задачи:

- изучить основные загрязнения, вызывающие эпидемиологическую опасность питьевой воды;
- изучить наиболее распространенные методы обеззараживания природной воды;
- проанализировать экономические аспекты применения различных технологические схемы дезинфекции;
- провести технико-экономическое обоснование существующих технологических схем

1 ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ПИТЬЕВОЙ ВОДЫ

Проблема санитарно-эпидемиологической безопасности воды затрагивает интересы всего человечества, поскольку эта ее особенность произрастает из роли воды в общей физиологии человека.

Около 78% от общей массы тела человека составляет вода. Даже при отсутствии внешних факторов человеческий организм теряет определенное количество воды в результате постоянно протекающих химических процессов. Поэтому даже небольшой его недостаток приводит к отклонениям в работе организма. Это связано с тем, что основные жизненные процессы происходят только в водной среде.

Однако, несмотря на главную роль воды в жизни человека как живого организма, ее потребление непосредственно на питьевые цели относительно невелико и колеблется от 1,5 литров в сутки в умеренном климате при отсутствии физических нагрузок до 5 литров в сутки в день при работе в условиях высоких температур и низкой влажности.

Но гигиеническая ценность воды определяется не только ее физиологической ролью. Также она необходима для санитарно-бытового использования.

Санитарно-эпидемиологическое состояние многих оздоровительных и лечебных учреждений в большой степени зависит от показателей воды, потребляемой на все нужды. Одним из необходимых условий для предотвращения распространения больничных инфекций является грамотно организованное централизованное водоснабжение.

Централизованное водоснабжение позволяет резко повысить уровень санитарной культуры территории и способствовать снижению заболеваемости только при условии бесперебойной подачи воды с необходимыми показателями качества. Нарушение норм санитарно-эпидемиологической безопасности при организации и эксплуатации систем водоснабжения может привести к эпидемиологическим катастрофам.

Наиболее массовыми и неблагоприятными последствиями нарушения гигиены водоемов является возможность переноса в водную

среду различных возбудителей кишечных инфекционных заболеваний, таких как, например, *Bacillus sp*, *Bacillus anthracis*, *Bacillus cereus*, *Bacillus subtilis*, *Clavibacter michiganense*, *Clostridium sp.*, *Clostridium botulinum* (споры), *Escherichia coli* и т.п.

Ежегодно во всем мире из-за недостаточного контроля за качеством питьевой воды умирает от 3 до 5 миллионов человек [1]. Инфекционные заболевания населения, связанные с ненадлежащим качеством водоснабжения, достигают около 500 миллионов случаев в год. Эти цифры дают основание назвать проблему гигиены питьевой воды самой важной среди тех, с которыми сталкиваются все страны мира.

Чтобы возникла возможность распространения инфекционных заболеваний через воду, необходимо одновременное наличие трех условий, согласно [2]:

- 1) возбудители инфекционных заболеваний должны попасть в воду источника водоснабжения. Текущее состояние канализации в населенных пунктах, наличие инфекционных больниц и патогенных микроорганизмов способствует постоянному наличию этого состояния;

- 2) патогенные микроорганизмы должны сохранять жизнеспособность в водной среде в течение достаточно длительного времени;

- 3) возбудители инфекционных заболеваний должны попадать в организм человека. Это состояние может быть реализовано из-за недостатков водоподготовки на водоочистных сооружениях или из-за неправильной работы водопроводной сети;

2 КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ ПРИРОДНЫХ ВОД

Основные способы удаления вирусов и бактерий из питьевой воды:

- химический, предполагает использование специализированных химических растворов с биологически активными веществами, ионизацию. При дезинфекции реагентами необходимо придерживаться точных доз химикатов и времени их реакции.
- физические, получаемые с помощью ультрафиолетового излучения. Исходная жидкость сначала очищается от механических примесей с помощью соответствующих фильтров, затем удаляются микроорганизмы, гельминты, а затем применяются методы дезинфекции.
- комбинированный, предполагает использование сразу реагентного и безреагентного методов.

2.1 Хлорирование воды

Хлорирование воды как способ обеззараживания на сегодняшний день является самым распространенным методом, благодаря которому стало возможно снизить риски возникновения возможных эпидемий, связанных с бактериальным загрязнением водной среды. Метод отличается своей относительной доступностью (хлорировать воду можно с помощью специальных таблеток даже в полевых условиях), дешевизна исходного товара и обеспечение «последствия» за счёт обеспечения нахождения в воде остаточного свободного хлора [3].

Основной принцип хлорирования заключается в воздействии на обрабатываемую воду свободным хлором или его соединениями, обеспечивающими наличие в воде ионов хлора в активной форме. Именно окислительные способности хлора и некоторых его соединений и обеспечивают сначала окислительное, а после – и необходимое бактерицидное действие

В основе происходящих процессов хлорирования лежит гидролиз хлора и его соединений – при попадании в воду хлор соединяется с ионами водорода и кислорода, образуя хлорноватистую кислоту. Именно наличие данного соединения в обрабатываемой воде определяет основное бактерицидное действие хлора.

На большинстве крупных очистных сооружениях водопроводной воды в качестве основного хлорсодержащего реагента традиционно используется жидкий хлор, превращаемый на месте в газообразный. Для определения правильной дозы хлора проводятся опыты, выводящие показатель хлорпотребности. Именно по данному показателю, как правило, и производится хлорирование – данный метод именуется нормальным хлорированием. Он не ухудшает органолептических показателей воды, в то же время полностью удаляя из воды большинство бактериологических загрязнений.

Также одним из условий правильного и эффективного хлорирования воды является выдерживание времени контакта воды с хлором и его правильное растворение во всем объеме обеззараживаемой воды. Время контакта воды с хлором напрямую зависит от температуры жидкости – так, например, летом достаточно обеспечить время контакта в пределах не менее тридцати минут; зимой же это время возрастает до одного часа.

Кроме традиционного метода прямого хлорирования, существуют следующие его разновидности: двойное хлорирование, хлорирование с преаммонизацией, перехлорирование и т.п [4].

Метод двойного хлорирования предусматривает ввод хлора сразу в двух точках на сооружениях водоподготовки – перед первой ступенью очистки и сразу после скорых фильтров. Введение реагента перед отстойниками либо осветлителями улучшает механизмы очистки воды от взвешенных веществ с высокой гидравлической крупностью, а также оказывает благоприятное санитарное воздействие на сами сооружения водоподготовки – хлор в обрабатываемой воде останавливает развитие наростов и биологических загрязнений в системах распределения и подачи воды на сооружениях, а также увеличивает общий эффект обеззараживания.

Следующий метод – хлорирование с аммонизацией – предусматривает поэтапное добавление в обрабатываемую воду сначала раствора реагента аммиака, а через несколько минут – хлорсодержащего реагента. При добавлении в воду ионов аммония образуются соединения хлора – хлорамины, также обладающие хорошим бактерицидным действием, причём хлорамины более устойчивы и способны оказывать воздействие на обработанную воду в течение определенного количества времени после обработки.

Хлорирование большими дозами хлора (перехлорирование), как ясно из названия, предусматривает введение в обрабатываемую воду больших доз хлора, чем это требуется по хлорпотребности (порядка десяти – двадцати миллиграмм на литр и более). Данный метод сокращает количество времени, необходимое на контакт воды с хлором, до 15-20 минут, и способствует более глубокому и полному обеззараживанию воды от всех видов органических и бактериологических загрязнений. Однако данный метод имеет и свой недостаток – большое содержание свободного остаточного хлора в обработанной воде, что приводит к необходимости дехлорирования. Для этого в воду добавляют гипосульфит натрия или фильтруют воду через слой активированного угля.

Общие недостатки хлорирования можно свести к следующим позициям – технологическая сложность и опасность транспортирования и складирования хлора как реагента; необходимость выдерживания времени контактирования с обрабатываемой водой; сложность в подборе правильной дозы хлора при определении хлорпотребности; возможность образования в воде хлорорганики и иных канцерогенных соединений; ухудшение основных органолептических показателей воды – запаха, привкуса и иногда цвета. Тем не менее, хлорирование как метод обеззараживания остается самым широко используемым способом очистки воды от бактериологических загрязнений вследствие своей дешевизны и надежности в обеспечении пролонгированного бактерицидного эффекта.

2.2 Метод озонирования

На сегодняшний день озонирование воды, наряду с хлорированием, является одним из самых распространенных методов обеззараживания воды, преимущественно в развитых странах. Озон оказывает воздействие не только на бактериальные клетки; он также приводит и к удалению из воды неприятных для человека привкусов и запахов. Данный реагент не транспортируется в готовом виде на станции водоподготовки, а получается на месте путем создания электрического разряда в воздухе контактной камеры.

Если сравнивать методы озонирования и хлорирования, то главными плюсами применения озона в водоподготовке является то, что данный реагент не образует в обрабатываемой воде никаких канцерогенных соединений, в то же время обеспечивая необходимую степень обеззараживания и окисления органических веществ при сниженном времени контакта с обрабатываемой водой (порядка 10 минут) [2]. Также озон, являясь более сильным окислителем, чем хлор, обладает большим бактерицидным эффектом по отношению к некоторым патогенным микроорганизмам.

2.3 Ультрафиолетовое обеззараживание воды

Самым современным и наиболее распространенным методом обеззараживания воды является использование установок ультрафиолетовой стерилизации.

Технология метода предполагает использование специальных ламп с УФ-излучением. Если рассматривать конструкцию самой установки, то можно заметить ее простоту и в то же время надежность. В основе системы лежат ультрафиолетовые лампы, заключенные в металлические трубки. Неотъемлемой частью установок является наличие кварцевых кожухов, на которых размещаются сами лампы.

Если говорить о принципе работы, то можно заметить его простоту и высокую скорость достижения необходимого качества воды. Итак, вода попадает в металлический корпус, где омывает кварцевую крышку, не

касаясь самой лампы. Внутри корпуса она получает необходимую дозу ультрафиолетовых лучей. УФ-лучи удаляют мельчайшие образования и бактерии, при этом состав по полезным и нужным веществам остается неизменным. Выделения токсичных веществ в результате использования бактерицидных ламп не происходит, что способствует безвредному увеличению дозы облучения. Метод подходит как для частного, так и для промышленного применения, поскольку прост в обслуживании и довольно невысок.

Поскольку особенности системы водоснабжения на разных объектах индивидуальны, обычно для качественного комплексного обеззараживания воды требуются комбинированные варианты. Например, широко используется УФ-стерилизация или озонирование с периодическим хлорированием. Для наиболее точного подбора фильтрующих устройств требуется предварительный анализ воды на содержание болезнетворных вирусов всевозможных других примесей.

2.5 Олигодинамический способ обеззараживания воды

Бактерицидное действие некоторых металлов основано на их свойствах нейтрализации патогенных микроорганизмов при нахождении в воде [4]. Однако данный метод долгое время являлся лишь методом дезинфекции относительно малых запасов воды, преимущественно личного пользования.

Самым известным металлом, обладающим бактериостатическим эффектом, является серебро. При введении в обрабатываемую воду ионы серебра подавляют способность микроорганизмов к размножению, однако не убивают и не деактивируют их, поэтому при употреблении данной воды остается риск заболевания. В то же время, концентрации серебра, при которых происходит полная дезинфекция обрабатываемой воды, являются токсичными уже непосредственно по отношению к человеку. Данный метод, в основном, применяется для консервирования воды при её длительном хранении, например, в дальних рейсах морских кораблей или в космонавтике.

2.6 Термический способ обеззараживания воды

Данный метод знаком человечеству ещё с давних времен и является самым распространенным способом для бытового обеззараживания воды.

Дезинфекция производится путем доведения воды до температуры порядка +100оС (температура кипения при нормальных условиях). При нахождении воды в данных условиях в ней погибают практически все микроорганизмы и их споры; также происходит разрушение многих органических примесей [4]. Данный способ также снижает временную (карбонатную) жесткость воды и не оказывает влияния на общие физико-химические свойства воды.

Однако недостатками данного метода являются: высокие затраты энергии на поддержание требуемой температуры воды; большие габариты и малая эффективность применяемого оборудования (кипятильники, нагреватели и т.п.), а также возможность некоторых бактерий и вирусов переносить высокие температуры в течение длительного времени.

2.7 Механическое обеззараживание воды

Для механического обеззараживания воды применяются установки обратного осмоса. Главный элемент таких устройств – полупроницаемая мембрана с размерами пор, пропускающими только молекулы воды. Данные установки удаляют 99% примесей, в том числе бактерии и крупные вирусы, однако не могут задержать споры и мелкие вирусы. Очищенная таким образом вода будет нуждаться в дополнительной фильтрации.

2.8 Ультразвуковой способ дезинфекции

Обеззараживание питьевой воды при воздействии на неё ультразвука основано на эффекте кавитации. При воздействии на воду колебаний определенной частоты возникают микропузырьки, которые

затем интенсивно схлопываются. При этом возникает ударная волна, энергии которой достаточно для разрушения оболочки микроорганизмов.

К достоинствам данного метода относятся: отсутствие влияние на органолептические и иные свойства обрабатываемой воды; уничтожение большинства бактерий, вирусов, грибков и их спор.

К недостаткам данного способа относится высокая стоимость обработки воды на единицу объема. Цена ультразвуковых установок в несколько раз выше оборудования, применяемого для других методов дезинфекции.

2.9 Электролизный метод

Данный метод является комбинацией физико-химических методов обеззараживания питьевой воды, и основан на получении требуемых окислителей непосредственно в обрабатываемой воде при пропускании через неё электрического тока. При электролизе в обрабатываемой воде образуются многие стандартные окислители, например, озон, перекись водорода и др., обладающие бактерицидным действием. Исходя из этих особенностей, можно выделить следующие достоинства данного метода – отсутствие экономических расходов на реагенты; технологичность использования в различных системах обеззараживания воды различного назначения.

К недостаткам данного метода можно отнести отсутствие контроля за получаемыми в ходе обработки воды окислителями, а также необходимость дополнительной минерализации воды при недостатке данного показателя.

3 ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЕ ВОДЫ ХЛОРСОДЕРЖАЩИМИ РЕАГЕНТАМИ

3.1 Обеззараживание воды жидким хлором

3.1.1 Свойства хлора и его соединений

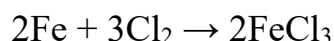
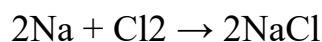
В чистом виде хлор представляет собой газообразное химическое соединение желто-зеленого цвета с резким удушающим запахом. Он примерно в 2,5 раза тяжелее воздуха, плохо растворяется в воде и неполярных органических растворителях (максимальная концентрация может достигать значений порядка 6,5 мг/л). В свободном виде встречается только в вулканических газах.

На валентном уровне атома хлора содержится 1 неспаренный электрон: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^5 3d^0$; поэтому соединения хлора при его валентности, равной единице, очень стабильны. Однако за счет присутствия в электронной орбитали незанятого d-подуровня, атом хлора может проявлять и прочие степени окисления, указанные в таблице 3.1.1.1.

Таблица 3.1.1.1 – Возможные степени окисления атомарного хлора

Валентность	Возможные степени окисления	Электронное состояние валентного уровня	Пример соединений
I	+1, 1, 0	$3s^2 3p^5$	NaCl, NaClO, Cl ₂
III	+3	$3s^2 3p^4 3d^1$	NaClO ₂
V	+5	$3s^2 3p^3 3d^2$	KClO ₃
VII	+7	$3s^1 3p^3 3d^3$	KClO ₄

Хлор непосредственно реагирует практически со всеми металлами с образованием соответствующих соединений – хлоридов:

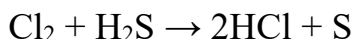


С неметаллами (кроме углерода, азота, кислорода и инертных газов), образует соответствующие хлориды.

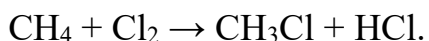
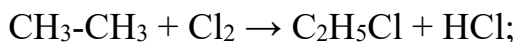
С кислородом хлор образует оксиды, в которых проявляет степень окисления от +1 до +7: ClO, ClO₂, Cl₂O, Cl₂O₅, Cl₂O₇. Они имеют резкий

запах, термически и фотохимически нестабильны, склонны к взрывному распаду.

Хлор способен замещать более слабые кислотные остатки:

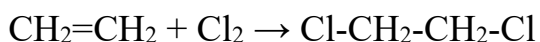


С органическими соединениями реагирует по-разному, в зависимости от типа окисляемого соединения. При реакции с насыщенными соединениями атом хлора замещает атом водорода:

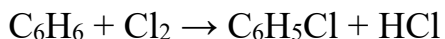


Данные реакции представляют собой реакции получения хлороформа, идут многоступенчато с образованием тетрахлорметана CCl_4 .

К ненасыщенным соединениям присоединяется по кратным связям:



Ароматические соединения замещают атом водорода на хлор в присутствии катализаторов (например, AlCl_3 или FeCl_3):



3.1.2 Механизмы бактерицидного действия хлора

Процесс взаимодействия хлора с бактериальной клеткой в воде проходит в два этапа: сначала дезинфицирующее средство диффундирует в бактериальную клетку, а затем вступает в реакцию с белками цитоплазмы, ядерного аппарата клетки, а также с клеточными ферментами.

Эффективное воздействие хлора наблюдается только при его воздействии на некоторые вегетативные формы бактерий; уничтожение спор возможно только при наличии переломных доз хлора и увеличенном времени контакта хлора с обрабатываемой водой, что на существующих станциях водоподготовки не представляется возможным осуществить.

Вирусы, а также цисты простейших и яйца гельминтов обладают высокой устойчивостью к хлору. Среди хлорсодержащих реагентов наиболее распространенным является жидкий хлор. Поставляется на гидротехнические сооружения в цистернах или баллонах высокого давления. При понижении давления жидкий хлор переходит в газообразное состояние, хорошо растворяется в воде.

Кроме непосредственного бактерицидного эффекта хлора, в обрабатываемой воде происходят и процессы окисления органических соединений. При реакциях окисления органики с помощью хлора образуются так называемые хлорорганические соединения, обладающие высокими токсичными, мутагенными и канцерогенными свойствами. Последующая обработка воды активированным углем не всегда может их удалить. Кроме того, эти соединения обладают высокой устойчивостью и после прохождения через систему водоснабжения и канализации вызывают загрязнение рек ниже по течению. Наличие в воде побочных соединений - один из недостатков использования газообразного и жидкого хлора в качестве дезинфицирующего средства.

