ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р ИСО 16075-5— 2023

РУКОВОДЯЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ОЧИЩЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД ДЛЯ ОРОСИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Часть 5

Обеззараживание очищенных сточных вод и эквивалентные виды обработки

(ISO 16075-5:2021, IDT)

Издание официальное

Москва
Российский институт стандартизации
2023

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 ПОДГОТОВЛЕН Федеральным государственным бюджетным учреждением «Российский институт стандартизации» (ФГБУ «Институт стандартизации») на основе собственного перевода на русский язык англоязычной версии стандарта, указанного в пункте 4

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 409 «Охрана окружающей природной среды»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 11 октября 2023 г. № 1101-ст

4 Настоящий стандарт идентичен международному стандарту ИСО 16075-5:2021 «Руководящие указания по использованию очищенных сточных вод для оросительных систем. Часть 5. Обеззараживание очищенных сточных вод и эквивалентные виды обработки» (ISO 16075-5:2021 «Guidelines for treated wastewater use for irrigation projects — Part 5: Treated wastewater disinfection and equivalent treatments», IDT).

Международный стандарт разработан подкомитетом ПК 1 «Использование очищенных сточных вод для орошения» Технического комитета ИСО/ТК 282 «Повторное использование воды» Международной организации по стандартизации (ИСО).

При применении настоящего стандарта рекомендуется использовать вместо ссылочных международных стандартов соответствующие им национальные стандарты, сведения о которых приведены в дополнительном приложении ДА

5 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

*Правила применения настоящего стандарта установлены в статье 26 Федерального закона от 29 июня 2015 г. № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации». Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а официальный текст изменений и поправок — в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (*gost.e-ecolog.ru

© ISO, 2021
© Оформление. ФГБУ «Институт стандартизации», 2023

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

Содержание

1 Область применения 1
2 Нормативные ссылки 1
3 Термины, определения и сокращения 1
3.1 Термины и определения 1
3.2 Сокращения 3
4 Патогенные загрязняющие вещества в сточных водах и их нейтрализация или удаление 3
4.1 Общие положения 3
4.2 Тип и появление патогенов в сточных водах 4
4.3 Сокращение содержания патогенных микроорганизмов на различных этапах очистки сточных вод 5
4.4 Сокращение содержания патогенных микроорганизмов различными методами обеззараживания 5
5 Обеззараживание 6
6 Химическое обеззараживание 7
6.1 Общие положения 7
6.2 Обеззараживание соединениями хлора/брома 7
6.3 Озон 15
6.4 Воздействия химического обеззараживания на окружающую среду 18
7 Ультрафиолетовое обеззараживание 19
7.1 Общие положения 19
7.2 Технологии ультрафиолетового излучения и принцип их действия 19
7.3 Источник ультрафиолетового излучения 20
7.4 Камера обеззараживания 22
7.5 Датчики 22
7.6 Пускорегулирующая аппаратура 23
7.7 Валидация УФ-установки 23
7.8 Эффективность системы УФ-обеззараживания 25
7.9 Очистка 25
7.10 Воздействия УФ-обеззараживания на окружающую среду 25
7.11 Преимущества, недостатки и технические соображения метода УФ-обеззараживания 26
8 Удаление патогенов с помощью мембранных методов 26
8.1 Общие положения 26
8.2 Мембранная система 26
8.3 Удаление патогенов с помощью мембранной фильтрации 27
8.4 Вопросы эксплуатации и обслуживания 27
8.5 Мониторинг 27
8.6 Воздействия мембранных систем на окружающую среду 28
8.7 Преимущества, недостатки и технические соображения удаления патогенов методом обеззараживания с помощью мембранных систем 28
Приложение А (справочное) Возбудители инфекционных заболеваний, потенциально присутствующие в неочищенных (сырьевых) сточных водах 29
Приложение В (справочное) Эффективность удаления микробов с помощью различных мембранных фильтров 31
Приложение С (справочное) Дополнительные соединения брома 32
Приложение D (справочное) Факторы эксплуатации, обслуживания и мониторинга мембранной системы 33
Приложение ДА (справочное) Сведения о соответствии ссылочных международных стандартов национальным стандартам 35
Библиография 36

Введение

Обеззараживание очищенных сточных вод (ОСВ) является важным этапом в процессе их использования. Его цель заключается в сокращении или устранении основных рисков для здоровья операторов очистных сооружений и всех, кто может контактировать с ОСВ или с культурами, которые орошались ОСВ.