Хлор - очень токсичное вещество. Его хранение, использование и транспортировка требуют соблюдения особых мер безопасности. Помимо жидкого хлора, для обеззараживания воды используется ряд его соединений. Диоксид хлора (ClO_2) широко используется в централизованных системах питьевого водоснабжения. Обладает более высоким бактерицидным и дезодорирующим действием, при этом в воде отсутствуют продукты переработки хлорорганических соединений, а органолептические свойства воды улучшаются. Однако диоксид хлора стоит дорого и должен производиться на месте с использованием довольно сложного процесса. Воздействие ClO_2 на микроорганизмы обусловлено не только высоким содержанием выделяющегося хлора, но и образующимся атомарным кислородом. Именно эта комбинация делает диоксид хлора более сильным дезинфицирующим средством.

Остаточное содержание хлора строго регламентируется, и контролируется на выходе из станций водоподготовки после РЧВ. Данный показатель будет актуален только в том случае, когда вся технология по обеззараживанию и комплексной очистке природной воды для нужд хозяйственно-бытового потребления выполнена правильно, без

существенных нарушениях во времени отстаивания воды, соблюдении скоростей и т.д, а также при оптимальном времени контактирования обрабатываемой воды с хлором или хлорсодержащим реагентом. Остаточный хлор может поддерживать санитарное состояние воды и распределительных систем на выходе из станций водоподготовки только при небольших загрязнениях – попадание в тело трубопровода загрязненных сточных или грунтовых вод в городской полосе неизбежно приведет к вторичному загрязнению воды, с которым остаточный хлор не будет способен справиться. Поэтому, наряду с обеспечением правильных доз свободного остаточного хлора в воде, требуется и правильная эксплуатация распределительных сетей населенного пункта; проведение плановых ремонтов, своевременная дезинфекция и иные мероприятия по поддержанию водопроводной сети в рабочем и исправном состоянии.

Выбор метода хлорирования основывается, как правило, на особенностях водоемов, из которых происходит забор воды. Так, например, при попадании фенолов в воды природных источников и последующем их транспортировании до точек ввода хлора в обрабатываемой воде образуются хлорфенольные соединения, обладающие крайне резким специфическим запахом и существенно ухудшающие органолептические показатели воды. В данном случае правильным вариантом будет применение метода хлорирования с преаммонизацией. Особенностью данного метода является его стадийность – при введении в воду сначала аммонийных соединений, а затем хлора приводит к образованию хлораминов, которые не взаимодействуют с фенолами и не приводят к образованию неприятных запахов. В то же время, хлорамины обладают менее выраженными обеззараживающими свойствами, и им требуется примерно в 2 раза больше времени (по сравнению со свободным хлором) для полной дезинфекции обрабатываемой воды.

Суперхлорирование - хлорирование чрезмерными дозами хлора. Данный способ хлорирования не применяется в нормальных условиях, и применяется только в острой санитарно-эпидемиологической обстановке, когда не представляется возможным обеспечить достаточное время контакта обрабатываемой воды с реагентом. При суперхлорировании запахи в воде также не появляются, так как хлорорганические

соединения, образующиеся на ранней стадии взаимодействия хлора с водой, в дальнейшем разрушаются избытком хлора. Перед непосредственной подачей воды на нужды потребителю из воды необходимо удалить излишки остаточного хлора. Данная цель достигается за счёт введения в воду гипосульфитов, использовании загрузки из активированного угля или аэрацией.

При использовании перехлорирования (с использованием остаточного свободного хлора) доза реагента подбирается, исходя из участка IV на рисунке 3.1.4.1. Данный метод требует более скрупулезного подбора требуемых доз хлора, что не требует дополнительных мероприятий для дехлорирования. При таком хлорировании обеспечивается более высокий и стойкий дезинфицирующий эффект, который требует меньшего контакта хлора с обрабатываемой водой по сравнению с методом хлорирования с преаммонизацией.

3.1.3 Действие хлора на человека

Газообразный хлор и химические соединения, содержащие активный хлор, опасны для здоровья человека (токсичны). Он оказывает раздражающее действие на дыхательные пути при концентрации в воздухе около 0,006 мг / л. [5]

Промышленные аварии (например, повреждение баков с хлором) могут быть причиной массовых отравлений. Индивидуальное отравление происходит из-за несоблюдения правил техники безопасности в лабораториях.

Отравление хлором считается чрезвычайно серьезным и может привести к отеку легких.

В общем случае у людей, подвергшихся воздействию хлора, проявляются следующие симптомы: жжение, покраснение и отек век, слизистых оболочек, и, как следствие, проблемы с дыхательными путями.

Попадание хлора в дыхательные пути вызывают сильнейшие отравления, притом виды отравления будут зависеть от содержания хлора в атмосфере и времени контакта человека с опасным веществом.

Существует четыре формы острого отравления хлором: молниеносная, тяжелая, умеренная и легкая.

Для всех этих форм характерна резкая первичная реакция на газовое воздействие. Неспецифическое раздражение хлором рецепторов слизистой оболочки дыхательных путей вызывает рефлекторные защитные симптомы (кашель, боль в горле, слезотечение и др.). В результате взаимодействия хлора с влагой слизистой оболочки дыхательных путей образуется соляная кислота и активный кислород, оказывающие токсическое действие на организм.

При высоких концентрациях хлора пострадавший может умереть через несколько минут (молниеносная форма): возникает стойкий ларингоспазм (сужение голосовой щели, приводящее к остановке дыхания), потеря сознания, судороги, цианоз, набухание вен на лице и шея, непроизвольное мочеиспускание и дефекация.

При тяжелой форме отравления происходит кратковременное прекращение дыхания, затем дыхание восстанавливается, но не нормальное, а поверхностное, судорожное. Человек теряет сознание. Смерть наступает в течение 5-25 минут.

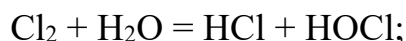
При умеренном отравлении хлором сознание пострадавших сохраняется; рефлекторная остановка дыхания непродолжительна, но приступы удушья могут повторяться в течение первых двух часов. Возникает ощущение жжения и боли в глазах, слезотечение, боль за грудиной, приступы мучительного сухого кашля, через 2-4 часа развивается токсический отек легких. При легкой форме острого отравления хлором выражены только признаки раздражения верхних дыхательных путей, которые сохраняются в течение нескольких дней.

Отдаленные последствия острого отравления хлором проявляются в виде хронического фарингита, ларингита, трахеита, трахеобронхита, пневмосклероза, эмфиземы легких, бронхоэктатической болезни, легочно-сердечной недостаточности. Такие же изменения в организме происходят при длительном пребывании в условиях, когда в воздухе постоянно содержится газообразный хлор в низких концентрациях (хроническое отравление хлором). Воздействие хлорсодержащих

соединений на незащищенную кожу вызывает акне, дерматит, пиодермию.

3.1.4 Химические процессы хлорирования воды

Химизм процесса при введении хлора в воду протекает по следующей реакции:



Главным дезинфицирующим свойством обладают ионы OCl^- и хлорноватистая кислота HOCl . [6]

В процессах взаимодействия хлором с обрабатываемой воды его ионы сначала идут на окисление органических примесей, содержащихся в воде. Поэтому для достижения требуемого обеззараживающего эффекта необходимо поддерживать в воде требуемые концентрации остаточного свободного хлора (область IV на рисунке 3.1.1.1).

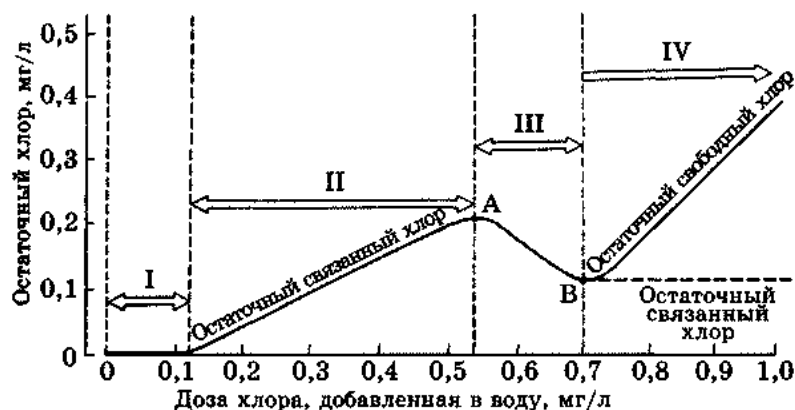
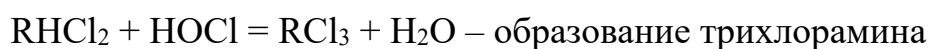
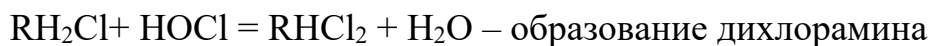
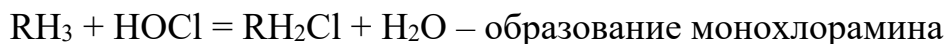


Рисунок 3.1.4.1 - График зависимости величины и вида остаточного хлора от введенной дозы хлора

Небольшие дозы реагента не приводят к образованию остаточного хлора, поскольку полностью расходуются на окисление органических веществ, находящихся в воде (область I), в первую очередь аминами. При увеличении вводимой дозы увеличивается, и концентрация остаточного хлора в виде хлораминов. Хлорамины обладают более слабым

микробицидным действием, чем хлор, поэтому для достижения необходимого обеззараживающего эффекта концентрация остаточного связанного хлора в воде должна составлять 0,8–1,2 мг / л.

Химические реакции образования хлораминов следующие:



С началом реакций окисления хлораминов количество остаточного связанного хлора в воде уменьшается, несмотря на увеличение дозы введенного хлора (раздел III). После окончания реакции окисления хлораминов в воде появляется остаточный свободный хлор, и его количество становится пропорциональным дозе введенного хлора (участок IV). При хлорировании воды, содержащей аммонийные соединения, требуемая доза определяется по прямой за точкой В, которая называется точкой перелома. При увеличении дозы хлора после точки перелома вновь начинается рост остаточного хлора, но этот хлор не связан с хлораминами и носит название свободного остаточного хлора.

3.1.5 Технология обеззараживания воды жидким хлором

Жидкий хлор подается на водоочистные сооружения в специализированных емкостях различных размеров. Эта емкость представляет собой баллон (рисунок 3.1.5.1) с клапаном в верхней части для удаления газообразного хлора. При удалении газа часть сжиженного хлора испаряется с одновременным понижением температуры остального. Эта разница компенсируется внешними источниками, что, если требуется интенсивное использование хлора, требует подачи тепла в цилиндр.

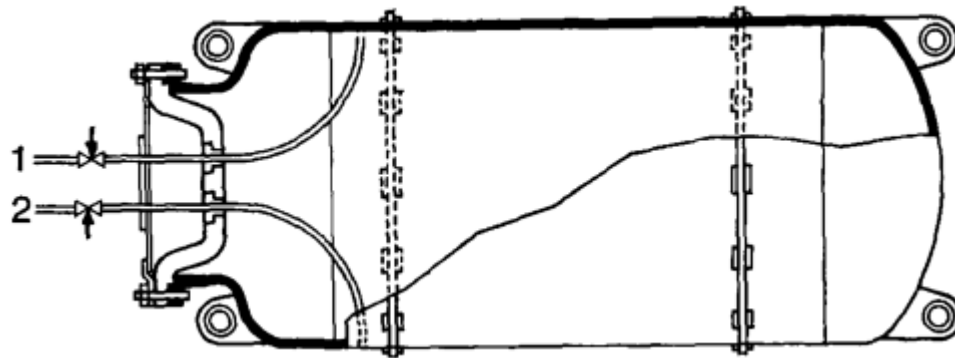


Рисунок 3.1.5.1 – Горизонтальный баллон с выпускными клапанами для хлора;

1 – клапан для выпуска газообразного хлора; 2 – клапан для выпуска жидкого хлора

Однако подогревать баллоны с жидким хлором опасно с точки зрения техники безопасности – при подъеме температуры высок риск разгерметизации. Поэтому при необходимости использования существенного количества хлора применяются горизонтальные баллоны, показанные на рисунке 3.1.5.1. Данная конструкция позволяет забирать непосредственно газообразный хлор при незначительных его расходах и отсутствии необходимости в подогреве; когда наступает необходимость в большом съеме хлора, он забирается из части, содержащего жидкий хлор: при прохождении через очень узкое отделение, погруженное в ванну с искусственным подогревом, термостатированием и работающую как испаритель.

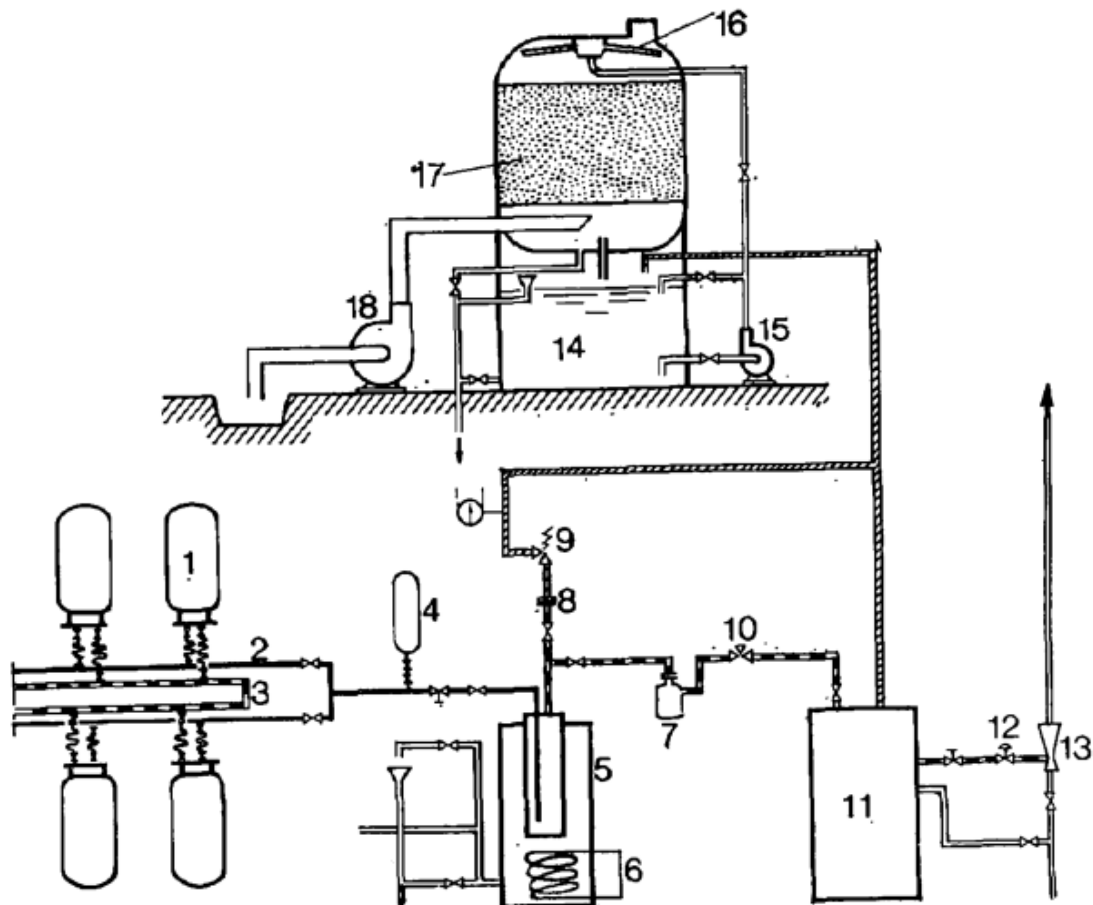


Рисунок 3.1.5.2 – Принципиальная схема хранения и распределения жидкого хлора: 1 — резервуары с хлором; 2 — контур сжиженного хлора; 3 — контур газообразного хлора; 4 — расширитель; 5 — испаритель; 6 — нагревательный элемент; 7 — каплеуловитель хлора; 8 — разрывной диск; 9 — предохранительный клапан; 10 — редукционный клапан; 11 — хлоратор; 12 — автоматическая запорная задвижка; 13 — всасывающий эжектор; 14 — поглотительная колонна; 15 — насос для перекачки нейтрализационного раствора; 16 — разбрызгивающая дырчатые трубы; 17 — контактная загрузка; 18 — вентилятор

Газовые зоны резервуаров 1 соединены контуром выравнивания давления 3, а зоны сжиженного хлора - контуром подачи 2. Если запорные краны на резервуарах и испарителе закрыты, расширительный бак в контуре предотвращает создание избыточного давления (расширение сжиженного хлора может привести к взрыву системы).

Через нагревательный элемент 6 в испаритель 5 подводится тепло, необходимое для испарения хлора. Равновесие достигается, когда объем испарившегося сжиженного хлора становится равным объему

сжиженного хлора, поступающего в испаритель. После этого уровень в цилиндре испарителя стабилизируется.

Газообразный хлор, выходящий из испарителя, проходит через сепаратор капель хлора 7, редукционный клапан 10 и поступает в хлоратор 11.

В случае повышения избыточного давления в контуре газообразного хлора между испарителем и хлоратором разрывная мембрана 8 и предохранительный клапан 9 сбросят давление в абсорбционную колонну 14.

Если утечки хлора происходят в помещении, где расположены резервуары, или в помещении хлоратора, течеискатель включает сигнализацию и автоматически включает вентилятор 18, который всасывает воздух с хлором из загазованных помещений, а также включает на насосе, подающем нейтрализующий раствор (сода, гипосульфит натрия). Воздух с хлором проходит через контактную насадку от колец 17 по направлению к потоку нейтрализующего раствора, который распыляется в верхней части абсорбционной колонны через перфорированные трубы 16.

Основные преимущества применения хлора для хлорирования воды:

Концентрация активного хлора – 100% чистого вещества.

Качество продукта – высокое, устойчивое, не изменяющееся при хранении.

Простота реакции и предсказуемость дозы.

Доступность массовых поставок – может транспортироваться специальными автоцистернами, бочками и баллонами.

Хранение – легко хранить на складах временного хранения.

Однако, поскольку хлор является ядовитым и токсичным веществом, необходимо соблюдать ряд безопасных мер при его производстве, транспортировке, хранении и применении. Поэтому регламентировано устройство следующего обязательного периферийного оборудования:

- весы для баллонов и контейнеров с хлором;
- отсекающий вентиль на жидкий хлор;
- напорный хлоропровод;
- ресивер для хлоргаза;
- фильтр на хлоргаз;
- скрубберная установка (нейтрализатор хлора);
- анализатор для обнаружения хлоргаза в воздухе,
- а при потреблении газообразного хлора из баллонов более 2 кг/час или более 7 кг/час при потреблении хлора из контейнера – испарители хлора, к которым предъявляются особые требования. Они должны быть оснащены автоматическими системами, предотвращающими:

- несанкционированное потребление хлоргаза в объемах, превышающих максимальную производительность испарителя;
- проникновение через испаритель жидкой фазы хлора;
- резкое понижение температуры хлора, находящегося в радиаторе испарителя.

Испаритель должен быть снабжен специальным отсекающим электромагнитным вентилем на входе, манометром и термометром.

Весь процесс обработки воды хлором осуществляется в специальных помещениях – хлораторных, которым также предъявляются особые требования. Хлораторная обычно состоит из блоков помещений: расходного склада хлора, хлордозаторной, вентиляционной камеры, вспомогательных и бытовых помещений.

Хлораторные должны размещаться в отдельно стоящих капитальных зданиях второй степени огнестойкости. Вокруг склада хлора и хлораторной со складом хлора должно быть сплошное глухое ограждение, высотой не менее двух метров, с глухими плотно закрывающимися воротами для ограничения распространения газовой волны и исключения доступа посторонних лиц на территорию склада.

Вместимость расходного склада хлора должна быть минимальной и не превышать 15-суточного потребления водопроводной станцией.

Радиус опасной зоны, в пределах которой не допускается размещение объектов жилищного и культурно-бытового назначения, составляет для складов хлора в баллонах 150 м, в контейнерах - 500 м.

Помещения хлорирования следует располагать в пониженных местах площадки водопроводных сооружений и преимущественно с подветренной стороны преобладающих направлений ветра относительно ближайших населенных пунктов (кварталов).

Расходный склад хлора следует отделять от других помещений глухой стеной без проемов, в складе должно быть два выхода с противоположных сторон помещения. Один из выходов оборудован воротами для транспортирования баллонов или контейнеров. Въезд автомобилей в помещение склада не допускается, должно быть предусмотрено грузоподъемное оборудование для транспорта сосудов с кузова автомобиля на склад. Порожнюю тару надлежит хранить в помещении склада. Двери и ворота во всех помещениях хлораторной должны открываться по ходу эвакуации. На выходах из склада предусматриваются стационарные водяные завесы. Сосуды с хлором должны размещаться на подставках или рамках, иметь свободный доступ для строповки и захвата при транспортировании. В помещении склада хлора располагается оборудование для нейтрализации аварийных выбросов хлора. Должна быть обеспечена возможность подогрева баллонов на складе перед доставкой их в хлораторную. Следует отметить, что при длительной эксплуатации баллонов с хлором в них накапливается чрезвычайно взрывчатый трихлорид азота, и поэтому время от времени баллоны с хлором должны проходить плановую промывку и очистку от хлорида азота.

Хлордозаторные размещать в заглубленных помещениях не допускается, от других помещений они должны быть отделены глухой стеной без проемов и снабжены двумя выходами наружу, при этом один из них через тамбур. Вспомогательные помещения хлораторных должны быть изолированы от помещений, связанных с применением хлора и иметь самостоятельный выход.

Хлорационные помещения оборудованы приточно-вытяжной вентиляцией. Отвод воздуха из помещения учета хлора путем постоянной вентиляции должен осуществляться по трубе высотой 2 м над коньком крыши самого высокого здания, расположенной в радиусе 15 м, а также путем постоянной и аварийной вентиляции от источника хлора. склад - через трубу высотой 15 м от уровня земли.

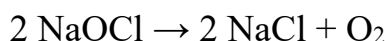
Таким образом, степень опасности хлора минимизируется наличием целого комплекса мер по организации его хранения и использования, в том числе за счет организации санитарно-защитных зон (СЗЗ) складов реагента, радиус которых достигает 1000 м для наиболее крупных сооружений.

Однако с ростом городов жилые дома приближались к границам СЗЗ, а в некоторых случаях располагались в этих границах. Кроме того, увеличился риск транспортировки реагента от места производства до места потребления. По статистическим данным, именно при транспортировке происходит до 70% различных аварий с химически опасными веществами. Полномасштабная авария железнодорожной цистерны с хлором может нанести ущерб разной степени тяжести не только населению, но и окружающей среде. В то же время токсичность хлора, усиленная высокой концентрацией реагента, снижает промышленную безопасность и антитеррористическую устойчивость систем водоснабжения в целом.

3.2 Обеззараживание гипохлоритом натрия

3.2.1 Основы процесса обеззараживания гипохлоритом натрия

Гипохлорит натрия, на данный момент, является одним из наиболее часто применяемых реагентов для хлорирования воды вследствие технологичности процесса и доступности исходных реагентов [7]. Однако его отличает высокая неустойчивость [8] – при повышении температуры происходит его разложение следующей формуле:



Зависимость разложения гипохлорита натрия от его температуры представлена на рисунке 3.2.1.1.

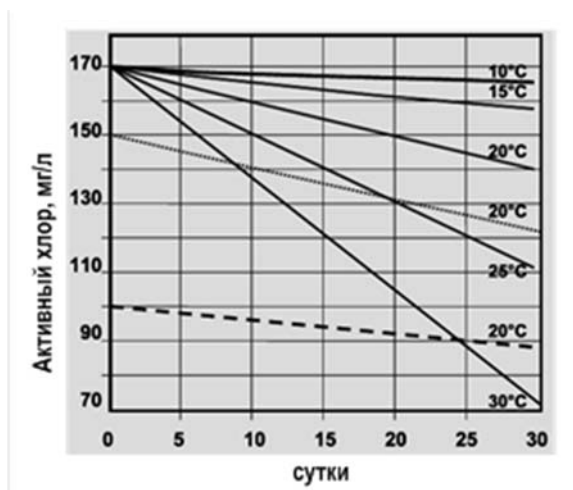


Рисунок 3.2.1.1. – Зависимость разложения гипохлорита натрия от его температуры

Гипохлорит натрия в воде диссоциирует с образованием хлорноватистой кислоты и гипохлорита в зависимости от водородного показателя (см. рисунок 3.2.2.2).

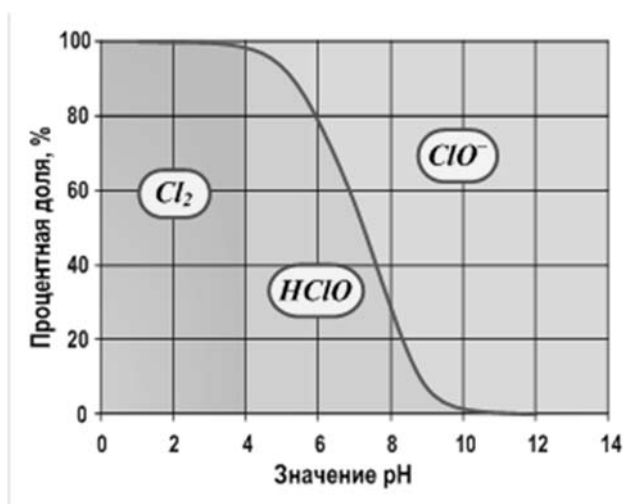


Рисунок 3.2.2.2 – Изменение форм активного хлора в растворе гипохлорита натрия в зависимости от pH раствора

При диссоциации гипохлорита натрия образуются следующие соединения:



Хлорноватистая кислота – слабая кислота, поэтому в водной среде происходит обратимая реакция её диссоциации и обратного гидролиза:



На данный момент гипохлорит натрия является одним из лучших хлорсодержащих бактерицидных агентов. Оно способно уничтожить большинство микроорганизмов при сравнительно небольших дозах, что объясняется образованием частиц с высоким окислительным потенциалом при гидролизе соединения. Данные радикалы участвуют в обеззараживании того ряда микроорганизмов, что проявляют способности к окислению, через уничтожение слоя цитоплазмы.

При значениях водородного баланса, близкого к нейтральному, проявляется наибольшая обеззараживающая способность гипохлорита натрия, поскольку в данном диапазоне значений рН концентрации хлорноватистой кислоты и гипохлорит анионов примерно совпадают.

В то же время, бактерицидная способность гипохлорита натрия может различаться, в зависимости от организма, на который он воздействует. Так, например, кандидозные грибки *Candida albicans*, энтерококки и грамотрицательные анаэробные бактерии уничтожаются за полминуты при воздействии на них 5,0% раствора гипохлорита натрия.

3.2.2 Технология применения высоко- и низкоконтрированного гипохлорита натрия

Наибольшее распространение в качестве дезинфицирующего агента питьевой воды используются ГПХН марки А (концентрация по действующему веществу порядка 190 мг/л) [10].

Гипохлорит натрия с высокой концентрацией практически никогда не используется в чистом виде, а подвергается предварительному разбавлению с целью снизить концентрацию активного вещества. Чаще

всего для обработки питьевой воды применяется раствор гипохлорита натрия, характеризующийся следующими показателями:

Содержание активного хлора – 5%;

Содержание свободной щелочи – 2%;

Нерастворимая часть – 0,01%;

Mg – 1 мг/л;

As – 1 мг/л;

Pb – 1 мг/л.

Таким образом, в отличие от использования жидкого хлора рабочие растворы гипохлорита натрия характеризуются повышенным уровнем рН и могут использоваться для корректировки данного показателя в обрабатываемой воде.

Отмечено также влияние водородного показателя на соотношение ионов гипохлорита и хлорноватистой кислоты [10]. Так, например, с возрастанием рН хлорноватистая кислота распадается на ионы H^+ и ClO^- . Так, например, при рН = 6 доля $HClO$ составляет 97%, а доля ионов гипохлорита 3%. При рН = 7 доля $HClO$ составляет 78%, а гипохлорита – 22%, при рН = 8 доля $HClO$ – 24%, гипохлорита - 76%. Таким образом, при высоких значениях рН в воде $HClO$ превращается в гипохлорит ион.

Повышение водородного показателя рабочего раствора ГПХН проводят с целью повышения устойчивости данного раствора. Однако при этом наблюдается снижение активности обеззараживающих агентов, а также происходит выпадение осадка на границе взаимодействия. Кроме водородного показателя обрабатываемой воды, на процесс взаимодействия гипохлорита натрия с обрабатываемой водой свое воздействие оказывают также температура и свободный активный хлор. Зависимость требуемого избытка активного хлора от температуры и значения рН представлена в таблице 3.2.2.1.

Таблица 3.2.2.1 – Зависимость требуемого избытка активного хлора от температуры воды и значения рН

Температура воды, °С	Время воздействия, мин	Требуемый избыток хлора, мг/л		
		рН 6	рН 7	рН 8
10	5	0,50	0,70	1,20
	10	0,30	0,40	0,70
	30	0,10	0,12	0,20
	45	0,07	0,07	0,14
	60	0,05	0,05	0,10
20	5	0,30	0,40	0,70
	10	0,20	0,20	0,40
	15	0,10	0,15	0,25
	30	0,05	0,06	0,12
	45	0,04	0,04	0,08
	60	0,03	0,03	0,06

Потерю активности растворов ГПХН со временем наглядно иллюстрирует таблица 3.2.2.2

Таблица 3.2.2.2 – Период полураспада гипохлорита натрия в зависимости от его концентрации и температуры раствора

Концентрация NaOCl, %	Период полураспада, сутки	
	25 °С	35 °С
15	144	39

окончание таблицы 3.2.2.2

Концентрация NaOCl, %	Период полураспада, сутки	
	25 °С	35 °С
12	180	48
9	240	65
6	360	97
3	720	194
1	2160	580

Введение рабочего раствора гипохлорита натрия в дезинфицируемую воду производят при помощи метода пропорционального дозирования с использованием специального оборудования – насосов-дозаторов. При этом данный метод может быть автоматизирован и производиться по различным сигналам – как от счётчиков воды, так и по сигнализатору хлора в трубопроводе. После узла ввода гипохлорита натрия для улучшения гидравлического распределения реагента устанавливают динамические смесители.

Гипохлорит натрия марки «Э» (электролизный) получают на специальных установках – электролизерах. Данный реагент обычно подается в обрабатываемую воду либо путем непосредственного ввода (при применении установок проточного типа), либо же, при наличии электролизеров непроточного типа, через накопительные емкости. Управление данной системой аналогично таковой при использовании метода пропорционального дозирования.

Высококонцентрированные растворы гипохлорита натрия обладают следующими недостатками:

они агрессивны (требуется хранение в емкостях из титана или спецполимера);

вызывают ожоги кожи и поражение глаз (вплоть до слепоты);

при контакте с горючими материалами (опилками, ветошью и др.) могут способствовать их возгоранию;

при введении в воду (или разбавлении водой до рабочей концентрации 8-10%) с высоким содержанием кальция и магния происходит образование нерастворимых отложений и осадков CaCO_3 и $\text{Mg}(\text{OH})_2$;

высокое значение pH (до 12 и более) способствует образованию карбоната кальция, что разрушительно воздействует на обвязку, арматуру, устройства ввода реагента и расходомеры, вплоть до их закупоривания и остановки;

скопление кислорода при газовыделении вследствие разложения ГПХН может привести к взрыву;

возможны аварии из-за случайных или ошибочных соединений с соляной кислотой (pH корректоры или коллекторы кислотной промывки от карбонатных отложений), в результате чего выделяется газообразный хлор с высокой влажностью, что особенно опасно. Растворы ГПХН неустойчивы и подвержены разложению.

Большинство проблем, возникающих вследствие применения высококонцентрированного гипохлорита натрия, нейтрализуются при применении технологии и оборудования для получения низкоконцентрированного гипохлорита натрия. Данный материал получается на месте путем электролиза раствора NaCl низкой концентрации и воды. Данный продукт отличается большей чистотой, по сравнению с высококонцентрированным гипохлоритом натрия, и является менее токсичным. [7]

Гипохлорит натрия данной марки, благодаря меньшей концентрации активного продукта, меньше подвержен разложению. Растворы данного продукта отличаются невысокими водородными показателями (порядка 9,0 – 9,2), что благоприятно сказывается на проблеме образования накипи, а в ряде случаев и позволяет экономить на корректировке pH воды в случае использования кислотных реагентов. Таким образом, по сравнению с товарным продуктом – высококонцентрированным гипохлоритом натрия, низкоконцентрированный продукт отличается следующими

преимуществами: безопасность при использовании, более высокая стабильность вследствие более низкого содержания активного вещества, дешевизна исходных реагентов (для получения необходимо только наличие поваренной соли и воды).

К числу достоинств электрохимического ГПХН следует отнести и то, что обязательный 15-суточный запас требует не готовый продукт, а сырье, из которого он производится, т.е. поваренная соль, хранение которой на складе не сопровождается экологическими, санитарно-гигиеническими, террористическими и другими рисками, присущими привозному высококонцентрированному ГПХН. При электролизе поваренной соли выделяется водород в количестве 0,027 кг (или 0,3 м³) на каждый кг получаемого хлора. Во избежание угрозы взрыва водород должен быть удален принудительной вентиляцией в атмосферу с разбавлением его воздухом до нижнего порога взрывоопасности, который составляет 4% (вентиляция должна обеспечить удаление 55,6 л/мин. водорода на 10 кг суточной производительности по хлору).

Основная проблема надежности работы установок получения электролитического ГПХН связана с образованием отложений карбоната кальция на поверхности катодов электролизера. Как следствие, несоблюдение особенностей при подготовке воды, используемой для растворения соли, приводят к перегреву и деформации электродной системы, разрушению оксидно-рутениевого покрытия, росту напряжения и уменьшению концентрации активного хлора в получаемом продукте. На образование катодных отложений оказывает влияние качество соли и концентрации присутствующих в воде ионов Ca²⁺, Mg²⁺, HCO₃²⁻. По чистоте (наличию примесей хлоридов и сульфатов кальция и магния) приемлема соль «Экстра», которая, как правило, используется в зарубежных технологиях. Однако она, кроме того, что существенно дороже обычной соли вовсе не исключает необходимость предварительного глубокого умягчения воды, используемой для растворения. Технически более простым и экономически менее затратным способом предотвращения катодных отложений, а также позволяющим использовать соль любой марки будет предварительное удаление бикарбонат-иона из солевого раствора, подаваемого на электролиз. Для декарбонизации воды рекомендуется подкисление

соляной кислотой до $pH = 4,0-4,3$ (при этом HCO_3^- - полностью переходит в CO_2) и последующее удаление свободной углекислоты в дегазаторе пленочного, барботажного, вакуумно-эжекторного или иного типа. Процесс получения низкоконцентрированного гипохлорита натрия достаточно изучен [9] и широко применяется в практике обеззараживания во всех развитых странах, как на водоочистных станциях небольшой производительности, так и на сооружениях подготовки нескольких миллионов кубических метров питьевой воды в сутки.

В целом, использование гипохлорита натрия в качестве обеззараживающего агента имеют следующие преимущества и недостатки:

Достоинства:

эффективен против большинства болезнетворных микроорганизмов;

относительно безопасен при хранении и использовании;

при получении на месте не требует транспортировки и хранения опасных химикатов.

Недостатки:

неэффективен против цист (*Giardia*, *Cryptosporidium*);

при увеличении величины pH воды снижается эффективность ГХН как дезинфектанта, так как снижается доля хлорноватистой кислоты и увеличивается доля гипохлорит-иона, а его эффективность как дезинфектанта в 20 раз ниже;

содержание активного хлора менее 15% (по массе), 85 % воды и балластных веществ;

опасность выделения газообразного хлора при хранении;

теряет активность при хранении (до 30 % за первый месяц хранения), при увеличении температуры на $100^{\circ}C$ скорость разложения ГХН увеличивается в ~ 2 раза;

при разложении товарного ГХН, полученного хлорированием щёлочи, происходит кристалл-лизация поваренной соли из товарного раствора, которая нарушает работу дозирующей техники;

товарный раствор ГХН содержит 10-20 г/л щёлочи, за счёт которой происходит увеличение рН, поэтому при обеззараживании воды с высокой долей карбонатной жёсткости товарным ГХН образуется нерастворимый карбонат кальция, который откладывается в виде накипи на внутренней поверхности трубопроводов и сосудов (кальцинация);

при обработке воды замкнутых систем (оборотные системы, бассейны и др.) происходит увеличение рН воды, т.к. товарный раствор имеет рН=12;

образует побочные продукты дезинфекции, включая тригалометаны (в том числе хлороформ и бромформ) и броматы в присутствии бромидов;

при хранении растворов NaClO с высокой концентрацией активного хлора происходит накопление хлоратов;

не окисляет марганец.