Настоящий стандарт представляет собой руководство по доступным методам обеззараживания, их эффективности и факторам, влияющим на эти методы, наряду с их преимуществами и недостатками, в отношении технических и экологических аспектов и эффективной нейтрализации или удаления различных патогенов в сточных водах и ОСВ для использования в орошении.

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РУКОВОДЯЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ОЧИЩЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД ДЛЯ ОРОСИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Часть 5

Обеззараживание очищенных сточных вод и эквивалентные виды обработки

Guidelines for treated wastewater use for irrigation projects.
Part 5. Treated wastewater disinfection and equivalent treatments

Дата введения — 2024—07—01

1 Область применения

Настоящий стандарт содержит руководящие указания по применению различных доступных методов обеззараживания ОСВ для эффективной нейтрализации или удаления патогенов из ОСВ, предназначенных для орошения.

В настоящем стандарте рассматриваются:

- химические и физические технологии, принципы работы и установление эффективных доз для применения, возможные проблемы реализации, а также техническое руководство по проектированию и мониторингу;
- сравнение преимуществ и недостатков различных методов обеззараживания, подходящих для ОСВ;
- потенциальные экологические последствия применения методик обеззараживания и способы сокращения таких последствий;
- обеззараживание в различных участках и локациях водохозяйственной системы, использующей ОСВ для орошения, в том числе на водоочистных сооружениях, в распределительной системе, поливных участках и в других местах использования.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использована нормативная ссылка на следующий стандарт [для датированной ссылки применяют только указанное издание ссылочного стандарта, для недатированной — последнее издание (включая все изменения)]:

ISO 20670:2018, Water reuse — Vocabulary (Повторное использование воды. Словарь)

3 Термины, определения и сокращения

3.1 Термины и определения

В настоящем стандарте применены термины по ИСО 20670, а также следующие термины с соответствующими определениями.

ИСО и МЭК ведут терминологические базы данных для использования в области стандартизации по следующим адресам:

- платформа для онлайн-просмотра ИСО: доступна на gost.e-ecolog.ru ;
- Электропедия МЭК: доступна на gost.e-ecolog.ru .

Издание официальное

3.1.1 **передовая технология окислительной обработки воды** (advanced oxidation process, AOP): Технология, при которой образуются гидроксильные радикалы в количестве, достаточном для удаления органики путем окисления.

3.1.2 **пускорегулирующая аппаратура;** ПРА (ballast): Блок, вставляемый между источником питания и одной или несколькими газоразрядными лампами, который посредством индуктивности, емкости или сочетания индуктивности и емкости служит главным образом для ограничения тока лампы (ламп) до требуемого значения, чтобы преобразовывать и регулировать входящую мощность ультрафиолетовых ламп для получения ультрафиолетового света.

Примечание 1 — Пускорегулирующая аппаратура обеспечивает надлежащее напряжение и ток, необходимые для пуска и генерации УФ-фотонов.

3.1.3 **засорение** (fouling): Процесс, приводящий к ухудшению мембранного потока из-за поверхностной или внутренней непроходимости мембраны.

Примечание 1 — См. AWWA B130-13 [1].

3.1.4 **размер пор** (pore size): Размер отверстия в пористой мембране.

Примечание 1 — Размеры пор выражаются либо как номинальные (средние), либо как абсолютные (максимальные), как правило, в мкм.

Примечание 2 — См. AWWA B130-13 [1].

3.1.5 **эквивалентная доза снижения** (reduction equivalent dose, RED): Доза УФ-излучения в данном устройстве, которая определяется с помощью биодозиметрии.

Примечание 1 — См. *доза УФ-излучения* (3.1.9) и «биодозиметрия».

Примечание 2 — Такая *доза УФ-излучения* (3.1.9) определяется путем измерения нейтрализации проблемного микроорганизма после воздействия УФ-излучения в УФ-установке и сравнения результатов с известной кривой реакции на дозу УФ-излучения того же проблемного организма, определенной с помощью лабораторного испытания коллимированным пучком.

3.1.6 **ультрафильтрация** (ultrafiltration, UF): Процесс под давлением с использованием полупроницаемой мембраны под гидравлическим градиентом давления для разделения компонентов в растворе.