3.3 Обеззараживание диоксидом хлора

3.3.1 Свойства диоксида хлора

Одним из самых перспективных методов хлорирования воды, с точки зрения соблюдения экономических и экологических аспектов, является применение диоксида хлора. Данный метод используется уже достаточно продолжительное время; так, например, одна из первых систем обеззараживания питьевой воды была успешно внедрена на станции водоподготовки «Ниагара Фоллз» в 1944 году в Соединенных Штатах Америки. Начиная с 1950-х годов, данный реагент применялся уже более чем на 150 станциях.

Диоксид хлора получают на месте его использования в виде водного раствора газа. Расходные нормы реагентов для получения раствора, содержащего 1 кг диоксида хлора следующие: хлорит натрия 25% – 6,67 л соляная кислота 30...33% – 6,67 л разбавляющая вода – 66,7 л.

В настоящее время установлено [11-14], что диоксид хлора обладает следующими технологическими преимуществами:

- сильное обеззараживающее воздействие - необходимые дозы очень малы (0,1-0,3 мг/л);
- не образуются тригалометаны (ТГМ) и хлорфенолы;
- практически не образуются не удаляемые органические галогены (НОГ);
- не происходит реакция с аминами и другими соединениями азота;
- сильное дезинфицирующее действие практически не зависит от значения рН воды;
- сильное воздействие на споры, вирусы и водоросли;
- практически не влияет, а зачастую улучшает органолептические свойства обработанной воды;
- эффективное окисление соединений железа (II) и марганца (II);
- улучшение коагулируемости загрязнений при обработке сырой воды;
- долго сохраняющийся бактериостатический эффект (до 7 суток) в водораспределительных системах и, как следствие, удаление микробиологических отложений в них;

Данные преимущества позволяют рассматривать диоксид хлора не только как весьма эффективный дезинфектант, но и как возможный вариант от отказа первичного хлорирования. Поскольку на данной стадии, в большинстве случаев, используется жидкий хлор, то применение диоксида хлора позволит отказаться от использования этого, а также иных методов, таким образом снизив общие затраты на сооружения.

Механизм воздействия диоксида хлора на бактериальные клетки схож с таковым у озона: данный реагент воздействует как на оболочку клетки, так и на её способность усваивать и получать энергию из окружающей среды. Данная особенность позволяет использовать диоксид хлора в качестве меры по борьбе с вирусами, спорами, цистами простейших и иными возможными патогенами, в отличие от обычной формы хлора.

Получающийся при введении в обрабатываемую воду хлорит-ион характеризуется высоким бактериостатическим эффектом – в водной среде в присутствии данного иона бактерии теряют способность к размножению, и через некоторое время сами по себе уничтожаются. Данная особенность позволяет с высокой эффективностью применять диоксид хлора в первичном хлорировании. Причём дозы, требуемые для эффективной нейтрализации содержащихся в исходной природной воде органических загрязнений, гораздо ниже требуемой хлорпоглощаемости воды. Образующиеся в ходе гидролиза хлориты будут препятствовать развитию биозагрязнений, а также повысят стабильность осадка.

На этапе вторичного хлорирования в воду достаточно ввести только дозы, обеспечивающие концентрацию остаточного диоксида хлора в пределах 0,02-0,03 мг/л. Такая концентрация позволит полностью обеззаразить природную воду и предотвратить возможные загрязнения в сетях и системах водоснабжения.

3.3.2 Способы получения диоксида хлора

Выбор аппаратов для получения растворов диоксида хлора определяется в первую очередь выбором исходных реагентов. На данный момент времени наибольшее распространение получили методы получения диоксида хлора окислением, либо кислотованием растворов NaCl [13].

Основные технологические процессы при получении необходимого диоксида хлора:

1. Непрерывный процесс в виде добавление газообразного хлора в воду с дальнейшим смешением с раствором NaClO_2 .

2. Порционный процесс в виде добавление газообразного хлора в воду с дальнейшим смешением с раствором NaClO_2 .

3 Непрерывный процесс в виде добавление газообразного хлора в воду с дальнейшим смешением с раствором NaClO_2 и добавлением определенного количества кислоты.

4. Прямое введение кислоты в раствор NaClO_2 .

В основе метода непрерывного добавления газообразного хлора лежит использование смеси хлорита натрия и хлора для получения диоксида хлора. На рисунке 3.3.2.1 изображена схема данной системы.

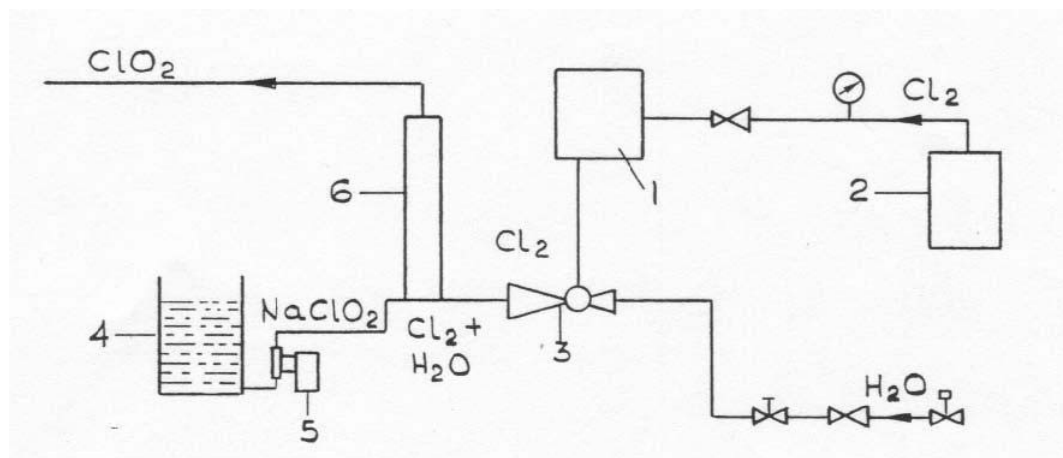
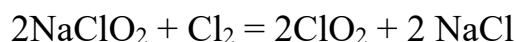


Рисунок 3.3.2.1 – Технология непрерывного приготовления диоксида хлора с использованием смеси жидкого хлора и хлорита натрия: 1 – хлоратор и вакуумные клапаны; 2 – баллоны с жидким хлором; 3 – инжектор хлора; 4 – емкость хранения хлорита натрия; 5 – дозатор на подачу хлорита натрия; 6 – реакционная башня.

Реакция протекает по следующему уравнению:



Данная установка работает по следующему принципу: на один из вводов генератора подается раствор жидкого хлора; с другого конца подводится раствор хлорита натрия. Направление ввода реагентов не играет значения, поскольку вводы могут работать в обоих направлениях. Для увеличения поверхности контакта реагентов используются Кольца Рашига, также служащие для их смешения. Получившийся раствор ClO_2 выпускается через верх генератора.

Данная установка обеспечивает выход продукта в пределах до 9 килограммов в час; причём для получения одного килограмма диоксида хлора необходимо примерно 1,4 килограмма чистого хлорита натрия.

Скорость движения раствора через тело генератора составляет примерно 6 л/сек, а время контакта не превышает нескольких секунд.

Производительность обеспечивается именно за счёт быстрой скорости реакции хлора.

Такие установки обладают существенным преимуществом: поскольку на многих водоисточниках органолептические показатели ухудшаются периодически, данная установка может быть использована именно для периодической очистки через отключение контура с хлоритом натрия. Данная особенность позволяет обеспечить более выгодный процесс обеззараживания.

В случаях, если в системе возникают недопустимые высокие обратные давления, либо идёт превышение по концентрации хлорной воды, щелочности либо большим разбросом в необходимых дозах хлора необходимо использовать порционный метод производства.

В данном процессе используется аналогичный способ получения диоксида хлора, но за счет использования более концентрированных растворов необходимый излишек хлора может быть снижен до 10%.

Схемы установки для порционного получения диоксида хлора представлена на рисунке 3.3.2.2

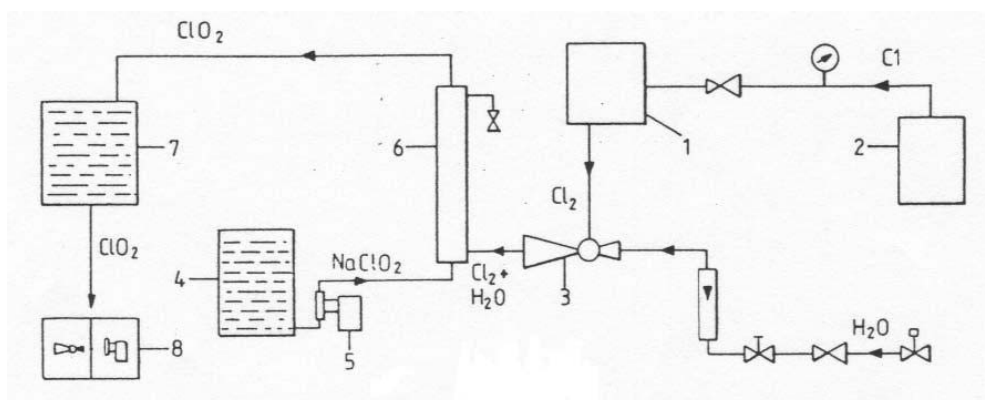


Рисунок 3.3.2.2. – Технологическая схема установки для порционного получения диоксида хлора: 1 – хлоратор и вакуумные клапаны; 2 – баллоны с жидким хлором; 3 – инжектор хлора; 4 – емкость хранения хлорита натрия; 5 – дозатор на подачу хлорита натрия; 6 – реакционная башня; 7 – резервуар с раствором диоксида хлора с системой автоматического контроля уровня; 8 – дозатор раствора диоксида хлора (система вакуумной подачи)

Процесс, происходящий в данной установке, отчасти аналогичен установке для непрерывного получения диоксида хлора. Жидкий хлор через систему дозаторов и растворителей подается в реакционную башню.

Забор хлорита натрия из резервуара и подача в реакционную башню осуществляется дозатором с одновременной подачей раствора хлора в соответствующей пропорции, учитывающей его концентрацию. С целью недопущения попадания данного реагента в обрабатываемую воду, системы управления хлоратором и системой дозирования синхронизируются с возможностью одновременной координации.

Диоксид хлора получается в реакционной башне. На выходе из неё образуется смесь, состоящая из хлора и его диоксида, далее по системе попадающая в резервуар.

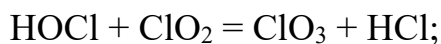
Также с резервуаром хлор диоксида соединен через вентиляционную линию инжектор. Эта мера предосторожности не обязательна для установок, где концентрация раствора меньше 2 г/л, она позволяет свободно удалять газообразный диоксид хлора, образующийся в результате дегазации раствора. Вода, проходящая через такой дренажный инжектор, может сбрасываться в качестве отходов без предварительной очистки (так как даже в случае абсорбции газа хлор диоксида его концентрация будет ничтожно мала и никак не повлияет на системы очистки стоков).

Для контроля рабочего цикла к резервуару с хлор диоксидом подключены датчики уровня. Так датчик верхнего уровня отвечает за определения максимального уровня и подает сигнал на остановку операции наполнения - останавливается дозатор и электромагнитный клапан перекрывает подачу воды разбавления и выключает вентиляционный и инжектор хлора, таким образом, останавливая дозирование хлора. Датчик нижнего уровня определяет минимальный уровень и дает сигнал на перезапуск генерационного цикла.

Следующий процесс с использованием хлор-хлоритов для получения диоксида хлора основан на добавлении кислоты в целях достижения оптимального уровня pH. Результаты проведенных

лабораторных испытаний [11] показали, что избыток хлора в реакции может быть заменен на соляную кислоту. Таким образом, снижается количество непрореагировавшего хлорита и повышается конечная чистота продукта при меньшей исходной концентрации хлора.

Уравнения процесса аналогичны ранее представленным, однако дополнительно проводится реакция по подавлению хлората:



Приведенная реакция поддерживается в рабочем состоянии наличием хлоритов, которые в свою очередь могут быть удалены путем добавления соляной кислоты. Понижение уровня водородного показателя ниже отметки 2,7 способствует удалению излишнего хлорита путем замедления реакции.

В процессе с использованием только кислоты и хлорита реакция образования диоксида хлора описывается следующим уравнением:



На данном уравнении можно увидеть, что добавление кислоты снижает выходной объем диоксида хлора до уровня примерно в 80% от объема, получаемого в реакциях с жидким хлором. Данная особенность не всегда позволяет использовать соляную кислоту как реагент для получения диоксида хлора, в первую очередь из-за высокой цены исходного реагента в виде хлорита натрия. В то же время, данная реакция должна проходить в сильных растворах кислот, что приводит к невыгодному увеличению концентрации соляной кислоты.

Наиболее выгодные условия для получения диоксида хлора имеются при использовании 7,5% раствора хлорита натрия и 9% раствора соляной кислоты [13]. Дозирование может происходить в равных соотношениях, причём низкая концентрация раствора соляной кислоты именно в таком соотношении не приводит к потенциально опасным производственным и технологическим ситуациям.

Оборудование, показанное на рисунке 3.3.2.3, представляет собой самый распространенный пример использования систем на основе соляной кислоты и хлорита. Дозаторы выпускают одинаковые по своей концентрации доли кислоты и хлорита натрия в камеру реакции, где

происходит основной процесс получения конечного продукта. На выходе получившийся раствор дополнительно разбавляется водой для получения более низких концентраций диоксида хлора. Процесс аналогичен таковому, рассмотренному на рисунке 3.3.2.2

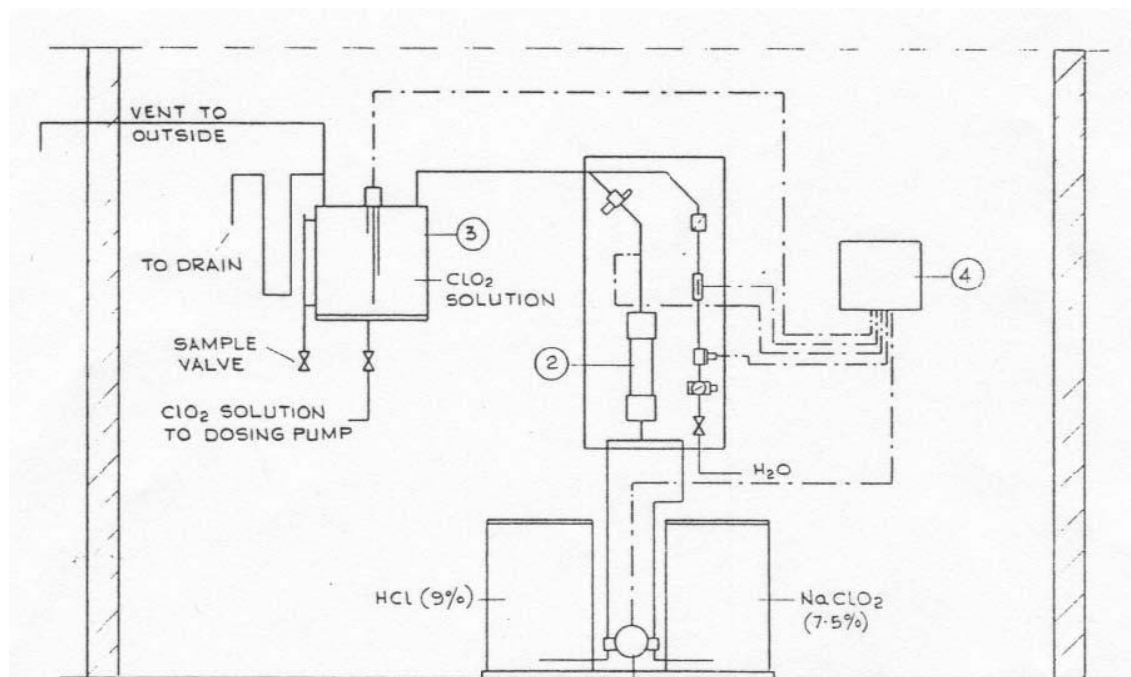


Рисунок 3.3.2.3 – Технологическая схема оборудования для получения диоксида хлора путем контакта кислоты и хлорита

3.4 Обеззараживание питьевой воды «Анолитом»

3.4.1 Свойства «Анолита»

Электрохимически активированный анолит марки «АНК» является дезинфектантом широкого диапазона. Так, он способен уничтожить практически все виды бактерий, вирусов и простейших, при этом являясь инертным по отношению к соединительной ткани высших организмов [15]. Данная особенность обуславливается отличиями данных видов живых организмов именно на клеточном уровне.

У высших микроорганизмов на клеточном уровне могут производиться многие виды активных оксидантов [16], таких как O₂ – (супероксид-анион), ¹O₂ (синглетный кислород), O₂²⁻ (пероксид анион), HO² – (анион гидропероксида), HO[·], ClO и др. Данные клетки характеризуются весьма высокой системой защиты от окисления, которая

препятствует неблагоприятному воздействию данных видов соединений на жизненно важные органы. Эти свойства наблюдаются из-за наличия оболочки, в составе которой находятся элементы со свойствами образования акцепторно-донорных связей на атомарном уровне. Основная масса микроорганизмов не обладает такой системой защиты, поэтому электрохимически активные соединения для них губительны.

В анолите АНК бактерицидные вещества не несут угрозы для клеток человека, поскольку характеризуются схожим составом оксидантов с набором таковых у самого организма.

Помимо данного фактора, можно выделить следующие характеристики анолита, обуславливающие его высокую обеззараживающую способность: низкая минерализация и высокая способность к переносу окислителей во внутриклеточную среду, а также разнообразие находящихся в составе анолита оксидантов [17].

3.4.2 Получение «Анолита»

Анолит АНК получают на специальных системах, главным звеном в которых является реакторы с анодной и катодной зонами. При получении данных типов растворов производится совместное электрохимическое и физическое воздействия в зоне электрода на обрабатываемую воду [18]. Классификация и области применения растворов, образуемых в установках электрохимической активации растворов, показаны на рисунке 3.4.1.1.