Примечание 1 — Поры мембраны имеют размер менее 0,1 мкм, что позволяет пропускать растворители, но задерживает неионные растворенные вещества, главным образом, на основе физического размера, а не химического потенциала.

Примечание 2 — См. ASTM D6161-10.

3.1.7 **система УФ-обеззараживания** (UV disinfection system): Сочетание *установок УФ-обеззараживания* (3.1.8) и соответствующих контрольно-измерительных приборов.

3.1.8 **установка УФ-обеззараживания** (UV disinfection unit): Отдельное сочетание одиночных или множественных последовательно соединенных контактных полей с общим режимом отказа (например, электрическая система, система охлаждения, система очистки и т. д.).

3.1.9 **доза УФ-излучения;** *УФ-поток* (UV dose): Количество УФ-энергии, выраженное как интеграл по времени от интенсивности потока или облученности, Вт/м^2.

Примечание 1 — Выражается в мДж/см^2 или Дж/м^2.

3.1.10 **датчик интенсивности УФ-излучения** (UV intensity sensor): Прибор для измерения УФ-излучения или радиометр для измерения УФ-излучения.

3.1.11 **коэффициент пропускания УФ-излучения** (UV transmittance): Доля фотонов в УФ-спектре, проходящих через такой материал, как вода или кварц.

Примечание 1 — Предпочтительно устанавливать поточный датчик и использовать его для проверки коэффициента пропускания УФ-излучения.

Примечание 2 — Следует указывать длину волны коэффициента пропускания, %, как правило, при этом используется длина пути 1 см. Измерение калибруют по сверхчистой воде (см. ИСО 3696, класс 1 или эквивалент).

Примечание 3 — Коэффициент пропускания УФ-излучения соотносится с поглощением УФ-излучения A по следующей формуле (для длины пути 1 см): % UVT = 100 × 10^{-A}.

3.2 Сокращения

A254 — поглощение при 254;
CT — произведение общего остаточного хлора и времени контакта;
DBP — побочные продукты обеззараживания;
EPA — управление по охране окружающей среды;
DOC — растворенный органический углерод;
DVGM — немецкая научно-техническая ассоциация по газу и воде (deutsher veriein des gas-und wasserfaches e.v.);
LP — низкое давление;
LPHO — лампа низкого давления с высокой светоотдачей;
LRV — значение логарифмического уменьшения;
MF — микрофильтрация;
MP — среднее давление;
MWCO — граница отсечки по молекулярному весу задерживаемых компонентов;
NOM — природное органическое вещество;
ONORM — австрийский стандарт (Österreichisches Normungsinstitut);
ОК/КК (QA/QC) — обеспечение качества/контроль качества;
RED — эквивалентная доза снижения;
RO — обратный осмос;
КРТ (TDS) — общее количество растворенных твердых веществ;
THM — тригалометаны;
TMP — трансмембранное давление;
TOC — общее содержание органического углерода;
ОСВ (TWW) — очищенные сточные воды;
UF — ультрафильтрация;
УФ (UV) — ультрафиолетовый;
UVT — коэффициент пропускания УФ-излучения;
WW — сточные воды.

4 Патогенные загрязняющие вещества в сточных водах и их нейтрализация или удаление

4.1 Общие положения

Наиболее важной целью программы повторного использования ОСВ является охрана здоровья населения.

Для достижения главной цели следует рассмотреть другие не менее важные цели, в том числе:

- охрана окружающей среды;
- эстетика (запах и цвет) и
- способность удовлетворять потребности в орошении.

Для охраны здоровья населения и предотвращения ухудшения состояния окружающей среды следует оценивать качественные характеристики ОСВ и патогенные микроорганизмы, содержащиеся в сточных водах, и рассматривать возможность соответствующей обработки для снижения риска негативного воздействия.

Существует широкий спектр технологических возможностей для достижения целей по обеспечению требуемого качества воды и снижению до минимума риска передачи заболеваний от патогенных микроорганизмов, которые могут присутствовать в ОСВ.

На общераспространенных станциях очистки сточных вод двумя основными процессами, снижающими концентрацию патогенных микроорганизмов в воде, являются:

- непосредственно процесс очистки сточных вод, который предназначен для снижения концентраций взвешенных и растворенных органических веществ;
- процесс обеззараживания ОСВ.

4.2 Тип и появление патогенов в сточных водах

Городские сточные воды, предназначенные для сельскохозяйственного орошения или для других целей, содержат различные патогенные микроорганизмы, которые могут представлять риск для здоровья населения.

Тип и количество патогенных микроорганизмов в городских сточных водах варьируется в разных городах и регионах, а также в зависимости от времени/сезона (влажного и сухого), эпидемий и т. д. При выборе методов обеззараживания следует учитывать спектр микроорганизмов, которые могут присутствовать, включая яйца паразитов, бактерии, амебы и другие простейшие, *лямблии* и вирусы. Распространенные возбудители инфекционных заболеваний, сопутствующие заболевания и потенциальное количество микроорганизмов, обнаруженных в бытовых сточных водах, приведены в таблице 1 [2] (полностью таблица приведена в таблице А.1).

Таблица 1 — Возбудители инфекционных заболеваний, потенциально присутствующие в неочищенных (сырых) сточных водах [2]

Патоген	Заболевание	Содержание в неочищенных стоках (на 1 л)
Шигеллы	Шигеллез (бациллярная дизентерия)	До 10^4
Сальмонеллы	Сальмонеллез, гастроэнтерит (диарея, рвота, лихорадка), реактивный артрит, брюшной тиф	До 10^5
Холерный вибрион	Холера	До 10^5
Кампилобактеры	Гастроэнтерит, реактивный артрит, синдром Гийена-Барре	До 10^4
Энтеровирусы (полиомиелит, эхо, коксаки, новые энтеровирусы, серотип 68—71)	Гастроэнтерит, аномалии сердца, менингит, респираторные заболевания, нервные расстройства, другие	До 10^6
Аденовирус	Респираторные заболевания, инфекции глаз, гастроэнтерит (серотип 40 и 41)	До 10^6
Ротавирус	Гастроэнтерит	До 10^5
Энтамеба	Амебиаз (амебная дизентерия)	До 10^2
Лямблия	Лямблиоз (гастроэнтерит)	До 10^5
Криптоспоридия	Криптоспоридиоз, диарея, лихорадка	До 10^4
Аскарида	Аскаридоз (заражение круглыми червями)	До 10^3
Анкилостома	Анкилостомоз (заражение анкилостомами)	До 10^3
Трихурис	Трихуриаз (заражение глистами)	До 10^2

Практическое измерение всех патогенных загрязняющих веществ в ОСВ практически невозможно. Основными причинами являются:

- низкая концентрация патогенных загрязняющих веществ в ОСВ;
- ограничение существующих технологий для обнаружения патогенов, когда они присутствуют в малых количествах;
- испытание патогенных загрязняющих веществ в лаборатории является длительным и дорогостоящим.

Следовательно, контроль и мониторинг патогенных микроорганизмов, находящихся в ОСВ, должен осуществляться путем исследования индикаторных микроорганизмов, то есть тех, которые возможно достаточно точно и просто измерить по причине их существенно большей численности. При этом руководствуются предпосылкой, что факторы и методы обработки, обеспечивающие удаление индикаторных микроорганизмов, аналогичным образом влияют на весь спектр патогенов, находящихся в ОСВ.

В подразделе 4.3 рассматривается влияние первого процесса (очистка сточных вод и снижение концентрации загрязняющих веществ). В подразделе 4.4 рассматривается влияние обеззараживания ОСВ.

4.3 Сокращение содержания патогенных микроорганизмов на различных этапах очистки сточных вод

Хотя очистка сточных вод в основном направлена на удаление взвешенных и растворенных органических веществ, независимо от обеззараживания, процесс очистки может сокращать количество патогенных и индикаторных микроорганизмов, содержащихся в сточных водах. Степень удаления в конечном итоге зависит от типа процесса очистки, как показано в таблице 2 [2].

Таблица 2 — Ориентировочное логарифмическое уменьшение индикаторных микроорганизмов и энтеральных патогенов на различных этапах очистки сточных вод [2]

	Индикаторные микроорганизмы			Патогенные микроорганизмы				
	Кишечная палочка (индикаторные бактерии)	*Энтеритная клостридия*	*Фаги* (индикаторный вирус)	Энтеробактерии *(например, кампилобактеры)*	Энтеровирусы	*Лямблия кишечная*	*Криптоспоридии парвум*	Глисты
Бактерии	X	X		X				
Простейшие и глисты						X	X	X
Вирусы			X		X			
Ориентировочное логарифмическое уменьшение на различных этапах очистки сточных вод								
Вторичная очистка	1—3	0,5—1	0,5—2,5	1—3	0,5—2	0,5—1,5	0,5—1	0—2
Фильтрация в двух средах[a]	0—1	0—1	1—4	0—1	0,5—3	1—3	1,5—2,5	2—3
Хранение в резервуаре	1—5	н/д	1—4	1—5	1—4	3—4	1—3,5	1,5—>3

Обозначения:

н/д — нет данных.