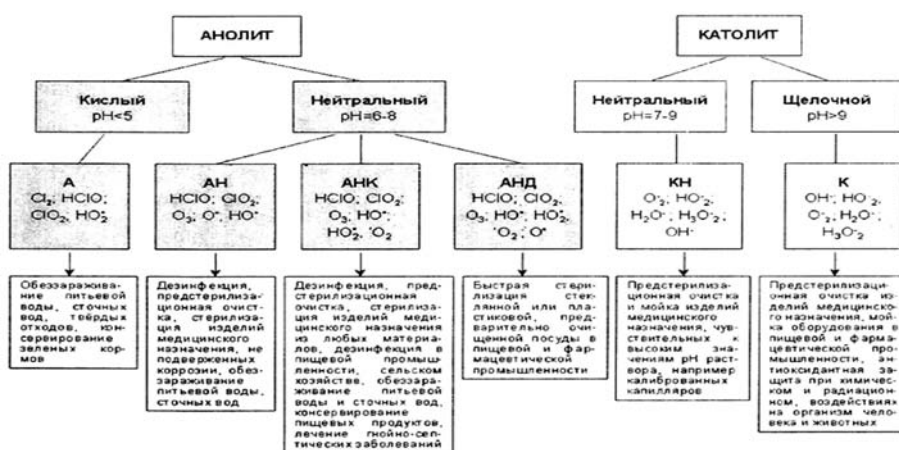


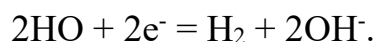
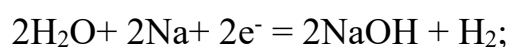
Рисунок 3.4.1.1 - Классификация и некоторые области применения электрохимически активированных растворов, синтезированных в установках.

Анолит марки АНК готовится из раствора поваренной соли с концентрацией до 0,5% на пресной или обессоленной воде. Конечное значение солесодержание в растворе не должно превышать 5,5 г/л. Во время процесса получения анолита также образуется такое соединение, как католит – высокоэффективного средства для клининга, который может быть реализован как товарный продукт. Общая схема синтеза анолита АНК состоит из первичной обработки раствора в катодной камере с дальнейшим удалением свободного водорода и определенной части исходного раствора в анодной камере реактора. Данное соотношение по удаляемым продуктам определяется необходимым значением рН товарного продукта, который должен находиться в диапазоне нейтральных значений.

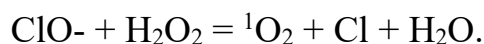
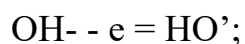
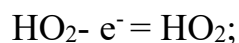
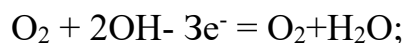
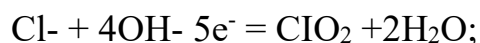
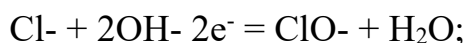
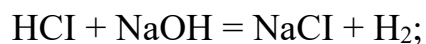
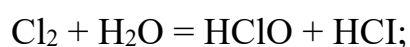
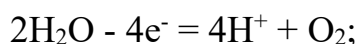
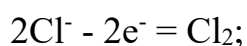
3.4.3 Химический состав анолита «АНК»

Химический состав получаемого анолита определяется исходными реагентами для его получения и полностью определяется ими, а именно водой и хлоридом натрия.

При обработке раствора на катодах протекают следующие реакции:



На аноде же протекают химические реакции с образованием главных обеззараживающих агентов анолита – оксидантов:



Концентрация получаемых оксидантов напрямую зависит от содержания NaCl в первичном растворе. На рисунке 3.4.2.1 указаны две области – область «А», показывающая необходимые концентрации раствора хлорида натрия для получения анолита с целью обеззараживания природной воды, и область «В» для анолитов широкого применения.

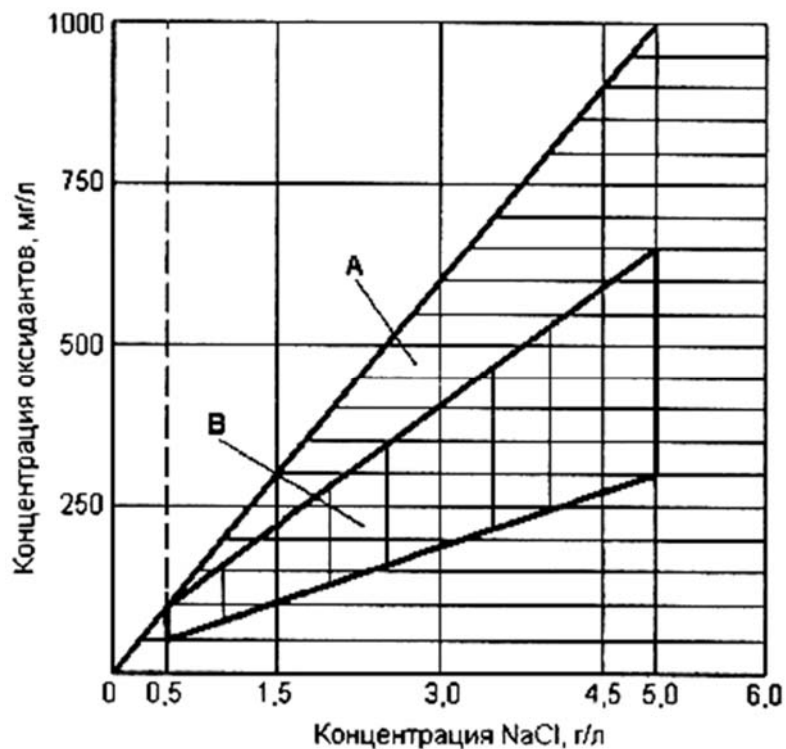


Рисунок 3.4.2.1 - Соотношение концентрации оксидантов в анолите НК, получаемом в установках СТЭЛ, и концентрации хлорида натрия в сходном растворе: А - область возможных значений; В - область значений для анолитов АНК широкого спектра применения.

Главными факторами биоцидной активности анолитов являются: синтезированные в процессе получения анолита оксиданты [16]. В ходе длительного периода складирования и хранения данные соединения изменяют свои химические и структурные свойства. Общая их стабильность находится в прямой зависимости от концентрации метастабильных продуктов реакций и их соотношения. Некоторые из них, такие как пероксид водорода, крайне нестабильны и играют роль катализаторов разных химических реакций. Основные же обеззараживающие компоненты являются стабильными и сохраняются в растворе в течение достаточно длительного времени. После же полной

нейтрализации данных компонентов в растворе анолит уже не обладает высокой биоцидной способностью, и не может быть использован в целях дезинфекции питьевой воды.

На рисунке 3.4.2.2 показано соотношение концентрации хлор- и кислородсодержащих оксидантов, образующихся в процессе синтеза анолита АНК, в зависимости от содержания хлорида натрия в исходном растворе.

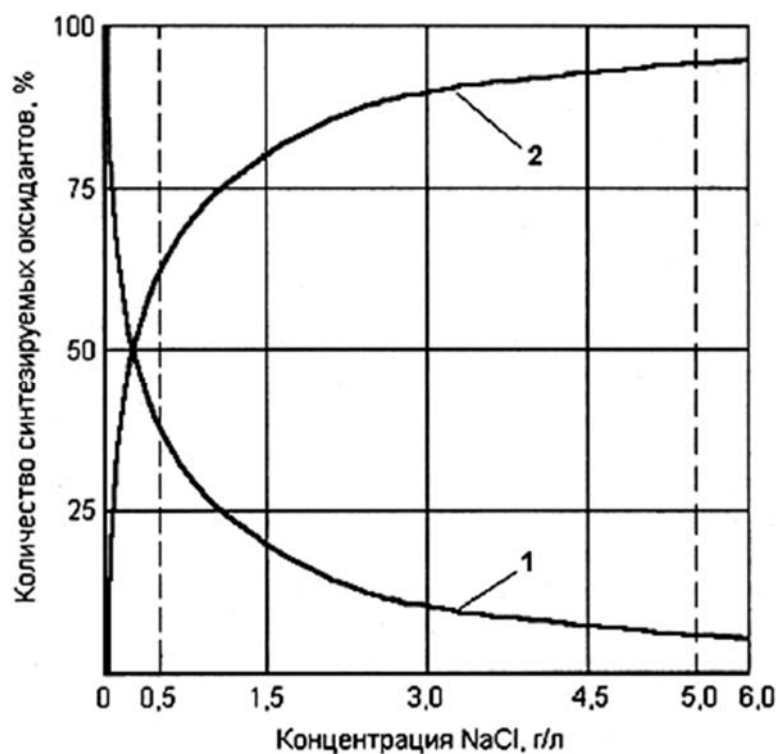


Рисунок 3.4.2.2 - Количественное соотношение гидропероксидных и хлорактивных оксидантов, образующихся при получении анолита АНК в зависимости от концентрации хлорида натрия в исходном растворе: 1 - гидропероксидные оксиданты; 2 - хлорактивные оксиданты.

3.5 Выводы по разделу

1) Хлорирование является неотъемлемой частью процесса обеззараживания питьевой воды, поскольку только наличие остаточного хлора способно обеспечить надежную санацию сооружений и обеспечить поддержание требуемого качества воды по эпидемиологическим показателям в ходе её транспортировки до конечного потребителя;

2) Доза хлора, необходимая для полного обеззараживания обрабатываемой воды, зависит от хлорпоглощаемости, и не всегда может быть правильно определена, особенно в периоды интенсивного цветения водоёмов или во время паводков.

3) Активность хлора при воздействии на патогенные микроорганизмы зависит от вида хлорсодержащего реагента, при помощи которого производится обеззараживание. Так, например, диоксид хлора обладает более выраженным бактерицидным и вирулидным действием, чем жидкий хлор или гипохлорит натрия.

4) Действие хлора напрямую зависит от условий протекания реакций гидролиза и времени контакта с обрабатываемой водой, поэтому для более полного обеззараживания воду необходимо предварительно подготовить по всем необходимым показателям.

5) Хлор также обладает свойством улучшения показателей коагуляции и последующего процесса фильтрования за счёт окисления органических веществ, которые после своей инактивации способны к выпадению в осадок.

6) Различные вариации применения хлорсодержащих реагентов дают пространство для внедрения данного процесса во многих станциях водоподготовки, независимо от их производительности;

7) Необходимо тщательно следить за процессами возможного образования хлорорганических веществ, которые могут протекать из-за неравномерной и недостаточной работы сооружений по предварительной очистке воды.

8) Несмотря на недостатки в виде сложности и опасности технологического процесса, а также неравномерного эффекта при воздействии на патогенные микроорганизмы, хлорирование остаётся самым распространённым и на данный момент времени единственным средством для обеспечения пролонгирующего действия обеззараженной воды в распределительных сетях и системах.


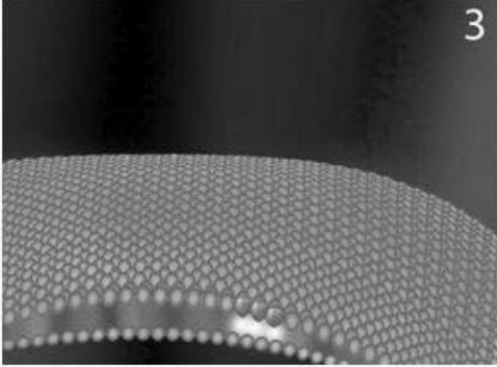
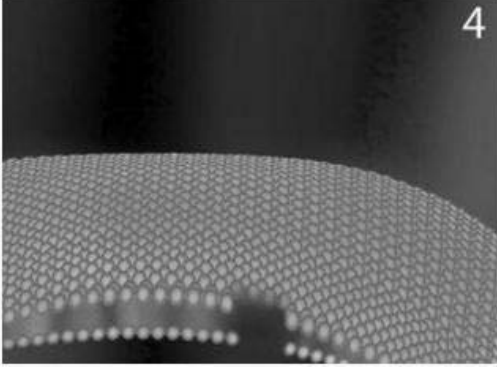

4 ОЗОНИРОВАНИЕ

4.1 Механизм воздействия озона

Озон является экологически чистым дезинфектантом при его использовании в малых дозах, требуемых непосредственно для дезинфекции. Его применение на станциях водоподготовки позволяет сократить использование опасных химических реагентов из-за большей биоцидной активности. Если сравнивать озон с рассмотренными ранее методами хлорирования, то можно отметить его преимущество при дезинфекции и санитарной обработке материалов, поверхностей и трубопроводов [19]. В силу особенностей строения и активности, молекула озона способна уничтожать потенциально опасные микроорганизмы в несколько тысяч раз быстрее молекулы хлора.

Механизм воздействия озона на бактериальную клетку основан на следующем: попадая на клеточную стенку, озон приводит к разрушению находящихся в составе клетки липидов и липопротеинов, повреждение которых оказывается несовместимым с продолжением жизнедеятельности клетки. Более сложные организмы имеют собственные системы защиты клеток ДНК и РНК от данного действия озона, чем объясняется его нетоксичность при воздействии на людей в рекомендуемых дозах. Примерный механизм действия озона и результат его воздействия на некоторые патогенные микроорганизмы приведен в таблицах 4.1.1 и 4.1.2 соответственно

Таблица 4.1.1 – Механизм действия озона на бактериальные клетки

<p>Здоровые бактериальные клетки (палочки), грамотрицательная бактерия.</p>	 <p>1</p>
<p>Как только молекула озона проконтактировала с клеточной стенкой, в ней образуется разрыв благодаря окислению фосфолипидов и липопротеинов, что приводит к образованию пероксидов; реакция называется окислительным взрывом.</p>	 <p>3</p>
<p>Созданные в результате действия озона отверстия (пробоины) в клеточной стенке травмируют (приводят к стрессу) клетку бактерии.</p>	 <p>4</p>
<p>Бактериальная клетка постепенно теряет свою форму, в то время как молекулы озона продолжают разрушать клеточную стенку.</p>	 <p>5</p>

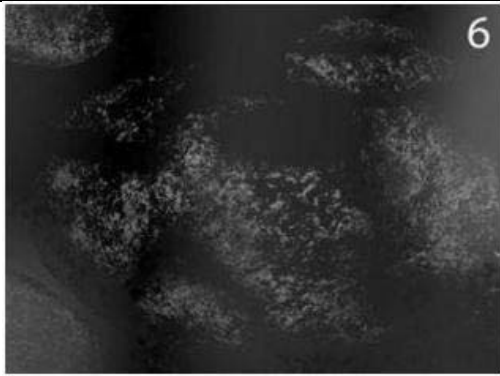
<p>После воздействия озона на бактериальную клетку в течение нескольких секунд, клеточная стенка бактерий больше не способна поддерживать свою форму и клетка погибает.</p>	
---	--

Таблица 4.1.2. Примеры действия озона на различные микроорганизмы

Микроорганизм	Результат действия
<i>Bacillus sp.</i>	Клетки разрушаются при действии озона ($c=0,2$ мг/л) в течение 30 секунд.
<i>Bacillus anthracis</i>	Клетки чувствительны к действию озона.
<i>Bacillus cereus</i>	99% клеток разрушаются при действии озона ($c=0,12$ мг/л) в течение 5 мин (реакция в воде).
<i>Bacillus cereus</i> (споры)	99% клеток разрушаются при действии озона ($c=2,3$ мг/л) в течение 5 мин (реакция в воде).
<i>Bacillus subtilis</i>	Уменьшение количества клеток на 90% при действии озона ($c=0,1$ мг/л) в течение 33 минут.
<i>Bacillus sp.</i>	Клетки разрушаются при действии озона ($c=0,2$ мг/л) в течение 30 секунд.

Микроорганизм	Результат действия
<i>Bacillus anthracis</i>	Клетки чувствительны к действию озона.
<i>Bacillus cereus</i>	99% клеток разрушаются при действии озона (с=0,12 мг/л) в течение 5 мин (реакция в воде).
<i>Bacillus cereus</i> (споры)	99% клеток разрушаются при действии озона (с=2,3 мг/л) в течение 5 мин (реакция в воде).
<i>Bacillus subtilis</i>	Уменьшение количества клеток на 90% при воздействии озона (с=0,1 мг/л) в течение 33 минут.
<i>Clavibacter michiganense</i>	99,9% клеток разрушаются при действии озона (с=1,1 мг/л) в течение 5 мин.
<i>Clostridium sp.</i>	Клетки чувствительны к действию озона.
<i>Clostridium botulinum</i> (споры)	Пороговое значение концентрации озона от 0,4 до 0,5 мг/л.
<i>Escherichia coli</i> (из фекалий)	Клетки разрушаются при действии озона (с=0,2 мг/л) в течение 30 секунд (реакция на воздухе).
<i>Escherichia coli</i> (из чистой воды)	99,9% клеток разрушаются при действии озона (с=0,25 мг/л) в течение 1,6 мин.

Микроорганизм	Результат действия
<i>Escherichia coli</i> (из загрязненной воды)	99,9% клеток разрушаются при действии озона ($c=2,2$ мг/л) в течение 19 мин.
<i>Mycobacterium avium</i>	99,9% клеток разрушаются при действии озона ($c=0,17$ мг/л) в воде.
<i>Mycobacterium fortuitum</i>	90% клеток разрушаются при действии озона ($c=0,25$ мг/л) в течение 1,6 мин (реакция в воде).
<i>Pseudomonas sp.</i>	Сверхчувствительные клетки.
<i>Salmonella sp.</i>	Сверхчувствительные клетки.
<i>Salmonella typhimurium</i>	99,9% клеток разрушаются при действии озона ($c=0,25$ мг/л) в течение 1,67 мин (реакция в воде).
<i>Staphylococcus sp.</i>	Клетки разрушаются при действии озона концентрацией от 1,5 до 2 мг/л.
<i>Streptococcus sp.</i>	Клетки разрушаются при действии озона ($c=0,2$ мг/л) в течение 30 секунд.
<i>Vibrio cholera</i>	Сверхчувствительные клетки.

Отдельно стоит сказать о том, что бактерицидное действие озона наблюдается только при его воздействии дозой выше определенного значения; воздействие окислителя с пониженной дозой приводит либо к незначительному эффекту, либо к полному его отсутствию. Данная

особенность называется эффектом «всё или ничего» [20], а значение необходимой концентрации – пороговым значением биоцидности.

Также в современных условиях необходимо рассмотреть способность озона к уничтожению вирусов в естественных условиях.

Вирус (лат. *virus* — яд) является неживым организмом, ведущим паразитический образ жизни и способным размножаться только на живом организме. Вирус представляет собой молекулу ДНК или РНК в пептидной оболочке – капсиде. Именно наличие данной оболочки позволяет отделять вирусы от так называемых вирионов – подобных вирусам РНК

Из-за главной особенности строения, вирусы являются исключительно паразитами. Они подразделяются на различные классы и семейства, в зависимости от генома и способа его репликации. Все вирусы подвержены обезвреживающему воздействию озона, но при этом в разной степени, поскольку не имеют защиты от окисления, в отличие от клеток высших организмов.

Вирусы, оболочка которых состоит преимущественно из липидов, в высшей степени подвержены губительному воздействию озона. При нарушении данной структуры главный механизм вирусов – ДНК или РНК – теряют способность к репликации, вследствие чего происходит инактивация вируса. Разрушение вирусов с липидной оболочкой посредством воздействия озона происходит за счёт перестройки связей в жировых соединениях и разрыве этой оболочки, что в конечном итоге приводит к уничтожению вируса.

Вирусы, обладающие липидной оболочкой, включают следующие семейства *Herpesviridae* (гепатит В), *Flaviviridae* (гепатит С, желтая лихорадка), *Herpesviridae* – большое семейство, включающее такие вирусы, как ветряная оспа, цитомегаловирус и вирус Эпштейна-Барра, *Orthomyxoviridae* (вирус гриппа); *Paramyxoviridae* (свинка, корь); *Coronaviridae*; *Rhabdoviridae* (вирус бешенства); *Togaviridae* (краснуха, энцефалит); *Bunyaviridae*; *Poxviridae* (оспа); *Retroviridae* (ВИЧ), *Filoviridae* (вирус Эбола).

Вирусы, в составе которых отсутствует липидная оболочка, именуются голыми вирусами. Они включают в себя только молекулу

ДНК или РНК с белковой оболочкой, и поэтому более устойчивы при воздействии озона. Данная группа включает в себя следующие семейства: Adenoviridae (респираторные инфекции), Picornaviridae (полиовирус, вирус Коксаки, гепатит), Caliciviridae (гепатит E), Papillomaviridae.

Бактерицидное воздействие озона также заключается в способности перестраивать структуру связи вируса с живой клеткой, что препятствует попаданию вируса в тело клетки по причине невозможности взаимодействия с оболочкой. Также стоит отметить, что синглетные виды кислорода, образующиеся в воде при её контакте с озоном, приводят к образованию перекиси водорода и гидроксила; при взаимодействии непосредственно с перекисью озон способен образовывать соединение пероксон [21], которое обладает ярко направленным обеззараживающим действием.

Примеры воздействия озона на некоторые вирусы приведены в таблице 4.1.3.

Таблица 4.1.3. Примеры действия озона на вирусы

ВИРУС	РЕЗУЛЬТАТ ДЕЙСТВИЯ
Бактериофаг f2	99,99% вирионов разрушается при действии озона (с=0,41 мг/л) в течение 10 с (реакция в воде)
Вирус Коксаки А9	95% вирионов разрушается при действии озона (с=0,035 мг/л) в течение 10 с (реакция в воде)
Вирус Коксаки В5	99,99% вирионов разрушается при действии озона (с=0,4 мг/л) в течение 2,5 мин (реакция проводилась в грязных сточных водах)

ВИРУС	РЕЗУЛЬТАТ ДЕЙСТВИЯ
Энтеровирус	Полное разрушение при воздействии в течение менее, чем 30 с при концентрации озона от 0,1 до 0,8 мг/л
Вирус гепатита А	99,5% вирионов разрушается при действии озона ($c=0,25$ мг/л) в течение 2 с (реакция проводилась в фосфатном буфере)
Вирус герпеса	Полное разрушение при воздействии в течение менее чем 30 с
Вирус гриппа	Пороговое значение концентрации озона от 0,4 до 0,5 мг/л.
Вирус полиомиелита	99,99% вирионов уничтожается при действии озона ($c=0,3 - 0,4$ мг/л) в течение 3-4 мин.
Рабдовирус	Полное разрушение при воздействии в течение менее, чем 30 с при концентрации озона от 0,1 до 0,8 мг/л

4.2 Технологические схемы озонирования воды

Озон достаточно широко используется в технологиях промышленного и питьевого водоснабжения, в частности, для окисления различных примесей, а также для обеззараживания воды. Выбор способа и его конструктивное оформление напрямую зависят от качественного и количественного состава обрабатываемых вод, наличия в них растворенных газов, примесей и, как следствие, необходимой степени насыщения их озоном для обеспечения требуемой концентрации растворенного озона.

Озон может использоваться в технологических схемах в таких формах, как: прямое окисление, не прямое окисление через воздействие радикалами, озонлиз и катализ.

На эффективность применения оборудования в первую очередь влияет смешение и растворение озона в обеззараживаемой воде. В данном случае наблюдается обратная зависимость – чем лучше озон распределен и растворен в объеме обрабатываемой воды, тем меньшая его доза необходима для её дезинфекции. При этом необходимо уделить особое внимание конечной стадии перемешивания реагента (озона) с обрабатываемой водой [22].

При выборе технологических схем озонирования воды следует обращать внимание на следующие пункты:

1. Изначальный выбор и разработка технологической схемы работы очистных сооружений водопровода зависит от результатов анализа воды из водоисточника; при этом на этапе проектирования схемы озонирования выбирают и назначают, исходя из полученных в ходе этого анализа показателей. Но в то же время упускается тот факт, что качество воды в источнике непостоянно во всём его створе, и может изменяться в различных точках водозабора и по ходу течения. Данный факт приводит к необходимости обработки воды одного и того же водоисточника различными схемами озонирования, что приводит к неучтенным расходам.

2. Многие проектные организации при определении дозы озона для обеззараживания воды принимают данный показатель «на глаз». Расчёт необходимого оборудования и выставление его на тендерный заказ производится без необходимых на то расчётов и проработок полной схемы водоподготовки. Данные аспекты идентифицируются только во время работ по пусконаладке оборудования, когда исправление проекта уже не представляется возможным. Либо же технологические расчёты производятся под уже выбранное и поставленное оборудование, что приводит к неправильному и неэффективному использованию озона.

3. Многие ведущие инженеры предприятий по водоподготовке считают, что использования озона как дезинфектанта позволяет полностью отказаться от хлора. Однако озонирование позволяет отказаться только от первичного хлорирования, либо снизить необходимую дозу хлора, однако полностью исключить данный реагент их схемы водоподготовки невозможно по причине отсутствия у озона пролонгирующего действия.

4. В некоторых случаях, использование озонирования аргументируется как способ отказа от реагентной обработки воды коагулянтами и флокулянтами. Этот подход абсолютно неверный, поскольку при заборе воды из поверхностных источников со значительными показаниями по взвешенным веществам и цветности, первичное отстаивание и коагулирование является одним из главных этапов по её очистке. Использование озона может лишь снизить расход реагентов, но полностью отказаться от них не представляется возможным.

5. Одним из направлений применения озонирования является установка данных аппаратов на станциях небольшой производительности (до 2000 м³/сут). В то же время многие предприятия, выпускающие комплектные установки по озонированию и фильтрованию воды ошибочно утверждают, что данные установки способны очистить поверхностные воды с практически любым составом загрязнений до требований ПДК воды питьевого качества. Данный подход также является неверным, поскольку для очистки поверхностных вод от загрязнений требуется одно- или двухступенчатая схема очистки с

применением реагентов для интенсификации процессов отстаивания и выделения из воды взвешенных веществ.

4.3 Выводы по разделу

1) Характеристика озона как высокоактивного бактерицидного средства базируется в первую очередь, за счёт его способности воздействовать на клеточную оболочку, а также за счёт возможности окислять рецепторы вируса, благодаря которым вирус попадает в тело хозяина. Озон применяется при борьбе с резистентными к антибиотикам видам патогенов, поэтому он играет огромную роль при профилактике вирусных и иных эпидемий, способных распространяться в водной среде.

2) Данная технология получила широкое распространение во многих сферах водоподготовки из-за простоты технологии и возможности окисления сопутствующих загрязнений, помимо самого эффекта обеззараживания.

3) Озонирование более эффективно по отношению к бактериям и вирусам, чем хлорирование, но в то же время неспособно обеспечить эффект последствия, из-за чего в технологические схемы необходимо добавлять этап хлорирования для достижения требуемых концентраций по остаточному хлору в целях обеспечения эффекта последствия.

4) На данный момент времени в российской практике коммерческой водоподготовки отсутствует наработанный опыт проектирования установок для озонирования воды, в связи с чем часто возникают ошибки ещё на этапе проектирования, и, как следствие, неправильно организованные пусконаладочные работы.

5 ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЕ ВОДЫ УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

5.1 Механизм воздействия ультрафиолетовых лучей на бактериальные клетки

УФ-стерилизация наиболее перспективный метод обеззараживания воды с высокой эффективностью по отношению к патогенным микроорганизмам, не приводящий к образованию вредных побочных продуктов, чем иногда грешат хлорирование или озонирование [23].

Установлено, что наибольшим бактерицидным воздействием обладают ультрафиолетовые лучи с длиной волны от 200 до 295 нм. Спектр излучения и кривая бактерицидной чувствительности микроорганизмов и вирусов приведены на рисунке 5.1.1.

Данный спектр излучения обладает наибольшим бактерицидным действием, причём его пик приходится на значения длины волны порядка 254 нм. Излучение данной частоты способно оказывать влияние на химические связи в молекулах ДНК и РНК, что приводит к невозможности микроорганизмов производить реакции энергетического обмена и продолжать жизнедеятельность [24]. Ультрафиолетовое излучение гораздо эффективнее воздействует на вирусы, чем хлор или озон, поэтому его применение в практике водоподготовки позволяет полностью нейтрализовать многие вирусы, которые невозможно удалить обычными методами.

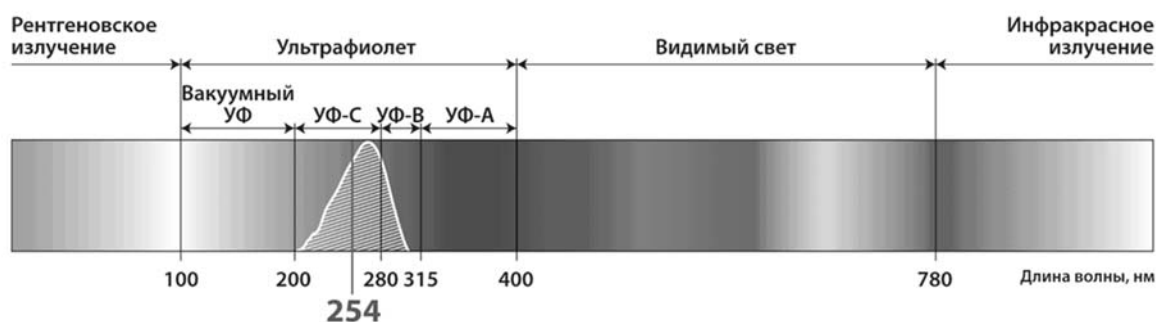


Рисунок 5.1.1 - Спектр излучения и кривая бактерицидной чувствительности микроорганизмов и вирусов

Главным технологическим аспектом применения метода ультрафиолетового обеззараживания является тот факт, что такие установки не обладают крупными габаритами и могут быть внедрены на очистные станции с любой схемой водоподготовки. Такая технология обеззараживания воды не приводит к образованию токсичных продуктов при взаимодействии с соединениями, находящимися в воде, при этом передозировка таким излучением попросту невозможна, из-за отсутствия активных агентов.

5.2 Технологические схемы обработки воды ультрафиолетовым излучением

Возможность внедрения установок для ультрафиолетового обеззараживания воды в первую очередь определяется качеством воды, подаваемой на дезинфекцию. На процесс обеззараживания воды ультрафиолетовым излучением не оказывает воздействия параметры водородного показателя и температуры воды, однако наличие веществ, способных поглощать данный вид излучения, приводит к снижению дозы облучения, получаемой микроорганизмами. Превышение значений показателей по взвешенным веществам и цветности, характеризующих наличие соединений, способных к поглощению излучения, требует дополнительной обработки воды [25].

Основными промышленно применяемыми источниками УФ-излучения являются ртутные лампы высокого, а также низкого давления, в том числе их новое поколение – амальгамные. Лампы высокого давления обладают высокой единичной мощностью (до нескольких десятков кВт), но более низким КПД (9–12 %) и меньшим ресурсом, чем лампы низкого давления (КПД 40 %), единичная мощность которых составляет десятки и сотни ватт. УФ-системы на амальгамных лампах чуть менее компактны, но гораздо более энергоэффективны, чем системы на лампах высокого давления. Поэтому требуемое количество УФ-оборудования, а также тип и количество используемых в нем УФ-ламп зависят не только от требуемой дозы УФ-облучения, расхода и физико-

химических показателей качества обрабатываемой среды, но и от условий размещения и эксплуатации.

Контроль и диспетчеризация по работе установки ультрафиолетового обеззараживания осуществляется при помощи датчиков излучения, настроенных на длину волны 254 нм. Понижение интенсивности ниже данного порога предупредит персонал станции либо ответственного специалиста о том, что необходимо принять меры по ликвидации неполадки в системе.

Комплектация и оснащённость УФ-установок могут изменяться и зависеть от конкретного случая применения. Счетчик времени наработки лампы, например, является важнейшим инструментом и должен присутствовать в каждой установке. По истечении срока службы лампы подается сигнализация, которая позволяет вовремя заменить лампы на новые. Для защиты от перегрева мощных УФ-ламп должна быть предусмотрена аварийная индикация, своевременно предупреждающая о росте температуры внутри камеры. Перечисленные выше функции – необходимый минимум для стабильной и эффективной работы УФ-системы. Если качество воды, определяемое коэффициентом пропускания, и расход меняются в широких пределах – целесообразно использовать систему регулировки мощности. Система регулировки мощности позволяет снижать мощность ламп при изменении одного из параметров, тем самым уменьшая расходы на электроэнергию.

5.2 Выводы по разделу

1) К преимуществам УФ-обеззараживания можно отнести: эффективная обработка больших объемов питьевой воды; облучение ультрафиолетовыми лучами абсолютно не меняет физическую и химическую структуру, сохраняя все ее природные характеристики; уничтожается высокий процент всех болезнетворных бактерий и микроорганизмов; соотношение эффективность – стоимость – это самый выгодный и безопасный метод дезинфекции, абсолютно безопасный для здоровья человека; метод позволяет провести надёжное обеззараживание не только в отдельных ёмкостях, но и при движущемся потоке; в отличие от применения реагентов, превысить дозу облучения практически невозможно, поэтому УФ обеззараживание питьевой воды абсолютно

безопасно, исключен фактор непредвиденных ситуаций; скорость обработки позволяет существенно снизить себестоимость дезинфекции. Предварительная очистка ультрафиолетом сокращает расход химических реагентов и гарантирует сохранение природной структуры жидкостей.

2) Однако очистка воды ультрафиолетовым излучением имеет и собственные недостатки: воздействие ультрафиолетового излучения кратковременно и не имеет продолжительного действия, за счет чего вода при выходе из ультрафиолетовой установки более не обеззараживается; если процент железа в воде превышает определенный показатель, то эффективность УФ лучей снижается, поэтому необходимо дополнительное обезжелезивание; наличие в воде крупных примесей снижает эффективность бактерицидной обработки. Взвеси создают непроницаемую оболочку, через которую не могут проникнуть бактерицидные лучи. Поэтому (УФ) обеззараживание воды ультрафиолетом можно выполнять после тщательно физической многоступенчатой фильтрации.

Важно понимать, что питьевая вода абсолютно безопасна только при действии бактерицидного облучения. При дальнейшем прохождении по старым трубам и коллекторам возможно повторное попадание в жидкость болезнетворных микроорганизмов. По этой причине УФ установки очистки должны быть установлены на последнем, финальном этапе очистки питьевой воды.

6 ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ СПОСОБ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ ВОДЫ

6.1 Механизм бактерицидного действия кавитационных жидкостей

Одним из возможных способов обеззараживания воды без применения реагентов является её обработка при помощи гидродинамического воздействия. Обеззараживающее действие в данном случае наблюдается за счёт воздействия парциального давления схлопывающихся пузырьков газа, проникающих в тело клетки либо разрушающих её клеточную оболочку [26]. Данный метод не влияет на исходные свойства обрабатываемой воды.

Отдельно стоит проанализировать механизм образования и разрушительного воздействия пузырьков газа в жидкостях.

Кавитация, или кавитационное течение – явление выделения из воды содержащейся в ней газов в областях пониженного давления с последующим их растворением в областях повышенного давления. Процесс образования пузырьков обусловлен диффузией газов в уже образовавшиеся пузырьки; повышенным давлением газа внутри пузырьков по отношению к жидкости и увеличением объёмного веса пара в пузырьке. Последующее увеличение давления в жидкости приводит к схлопыванию пузырьков, причём давление в таких случаях может быть крайне высоким, и сопровождается значительным тепловым воздействием (температура газа в пузырьках может достигать нескольких сотен и даже тысяч градусов). В процессе схлопывания происходят сильные сжатия с образованием ударных волн, которые приводят к разрушению оболочек клеток и самих микроорганизмов на границе кавитации.

6.2 Технологические схемы кавитационного обеззараживания воды

Установка, принципиальная схема которой приведена на рисунке 6.2.1, состоит из центробежного насоса 1 с входным 2 и выходным 3 патрубками и рабочим колесом 4, эжекторной трубки 5, установленной осесимметрично с входным патрубком 2 центробежного насоса и всасывающим трубопроводом 6. На эжекторной трубке 5 расположены расходомер воздуха 7 и регулирующий вентиль 8, а на выходном патрубке 3 установлены датчики давления 9, расхода воды 10 и

температуры воды 11. Рабочее колесо 4 центробежного насоса 1 соединено с приводом 12, а входной патрубок 2 — с всасывающим трубопроводом 6, погруженным в емкость 13 с исходной водой. Выходной патрубком 3 центробежного насоса соединен с нагнетательным трубопроводом 14.