Примечание 1 — Коэффициенты снижения зависят от конкретных условий эксплуатации, таких как время удерживания, время контакта и концентрации используемых реактивов, размер пор, глубина фильтрации, предварительная обработка и прочие факторы. Приведенные диапазоны не следует принимать за основу для проектирования или регулирования — они предназначены исключительно для относительного сравнения.

Примечание 2 — См. таблицу 3.

[a] Включая коагуляцию.

Поскольку снижение индикаторных микроорганизмов, представленное в таблице для каждого типа очистки, является лишь ориентировочным, точные значения снижения содержания патогенов следует определять для каждой ситуации, как с учетом типа очистки, так и с учетом параметров окружающей среды и уровня эксплуатации, к которым относятся: температура, концентрация органических веществ, мутность, уровень pH, аммиак, щелочность каждой системы, тип используемых труб и поливного оборудования.

4.4 Сокращение содержания патогенных микроорганизмов различными методами обеззараживания

Цель обеззараживания очищенных сточных вод должна заключаться в удалении или нейтрализации патогенных микроорганизмов, которые остаются в ОСВ по окончании стандартного процесса очистки. Следует отметить, что полная нейтрализация не во всех случаях осуществима, поэтому требуется выделение дополнительных инвестиций в методы, которые не обеспечивают требуемый уровень об-

работки по содержанию патогенных микроорганизмов, для достижения условий, гарантирующих отсутствие причинения значительного вреда здоровью при использовании сточных вод для орошения. Снижение концентрации патогенных микроорганизмов может быть интегрировано с дополнительными стратегиями контроля, которые могут предотвратить воздействие на здоровье, например, установление ограничений на орошение с помощью ОСВ в зависимости от достигнутого уровня их качества.

Как было отмечено, практическое измерение всех патогенных микроорганизмов в ОСВ фактически невозможно по вышеуказанным причинам, поэтому используются индикаторные микроорганизмы (см. 4.2).

Снижение количества индикаторных и патогенных микроорганизмов в ОСВ различными методами обеззараживания представлено в таблице 3 [2].

Таблица 3 — Ориентировочное логарифмическое уменьшение индикаторных микроорганизмов и энтеральных патогенов различными методами обеззараживания ОСВ [2]

	Индикаторные микроорганизмы			Патогенные микроорганизмы				
	Кишечная палочка (индикаторные бактерии)	*Энтеритная клостридия*	*Фаги* (индикаторный вирус)	Энтеробактерии *(например, кампилобактеры)*	Энтеровирусы	*Лямблия кишечная*	*Криптоспоридии парвум*	Глисты
Бактерии	X	X		X				
Простейшие и глисты						X	X	X
Вирусы			X		X			
Ориентировочное логарифмическое уменьшение различными методами обеззараживания[a]								
Мембранная фильтрация (UF, NF и RO)[b]	4 > 6	>6	2 > 6	>6	2 ≥ 6	>6	4 >6	>6
Озонирование	2—6	0—0,5	2—6	2—6	3—6	2—4	1—2	н/д
УФ-обеззараживание	2 > 6	н/д	3 > 6	2 > 6	1 > 6	3 > 6	3 > 6	н/д
Продвинутое окисление	>6	н/д	>6	>6	>6	>6	>6	н/д
Хлорирование	2 > 6	1—2	0—2,5	2 >6	1—3	0,5—1,5	0—0,5	0—1

Обозначения:

н/д — нет данных.

[a] Коэффициенты снижения зависят от конкретных условий эксплуатации, таких как время удерживания, время контакта и концентрации используемых реактивов, размер пор, глубина фильтрации, предварительная обработка и прочие факторы. Приведенные диапазоны не следует принимать за основу для проектирования или регулирования — они предназначены исключительно для относительного сравнения.

[b] Показатели удаления резко меняются в зависимости от установки и обслуживания мембран.