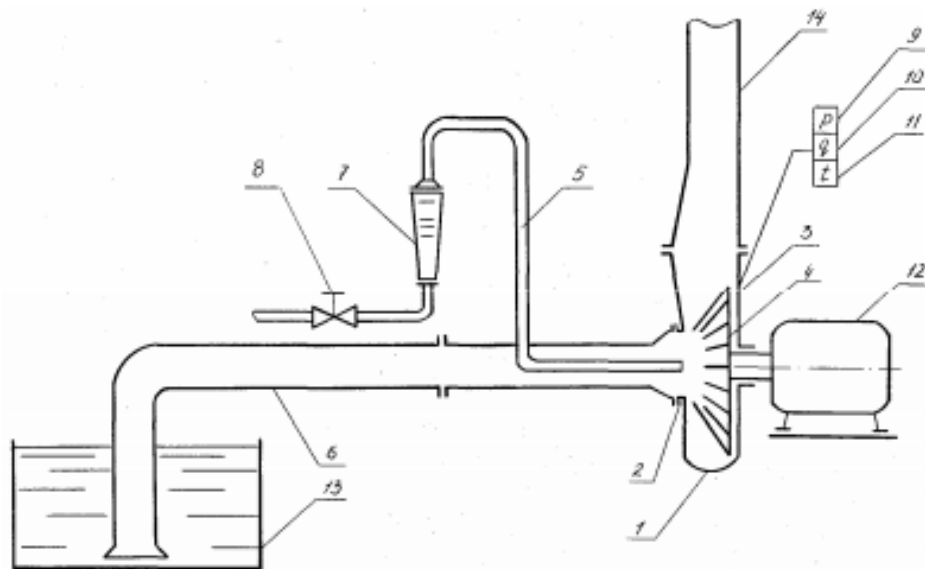


Рисунок 6.2.1 – Принципиальная схема установки для кавитационного обеззараживания воды [27]

Максимальная степень обеззараживания при кавитационной обработке воды составляет 70 % [27]. Зависимость бактерицидного эффекта от доли предельной растворимости воздуха имеет выраженный максимум. Это говорит о том, что процесс обеззараживания возможно проводить только в строго ограниченной области значений объемов воздуха, подаваемого на аэрацию.

Высокая степень обеззараживания воды достигается при ее аэрации под разрежением и кавитации в зоне рабочего колеса насоса, при этом аэрация воды составляет 0,6...1 от предела растворимости воздуха в воде при температуре ее обработки и соответствующем давлении на выходе насоса.

Увеличение аэрации воды сверх предела растворимости воздуха в воде при температуре ее обработки и соответствующем давлении на выходе насоса резко снижает эффект обеззараживания из-за демпфирующего влияния избыточных пузырьков воздуха, нивелирующих кавитационные колебания давления в зоне рабочего

колеса насоса. Кроме того, чрезмерное количество воздуха в воде приводит к «захлебыванию» насоса и отрицательному явлению помпажа.

Уменьшение аэрации воды ниже предела 0,6 от максимально возможной растворимости воздуха в воде при температуре ее обработки и соответствующем давлении на выходе насоса также резко снижает степень обеззараживания из-за ограниченного кавитационного эффекта в зоне рабочего колеса насоса.

Экспериментальные исследования по влиянию кавитации на степень обеззараживания показали, что 100 % обеззараживания не достигается. Объяснить это можно тем, что не вся жидкость попадает в область кавитации. Для увеличения степени обеззараживания целесообразно использовать каскад установок [27].

Данный способ обеззараживания воды можно использовать для обеззараживания и других жидкостей и растворов при соответствующем растворении в них воздуха, так как кавитационный эффект имеет место во всех жидкостях.

Также вместо воздуха можно подавать воздух, обогащенный кислородом или озоном. В этом случае помимо кавитационного эффекта обеззараживания возникает дополнительный эффект обеззараживания за счет интенсивного окисления. Расход газовой фазы в этом случае выбирается с учетом максимальной ее растворимости при рабочей температуре жидкости и ее давлении в выходном патрубке.

Кроме того, вместо центробежных насосов можно использовать осевые насосы, также приводящие к кавитации при аэрации воды. Данный способ обеззараживания воды прост в реализации, и его несложно внедрить на действующих станциях водоподготовки.

Достаточно сильное гидродинамическое возмущение, также приводящее к механическому разрушению микроорганизмов, может быть вызвано с помощью процесса дросселирования [26].

Дросселирование — процесс необратимого понижения давления струи жидкости при прохождении через сужение в канале. Если вследствие какого-либо препятствия поперечное сечение струи внезапно сужается, а затем расширяется, происходит падение давления в объеме

жидкости, расположенном за источником гидравлического сопротивления, что объясняется значительным трением в месте сужения. Уменьшение давления в потоке не сопровождается внешней работой, поэтому процесс является необратимым. При дросселировании работа расширения струи жидкости полностью затрачивается на образование турбулентных завихрений и преодоление сопротивления трения.

Можно предположить, что при определенных условиях дросселирование воды приведет к разрушению микроорганизмов. Резкий перепад давления, «вскипание» воды в результате возникновения и роста пузырьков газа (микроскопический пузырек, попадая в область разряжения, сильно расширяется, так как давление содержащихся в нем пара и газа оказывается больше давления в жидкости) являются факторами обеззараживания.

Предполагается, что механизм процесса обеззараживания при дросселировании следующий.

Микроорганизмы, содержащиеся в газожидкостной смеси, находятся в течение некоторого времени в области высокого давления. При этом происходит насыщение их газами (за счет диффузии и химических процессов, протекающих в клетке) до величины, соответствующей температуре и давлению среды.

При последующем дросселировании газожидкостной смеси происходит резкое снижение предельной растворимости газов в среде, приводящее к образованию пузырьков газа как в жидкости, так и в клетках микроорганизмов. Последние при этом погибают.

Гибель микроорганизмов может быть обусловлена как изменением физических свойств клеток (давления, объема), так и нарушением химических процессов, протекающих в них.

Установка для обработки воды методом дросселирования, принципиальная схема которой представлена на рисунке 6.2.2, состоит из корпуса 1 с входным 2 и выходным 3 патрубками и рабочим колесом 4, газового патрубка 5 с регулирующим вентилем 6, соединенных с центральной трубой 7, установленной осесимметрично с входным патрубком 2. Выходной патрубок 3 корпуса герметично соединен с входным патрубком 8 емкости высокого давления 9, на выходном

патрубке 10 которой установлен дросселирующий клапан 11. Под действием разряжения, создаваемого в центре вращающегося рабочего колеса 4, очищаемая жидкость всасывается во входной патрубке 2. Из-за возникающего эжекционного эффекта по газовому патрубку 5 и центральной трубе 7 одновременно с подачей жидкости в центр вращающегося рабочего колеса 4 всасывается газ. Газожидкостная смесь центробежными силами отбрасывается по лопаткам рабочего колеса 4 от центра к периферии с увеличением давления до 2...6 атм. Так как с повышением давления растворимость газа в жидкости возрастает, то часть газа растворяется в жидкости, которая по выходному патрубку 3 через входной патрубке 8 поступает в емкость 9 высокого давления. За время пребывания в емкости 9 клетки микроорганизмов, содержащиеся в очищаемой жидкости, в результате своей жизнедеятельности насыщаются растворенными в жидкости при высоком давлении газом. При открывании дросселирующего клапана 11, установленного на выходном патрубке 10, давление в жидкости быстро изменяется от 2...6 атм до 1 атм. При такой быстрой декомпрессии растворимость газа в жидкости резко уменьшается и происходит разрушение клеток микроорганизмов из-за увеличения внутри них объема свободных пузырьков газа.

Максимальная степень обеззараживания составляет 85 %. Бактерицидный эффект зависит от времени обработки и находится в пределах от 8 до 30 мин. в зависимости от перепада давления. Выбор рабочего перепада давления обусловлен только технологическими и экономическими показателями, так как максимального бактерицидного эффекта (85 %) можно достичь при любом давлении (2...6 атм) при соответствующем оптимальном времени пребывания в зоне повышенного давления.

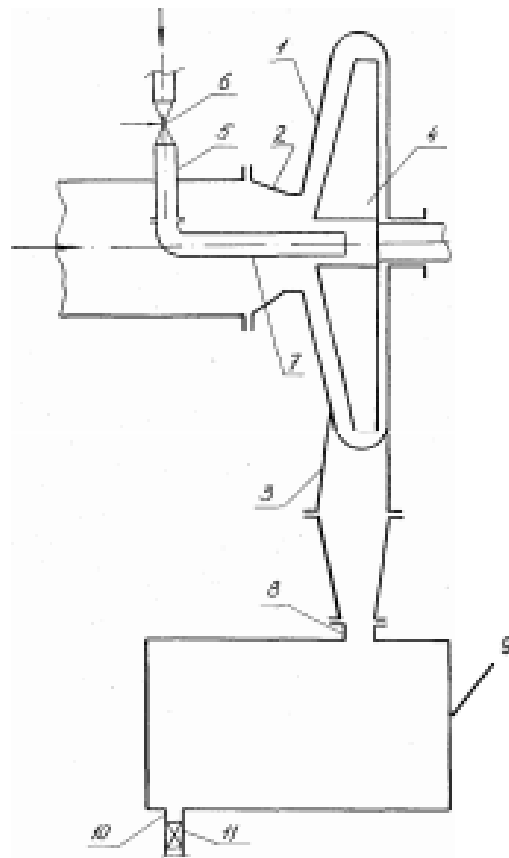


Рисунок 6.2.2 – Установка для кавитационного обеззараживания воды дросселированием

Сокращение времени пребывания в зоне повышенного давления, необходимого для достижения максимального бактерицидного эффекта, при высоких значениях давления можно объяснить зависимостью величины растворимости газов в жидкости от давления.

Особенностью процесса гидродинамического обеззараживания воды является отсутствие последствия, что, с одной стороны, ограничивает его применение для процессов водоподготовки, оно возможно только на предварительном этапе и требует внесения дезинфекантов при транспортировке и хранении.

6.3 Выводы по разделу

К основным преимуществам процесса обеззараживания воды кавитационным методом можно отнести: физическое уничтожение любых форм патогенных микроорганизмов за счёт разрушительного воздействия энергии ударной волны на их оболочку и содержимое; отсутствие влияния свойств обрабатываемой воды на процесс, кроме характеристики количества растворенных газов; отсутствие реагентов для обработки, что влечёт за собой отсутствие необходимости в разработке и соблюдении сводов правил по технике безопасности.

Недостатками данного метода можно считать: невозможность оперативного контроля за процессом, поскольку не вся вода может проходить через область кавитации, что приводит к вторичному загрязнению уже обработанной воды; отсутствие последействия, что требует дополнительного этапа хлорирования в общей схеме водоподготовки; высокие затраты на оборудование и электроэнергию, поскольку данный метод приводит к быстрому износу рабочих элементов установок обеззараживания.

7 ОЛИГОДИНАМИЧЕСКИЙ СПОСОБ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ ВОДЫ

7.1 Сущность метода олигодинамической обработки

Серебрение воды является очень простым в технологическом отношении методом обеззараживания – серебряный предмет, опущенный в воду, насыщает её положительно заряженным ионами серебра, которые угнетают развитие болезнетворных микробов и способствуют их гибели.

Эффект дезинфекции в присутствии ионов серебра или меди наблюдается в случаях, когда ионы данных металлов образуют связи с заряженными клетками микроорганизмов. Данный тип связей приводит к созданию напряжений, препятствующих проникновению в клетку жизненно важных соединений. Во время диффузии непосредственно в тело клетки ионы серебра и меди реагируют с находящимися в составе протеиновых соединений аминокислотами и подавляют процесс фотосинтеза, что приводит к нарушению энергетического питания микроорганизмов и, как следствие, к их гибели.

Введение ионов меди и серебра в обрабатываемую воду может осуществляться различными методами, например, за счёт пропускания воды через ионообменную загрузку, в состав которой входит серебро. Однако наличие в воде ионов металлов с высокой степенью окисления будет препятствовать работе данного аппарата в направлении обеззараживания, поскольку из-за реакций ионного обмена серебро будет смещаться с ионогенных центров. Также одним из способов введения данных ионов в воду является электрохимический способ, который, однако, целесообразно применять для уже обработанной воды из-за высокого времени её обработки при данном методе. Высокой эффективностью обладают фильтры, в составе которых находятся ионы серебра с высокой реакционной способностью. Однако общим минусом работы таких фильтров является сложность в их регенерации, и, как следствие, ухудшение обеззараживающих свойств из-за накопления патогенных микроорганизмов в теле фильтра, особенно в период статических условий.

Механизм действия серебра на микроорганизмы весьма сложный и окончательно не установлен. До настоящего времени нет единого мнения о том, какая из форм серебра является более эффективной – его ионы или металлическое коллоидное серебро. Например, в работе [28] показано, что ионы серебра оказывают более сильное бактерицидное действие, чем металлическое серебро. На основании полученных результатов был предложен механизм воздействия ионов серебра на микробные клетки. В соответствии с предложенным механизмом соединения серебра вызывают у кишечной палочки лизис цитоплазмы, повреждение нуклеотидов и отторжение содержимого клетки. С другой стороны, в [29] был отмечен каталитический механизм обеззараживания воды серебром, нанесенным на поверхность порошка оксида алюминия в условиях ультрафиолетового облучения, что, по мнению авторов, обеспечило максимальную эффективность обеззараживания воды в сравнении с порошком, модифицированным хлоридом алюминия.

Широкое распространение нашел и другой механизм – адсорбционный. Клеточная мембрана бактерии состоит из особых белков – гликопротеидов или полипептидов, соединенных аминокислотами для обеспечения механической прочности и стабильности. Серебро, взаимодействуя с внешними пептидогликанами, подавляет их способность передавать кислород внутрь клетки бактерии, что приводит к гибели микроорганизма.

В статье [28] приведены результаты анализа олигодинамического способа обеззараживания воды. В качестве дезинфектанта использовали соединения серебра, абсорбированные на решетке из пористого оксида алюминия. Обеззараживания воды велось в статических условиях, результаты обеззараживания оценивались по общему микробному числу.

Результаты эксперимента приведены на рисунке 7.1:

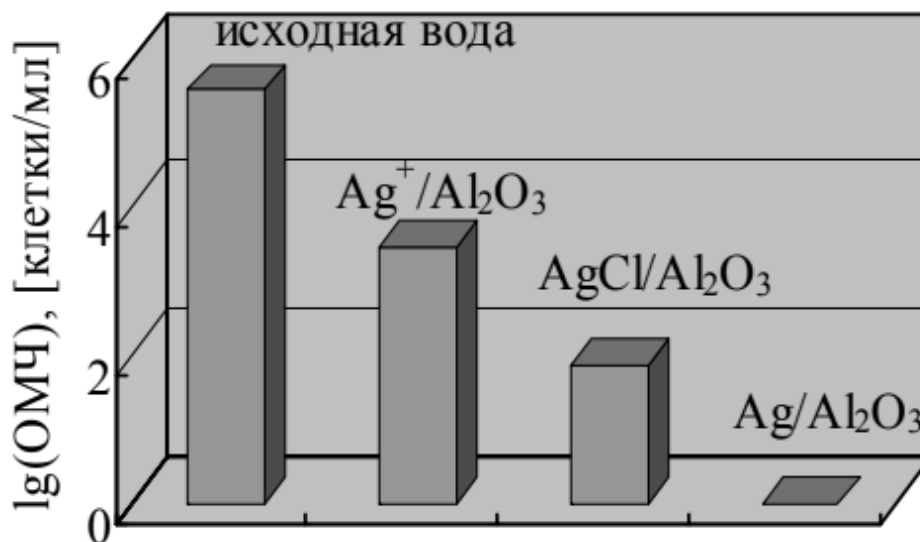


Рисунок 7.1 – Содержание бактерий в воде до и после 24 часов контакта с модифицированными соединениями серебра на пористом оксиде алюминия

Видно, что общее микробное число (ОМЧ) для ПОА, насыщенного ионами серебра, снижается в 10 раз, при насыщении хлоридом серебра – более чем в 1000 раз, а максимальной эффективностью обладают частицы дисперсного серебра, снижая ОМЧ в воде до нуля. Объяснить этот факт можно, с одной стороны, за счет того, что частицы металлического серебра, внедренные в структуру ПОА, имеют размер, определяемый диаметром пор в оксиде алюминия, то есть находящийся на наноуровне. Вследствие этого они имеют высокоразвитую поверхность, легко вступают в реакцию с растворенным в воде кислородом и ионами хлора, образуя поверхностные труднорастворимые продукты. Эти труднорастворимые соединения обеспечивают высокую поверхностную концентрацию ионов серебра, что и определяет повышенную химическую активность частиц серебра в отношении микроорганизмов, содержащихся в воде. В то же время подавление бактерицидной активности ионов серебра и хлорида серебра, находящихся в матрице ПОА, может быть вызвано высокой концентрацией хлорид-анионов в исследуемой воде, что смещает ионное равновесие в сторону образования труднорастворимого продукта, уменьшая тем самым концентрацию активных ионов серебра на поверхности ПОА.

7.2 Выводы по разделу

Основными преимуществами использования олигодинамического метода обеззараживания воды являются:

продолжительный эффект - ионы серебра и меди остаются в активном состоянии достаточно долгое время

отсутствие аллергических реакций и раздражающего воздействия на кожу, слизистые и дыхательную систему человека.

отсутствие запаха

Однако применение данной технологии сдерживается рядом факторов, основными из которых являются:

недостаточное изучение влияния ионов серебра и меди на организм человека. Допустимая норма потребления человеком серебра естественным путем составляет 7 мкг/сут (по нормам ВОЗ). В настоящий момент подтвержденных данных о полезном воздействии серебра на организм нет.

по данным ВОЗ, выраженный бактерицидный эффект (способность гарантированно убивать определенные бактерии) наблюдается при концентрациях ионов серебра свыше 0,15 мг/л. В количестве 0,05-0,1 мг/л ионы серебра обладают только бактериостатическим действием (способностью сдерживать рост и размножение бактерий).

в качестве самостоятельного технологического решения для систем очистки воды в общественных бассейнах, например, в Германии (DIN 19643-1), метод запрещен.

класс опасности — второй (высокоопасное вещество), показатель вредности — санитарно токсикологический.

действие ионов меди и серебра очень медленное и не обладает достаточной дезинфицирующей эффективностью. Для достижения нужного дезинфицирующего эффекта данными средствами необходим длительный период времени (более 1 часа) и возбудители болезни уничтожаются не сразу.

при длительном употреблении воды, обработанной серебром, возникает заболевание аргироз.

эффект обеззараживания зависит от многих факторов. Он может снижаться в присутствии солей, малорастворимых соединений, коллоидов. При наличии в воде примесей, которые способны образовывать на поверхности серебряных электродов малорастворимые пленки, процесс диссоциации (или переход ионов серебра в раствор) значительно затормаживается.

В связи с этим, в обрабатываемой воде должно быть низкое содержание хлоридов, органических соединений, и снижено до минимума использование для предварительной очистки воды перманганата калия.

способ обеззараживания воды с применением ионов серебра требует дорогого реагента (серебра)

не существует быстрого и точного способа определения содержания остаточного серебра в воде, чтобы ежедневно контролировать эффективность обеззараживания (бактериологический анализ дорог и занимает три дня).

8 СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРЕДСТАВЛЕННЫХ МЕТОДОВ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ

8.1 Сравнительный анализ основных методов

Для правильной оценки методов обеззараживания природных вод необходимо провести сравнительный анализ по основным критериям, определяющим эффективность применения метода в определенных условиях. Данный анализ выполняется с целью выявления преимуществ и недостатков рассмотренных ранее способов обеззараживания относительно друг друга. Анализ ведется по следующим критериям:

- эффективность воздействия на патогенные микроорганизмы;
- отсутствие побочных продуктов обеззараживания;
- простота и рентабельность в использовании;
- влияние различных факторов на процесс обеззараживания;
- экономическая эффективность, в пересчете на 1 м³ обрабатываемой воды;

Основная характеристика методов обеззараживания приведена в табл. 8.1. Данные по экономическим затратам на обработку 1 кубометра обрабатываемой воды взяты из статьи [30] для производительности очистных станций в 10000 м³/сут.

Таблица 8.1 – Общая характеристика методов обеззараживания

Средство обеззараживания	Воздействие на патогенные микроорганизмы	Побочные продукты реакций	Простота и рентабельность в использовании	Влияние различных факторов на процесс	Экономическая эффективность
Жидкий хлор	Сильный окислитель с эффектом последствия до 24 часов; высокий	Возможно образование броматов,	Средние начальные затраты на оборудование, повышенные	Снижение эффективности колебании температур	Капитальные затраты на 1 м ³ воды составляют примерно 650 руб.

продолжение таблицы 8.1

Средство обеззараживания	Воздействие на патогенные микроорганизмы	Побочные продукты реакций	Простота и рентабельность в использовании	Влияние различных факторов на процесс	Экономическая эффективность
Жидкий хлор	бактерицидный эффект; малая эффективность против спор, цист и вирусов	тригалометанов, броморганических соединений, хлоратов и хлоритов	требования к перевозке и хранению жидкого хлора, потенциальные риски аварий при утечке газа	реакционная способность сильно зависит от pH	
Гипохлорит натрия	Сильный окислитель с эффектом последствия до 24 часов; высокий бактерицидный эффект; малая эффективность против спор, цист и вирусов	Возможно образование броматов, тригалометанов, броморганических соединений, хлоратов и хлоритов	Средние начальные затраты на оборудование, независимость от исходного сырья (получение на месте)	Снижение эффективности колебании температур реакционная способность сильно зависит от pH	В зависимости от концентрации применяемого гипохлорита натрия, капитальные затраты в пересчёте на 1 м ³ воды варьируются от 340 до 440 руб.
Диоксид хлора	Сильный дезинфектант (эффективен против бактерий, грибков, спор, вирусов) при меньших по сравнению с жидким хлором дозах	Не образует хлорсодержащих тригалометанов или хлораминов, образует хлораты и хлориты	Средние начальные затраты, отсутствие повышенных требований к перевозке и хранению	Высокая эффективность при различных температурах, широкий диапазон значений pH (4-10)	Капитальные затраты в пересчёте на 1 м ³ воды составляют примерно 300 руб.
Озонирование	Очень сильный окислитель, эффективен против всех патогенных микроорганизмов, не обеспечивает последствия	Не образует тригалометанов, но образует альдегиды, кетоны, броматы	Высокие затраты на оборудование, необходимость использования дополнительных фильтров, высокие меры предосторожности	Отсутствие влияния факторов на процесс обеззараживания	Капитальные затраты в пересчёте на 1 м ³ воды составляют примерно 1320 руб.

Средство обеззараживания	Воздействие на патогенные микроорганизмы	Побочные продукты реакций	Простота и рентабельность в использовании	Влияние различных факторов на процесс	Экономическая эффективность
УФ-облучение	Полная дезактивация патогенных микроорганизмов, отсутствие последствий, возможность образования биоплёнки	Отсутствуют	Требует высоких затрат на оборудование и его эксплуатацию, не требуется хранение и транспортировка реагентов	Качество облучения сильно зависит от мутности, жесткости, колебаний электрической сети	Капитальные затраты в пересчёте на 1м ³ воды составляют примерно 350 руб.
Олигодинамический способ обеззараживания	Деактивация патогенной микрофлоры при правильном подборе дозы, длительный эффект последствий	Сами по себе отсутствуют; опасность представляют повышенные концентрации олигодинамических металлов	Высокие затраты на оборудование и реагенты для обеззараживания	Наличие примесей в значительной степени снижает эффективность обеззараживания	Капитальные затраты в пересчёте на 1м ³ воды составляют примерно 450 руб.
Гидродинамический способ обеззараживания	Уничтожение бактерий и вирусов методов физического воздействия посредством разницы давлений, отсутствие последствий	Не образуются	Высокие капитальные и эксплуатационные затраты на поддержание процесса	На процесс кавитации влияют	Капитальные затраты в пересчёте на 1м ³ воды составляют примерно 300 руб.

Помимо общих затрат на возведение сооружений очистных станций водоподготовки, необходимо оценить и эксплуатационные затраты, возникающие в ходе использования данных методов. За основу расчётов возьмем затраты на обработку одного кубометра воды, складываемые из расходов на: требуемые реагенты; их транспортировку; необходимые комплектующие; затраты на электроэнергию; затраты на текущий ремонт сооружений; затраты на обеспечение безопасности; СИЗ для работников и прочие расходы. Получившиеся эксплуатационные затраты за год работы очистной станции производительностью 10000 м³/сут сведены в табл. 8.2

Таблица 8.2 – Сравнение эксплуатационных затрат основных методов обеззараживания

Статья расходов	Стоимость метода обеззараживания, руб/год						
	Жидкий хлор	ГПХН	Диоксид хлора	Озонирование	УФ-облучение	Олигодинамия	Гидродинамия
Реагенты	440800	140190	1304900	35000	0	870000	0
Транспорт	48000	36000	24000	12000	12000	68000	0
Комплекующие	0	52000	0	50000	150000	215000	87000
Электроэнергия	503600	224120	45000	500000	315000	25000	980000
Текущий ремонт сооружений	879000	362800	347000	414710	582000	315000	925000
Обеспечение безопасности	1530000	0	0	0	0	0	0
СИЗ для работников	69000	67100	78000	38000	15000	15000	15000
Прочие расходы	542300	154900	292900	168000	58000	520000	654000
Итого	3969500	1037110	2091800	1217000	1132000	2028000	2661000

Согласно данным из табл. 8.2, эксплуатационные затраты на приготовление 1 м³ воды при различных методах будут равняться:

- 1) хлорирование жидким хлором – 1,1 руб.;
- 2) хлорирование гипохлоритом натрия – 0,29 руб.;
- 3) хлорирование диоксидом хлора – 0,58 руб.;
- 4) озонирование – 0,34 руб.;
- 5) УФ-обеззараживание – 0,31 руб.;
- 6) олигодинамический метод – 0,56 руб.;
- 7) гидродинамический метод – 0,74 руб.

8.2 Выводы по разделу

Сравнивая капитальные и эксплуатационные затраты по каждому методу, можно обратить внимание, что использование гипохлорита натрия является наиболее экономически оправданным методом,

поскольку требует наименьших капитальных и эксплуатационных затрат в пересчёте на 1м³ обрабатываемой воды. В то же время, стоит учитывать, что данный метод в огромной степени зависит от местных условий его использования, приготовления и хранения, что может привести к его нерациональному потреблению. В целом, стоит отметить закономерность между величиной капитальных вложений и эксплуатационных затрат – как правило, чем выше начальные вложения, тем меньше эксплуатационные затраты будут получаться в пересчёте на кубометр обработанной воды.

9 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ

Проанализировав различные методы, применяемые в практике обеззараживания воды, можно сделать следующие выводы о их применимости в различных условиях:

1) Применение хлорирования является обязательным мероприятием на станциях водоподготовки с любой технологической схемой – метод отличается высокой надежностью и обеспечивает необходимую санацию сооружений и трубопроводов после основного этапа очистки. Данный метод целесообразно применять при отсутствии серьёзных эпидемиологических загрязнений водоёмов, при любой производительности очистных сооружений, но с обязательным контролем за процессом контакта активного агента с водой.

2) Озонирование является более эффективным обеззараживающим мероприятием по отношению к хлорированию, но в то же время отличается высокими капитальными затратами и не обеспечивает пролонгирующего эффекта. Данный метод можно применять на любых станциях водоподготовки, с обязательной установкой сорбционных фильтров на второй ступени очистки воды и последующим хлорированием перед резервуарами чистой воды.

3) Ультрафиолетовое облучение воды даёт наибольший бактерицидный и вирулицидный эффекты, по сравнению с другими методами, но в то же время требует кондиционную по показателям физико-химических качеств воду и не даёт эффекта последствия. Такие установки целесообразно применять на малых станциях водоподготовки, при незначительной длине напорных линий до насосных станций 2-го подъема, вкупе с обеспечением в воде необходимой концентрации остаточного свободного хлора.

4) Олигодинамический метод отличается долгим эффектом действия и может применяться для обеспечения дезинфекции воды при её длительном хранении в резервуарах. В то же время, необходимо учитывать, что данный метод нельзя применять при высоких

бактериологических показателях загрязнения водоёмов, поскольку требуемые концентрации металлов в этом случае будут токсичны для конечного потребителя.

5) Гидродинамический метод на данный момент времени не получил широкого распространения из-за невозможности контроля процесса обеззараживания и сложности в его эксплуатации. Из-за механизма воздействия на микробиологические формы жизни данный метод не оказывает влияния на физико-химические или иные свойства воды, в то же время за счёт энергии ударной волны схлопывания пузырьков уничтожая практически все формы патогенов. Однако данный способ обеззараживания также не может обеспечить пролонгирующего действия, и поэтому требует введения реагентов после обработки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выпускной квалификационной работе исследованы и проанализированы существующие методы обеззараживания воды для питьевого водоснабжения.

Определены основные микробиологические загрязнители, установлены формы воздействия методов обеззараживания на патогенные микроорганизмы, рассмотрены технологические схемы применения данных методов на практике.

По результатам технико-экономического сравнения сделаны выводы о целесообразности применения каждого метода в определенных условиях.

Научная новизна работы состоит в определении влияния различных свойств обрабатываемой воды на процесс обеззараживания при использовании различных методов. Установлено, что реагентные методы гораздо сильнее подвержены влиянию обрабатываемой среды, чем методы физического воздействия на патогенные микроорганизмы.

Практическая значимость работы заключается в определении оптимальных методов обеззараживания природных вод для питьевых целей по экономическим и техническим параметрам.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Совет по правам человека – Права человека и глобальный водный кризис: загрязнение воды, нехватка воды и связанные с водой бедствия / Организация объединенных наций. Генеральная Ассамблея, 2021 – 26 с.
2. Мазаев, В.Т. – Коммунальная гигиена. Часть 1 / Мазаев, В.Т., Королев, А.А., Шлепнина, Т.Г. – М.; Издательская группа «ГЭОТАР-Медиа», 2005 – 303 с.
3. Журавлевич, Н.Е. – Обеззараживание питьевой воды. Методические рекомендации / Журавлевич, Н.Е. – Минск, БГМУ, 2016-35 с.
4. Рахманин, Ю.А. – Актуальные проблемы обеспечения населения доброкачественной питьевой водой и пути их решения / Рахманин, Ю.А., Михайлова, Р.И., Кирьянова, Л.Ф., Севостьянова, Л.Ф., Рыжкова, И.Н., Савронский, А.Ю. - Вестник РАМН, 2006 - №4 – с. 9-17
5. Макотрина, Л.В., Зверькова, А.С. – Влияние обеззараживания питьевой воды хлором на здоровье человека / Макотрина, Л.В., Зверькова, А.С. – Иркутск; Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость, 2011 – с.87-94
6. Краснова, Т.А. – Исследование влияния типа хлорсодержащего дезинфектанта на качество питьевой воды и эффективность технологии водоподготовки / Краснова, Т.А., Сколубович, Ю.Л., Гогина, Е.С., Волков, Д.Д. – Строительство. Наука и образование, 2019 - с.1-17
7. Сколубович, Ю.Л. – К вопросу обеззараживания природных вод гипохлоритом натрия / Сколубович, Ю.Л., Войтов, Е.Л. – Вестник

Иркутского государственного технического университета, 2010 – с.113-119

8. Лони́на, Н.Г. – Влияние различных факторов на стабильность растворов гипохлорита натрия / Лони́на, Н.Г., Замуруев, О.В., Добры́днев, С.В., Бесков, В.С. – М.; Химическая промышленность сегодня, 2006 – с.22-27

9. Юну́сов, Х.Б. – Использование гипохлорита натрия при подготовке питьевой воды / Юну́сов, Х.Б., Захаров, С.Л. – Текстильная промышленность, 2009. №3. – с.42-47

10. Скры́бин, А.Ю. – Низко - и высококонцентрированный гипохлорит натрия: преимущества и недостатки применения в схемах обеззараживания питьевых вод / Скры́бин, А.Ю., Фесенко, Л.Н., Игнате́нко, С.И., Пчельников, И.В. – М., Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение, 2014 – с. 48-52

11. Акра́мов, Р.Л. – Оценка гигиенической эффективности обеззараживания воды диоксидом хлора, получаемого хлоратным способом / Акра́мов, Р.Л., Селя́нкина, К.П., Борзунова, Е.А., Веселовская, Т.Г., Брусни́цына, Л.А., Ница́к, Г.Б. – Уральский медицинский журнал, 2007 – с.78-80

12. Мокиенко, А.В. – О безопасности диоксида хлора как средства обеззараживания воды / Мокиенко, А.В. – Одесса, Питьевая вода, 2010 – с.2-15

13. Ча́щихин, Д.В. – Использование диоксида хлора для водоподготовки / Ча́щихин, Д.В. - Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2012. № 7 (55). С. 46-47.

14. Веселовская, Т.Г. - Решение проблемы образования хлорорганических соединений при использовании высокоэффективного и экологичного комбинированного дезинфектанта "диоксид хлора и

хлор" / Веселовская, Т.Г., Антюфеев, М.А., Шаронин, Д.Б., Софронов, М.О., Трофимов, С.Н. - Водоснабжение и канализация. 2011. № 2. С. 42-51.

15. Бахир, В.М. – Электрохимически активированные водные среды – анолит и католит как средство подавления инфекционных процессов / Бахир, В.М., Прилуцкий, В.И., Шомовская, Н.Ю. – Медицинский алфавит, 2010 – с.40-42

16. Миклис, Н.И. – Обезвреживающая способность анолита нейтрального / Миклис, Н.И., Алексеев, И.С., Атрощенко, В.А., Якутович, Л.Н. – Достижения фундаментальной медицины, клинической медицины и фармации, 2017 – с.329-330

17. Бурак, И.И. – Гигиенические требования к электрохимически активированному дезинфицирующему раствору «анолит нейтральный» и технологии его получения / Бурак, И.И., Миклис, Н.И., Адаменко, Г.В., Корицова, С.И. – Здоровье и окружающая среда, 2013 – с.149-152

18. Пустовалов, В.А. – Технология электрохимической активации водных растворов и получение стандартных электроактивированных растворов / Пустовалов, В.А. – Прикладные информационные аспекты медицины, 2006 – с.13-19

19. Потеряева, Т.Б. – Технология озонирования природной воды / Потеряева, Т.Б., Гохман, Б.М., Ланге, Л.Р. – Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения, 2011 – с.151-154

20. Дерягин, Н.А, - Основные проблемы глубокой очистки природных вод озонированием / Дерягин, Н.А. – Вестник современных исследований, 2020 – с.4-7

21. Алексеева, Л.П.– Озонирование в технологии очистки природных вод / Алексеева, Л.П., Драгинский, В.Л. – Водоснабжение и санитарная техника, 2007 – с.25-33

22. Васильев, А.Л. – Использование озона в технологиях обработки природных вод / Васильев, А.Л., Васильев, Л.А. – ННГАСУ, 2005 – 185 с.

23. Микаева, С.А., Микаева, А.С. - Обеззараживание ультрафиолетовым излучением / Микаева, С.А., Микаева, А.С. Учебный эксперимент в образовании – Московский государственный университет приборостроения и информатики – 2015, с. 82-89

24. Чванов, Я.С. – Обеззараживание воды ультрафиолетовым (УФ) излучением / Чванов, Я.С. – Труды международной научно-технической конференции «Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве», 2012. Т.3 – с. 284-289

25. Морозова, В.В. – Применение ультрафиолетового излучения для обеззараживания воды / Морозова, В.В. – Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения, 2013 – с.117-121

26. Голованчиков, А.Б. – Гидродинамический метод обеззараживания воды / Голованчиков, А.Б., Сиволубова, Н.О., Новиков М.Г. – Вестник ВГАСУ, 2009 – с.165-169

27. Сауткина, Т.Н. – Перспективы безреагентного обеззараживания воды кавитационными генераторами / Сауткина, Т.Н., Калякина, А.М., Чеснокова, Е.В., Пшенов, А.А. – Сборник научных трудов SWorld, 2014 –с.78-80

28. Золотухина, Е.В. – Обеззараживание воды нанокompозитами на основе пористого оксида алюминия и соединений серебра / Золотухина, Е.В., Спиридонов, Б.А., Федянин, В.И., Гриднева, Е.В. – Сорбционные и хроматографические процессы, 2010 – с.78-85

29. Красовский, В.О. – Очистка воды плавательных бассейнов катионами меди и серебра и их оздоровительный эффект (краткий

аналитический обзор литературы) / Красовский, В.О., Яхина, М.Р.,
Беляева, А.Н. – The Scientific Heritage, 2021 – с. 19-28

30. Крупнова, Т.Г. – Сравнение методов обеззараживания воды,
используемых в централизованных системах водоснабжения / Крупнова,
Т.Г., Таллина, О.Ю., - Сельское, лесное и водное хозяйство, 2014 – с.82-
89