5 Обеззараживание

Частичное удаление микроорганизмов может быть достигнуто на различных этапах очистки, в то время как обеззараживание является основным процессом для нейтрализации микроорганизмов или их удаления из очищенных сточных вод.

Схема повторного использования ОСВ для орошения должна включать обеззараживание для сокращения содержания патогенных микроорганизмов; это один из основных барьеров, обязательный для некоторых отдельных видов использования и опциональный для других.

Примечание — Процесс обеззараживания сокращает содержание микроорганизмов до предела аналитического обнаружения, но не удаляет их полностью. Полное удаление возможно только с помощью технологии стерилизации.

Обеззараживание ОСВ может быть достигнуто с помощью различных методов, представленных в разделах 6—8, в том числе:

- химическим обеззараживанием;

- ультрафиолетовым излучением;
- мембранной фильтрацией.

Действие дезинфицирующих средств на микроорганизмы является результатом различных механизмов, происходящих одновременно или по отдельности [3]:

- изменений в структуре ДНК, препятствующих размножению и, следовательно, инфекционности;
- повреждения стенки клеток;
- изменения проницаемости клеток;
- изменения коллоидной природы протоплазмы;
- ингибирования активности ферментов.

Исключением является использование мембранных методов, для которых не работает ни один из механизмов, указанных в предыдущих подпунктах. В этом случае мембрана отделяет микроорганизмы от ОСВ и концентрирует их в отработанном растворе.

Реактивы, используемые в качестве дезинфицирующих средств, должны быть доступны в больших количествах, по разумной цене, не вызывать коррозии и окрашивания. Кроме того, оборудование, используемое при применении химических дезинфицирующих средств, должно быть устойчивым и/или приспособленным к таким реактивам в концентрированном или разбавленном виде.

Схема может также включать некоторые виды обеззараживания в качестве средства предотвращения образования биологических обрастаний в водораспределительных трубопроводах и оросительном оборудовании.

6 Химическое обеззараживание

6.1 Общие положения

Функция дезинфицирующих средств при использовании ОСВ для орошения хорошо описана в ISO 16075-2 [4]. Использование галогенизированных реактивов в системах транспортировки и распределения воды предназначено для защиты оросительных систем от биологических обрастаний, под которыми понимается слизь, растущая на стенках труб [5].

Для обеззараживания ОСВ могут использоваться различные химические реактивы. Два наиболее распространенных из них — это галогенизированные окисляющие реактивы (хлор, бром и их соединения) и озон (см. 6.2 и 6.3).

Химическое дезинфицирующее средство для ОСВ должно обладать следующими характеристиками [3]:

- обеспечением эффективности при минимальном изменении характеристик воды, таких как увеличение общего содержания растворенных твердых веществ (TDS) или изменение уровня pH;
- однородностью состава и низкой потерей бактерицидного действия во время хранения или простоя;
- растворимостью в воде и прохождением через клеточные ткани;
- способностью проникать через поверхность частиц;
- невозможностью абсорбции органическими веществами, за исключением бактериальных клеток;
- отсутствием токсичности для людей и других животных, безопасностью транспортировки, хранения, обработки и использования;
- токсичностью для целевых микроорганизмов и эффективностью при высокой степени разбавления в диапазоне температур окружающей среды.

6.2 Обеззараживание соединениями хлора/брома

6.2.1 Общие положения

Обеззараживание воды и ОСВ галогенизированными химическими реактивами широко используется и считается эффективным и простым в использовании методом обеззараживания. При добавлении таких реактивов в воду происходит две реакции: гидролиз с образованием гипогалоидной кислоты [см. формулу (1)] и распад на гипогалогенит-ионы [см. формулу (2)] [6], где X = Cl, Br.

$$X_2 + H_2O \rightarrow HOX + H^+ + X^-, \quad (1)$$

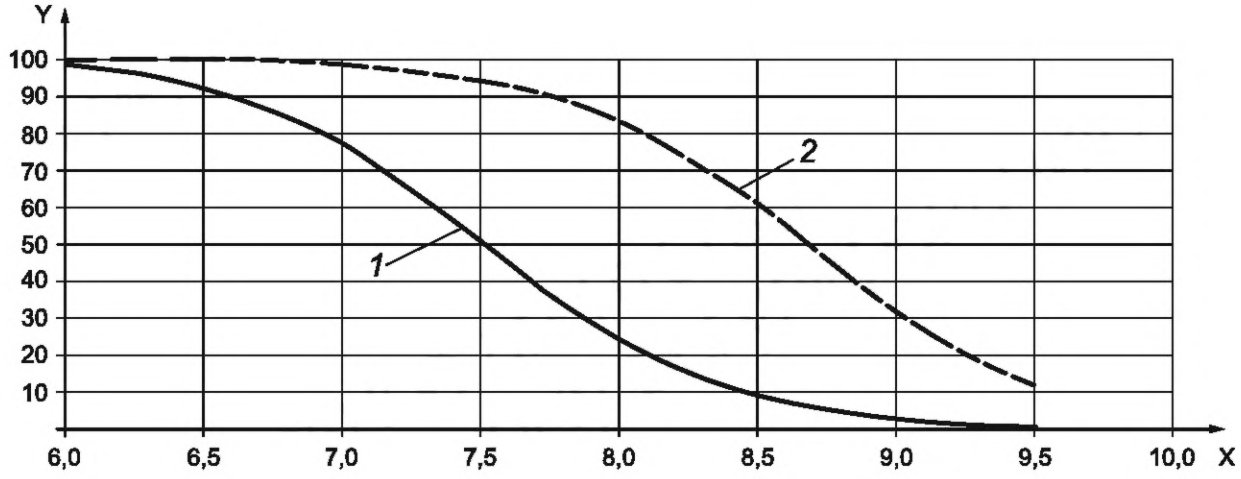
$$HOX \leftrightarrow H^+ + OX^-. \quad (2)$$

Распад гипогалоидных кислот зависит от уровня pH, как показано в таблице 4 и на рисунке 1. Гипогалогенит-анионы являются на 2 порядка менее эффективными биоцидами, чем кислотная форма [6].

Таблица 4 — Распределение между гипогалоидной кислотой и гипогалогенит-анионами в зависимости от уровня pH [6]

pH	Хлор		Бром	
	% HOCl	% OCl^-	% HOBr	% OBr^-
7,5	50	50	94	6
8,0	24	76	83	17
8,5	9	91	60	40
9,0	3	97	33	67

Кривая распада гипогалоидных кислот приведена на рисунке 1:



X — уровень pH; Y — % активной кислоты; *1* — HOCl; *2* — HOBr

Рисунок 1 — Кривые распада гипогалоидных кислот

6.2.2 Реакции хлора/брома с аммиаком

Неочищенные и очищенные сточные воды содержат различные концентрации аммиака, которые вызывают трудности при обеззараживании воды. В результате реакции аммиака с добавляемым хлором или бромом образуются соединения с гораздо меньшей дезинфицирующей способностью, чем свободный хлор или бром.

Возможные реакции между HOX и аммиаком представлены в формулах (3)—(5) [3], где X = Cl или Br.

$$NH_3 + HOX \quad H_2O + NH_2X \rightarrow \text{(монохлорамин/бромамин)}, \tag{3}$$

$$NH_3 + 2HOX \quad 2H_2O + NHX_2 \rightarrow \text{(дихлорамин/бромамин)}, \tag{4}$$

$$NH_3 + 3HOX \quad 3H_2O + NX_3 \rightarrow \text{(Трихлорид/трибромид азота)}. \tag{5}$$

Эти реакции происходят практически мгновенно и зависят от уровня pH. Например, для соединений хлора при уровне pH выше 8,5 образуется только монохлорамин; ниже этого уровня существуют смеси моно- и дихлорамина; а при уровне pH ниже 4,2 существует только трихлорид азота.

6.2.3 Определение галогенизированных остатков обеззараживания

Хлор в хлораминовых соединениях определяется как связанный активный хлор. Связанный активный хлор обладает меньшей дезинфицирующей способностью, чем свободный хлор, однако сочетание свободного хлора и связанного активного хлора (хлораминов), присутствующих в воде, дает способность обеззараживать воду.

Остаточный хлор доступен в трех формах:

- хлорамины: форма связанного хлора;
- хлорорганические соединения: слабая форма связанного хлора;
- свободный хлор: самая сильная форма остаточного хлора для обеззараживания.

Потребность в хлоре рассчитывают как разницу между общим количеством хлора, добавленного в воду, и остаточным хлором. Это количество, которое вступает в реакцию с веществами в воде, оставляя после себя неактивную форму хлора.

Сумма потребности в хлоре и остаточного хлора определяет количество хлора, вводимого в воду.

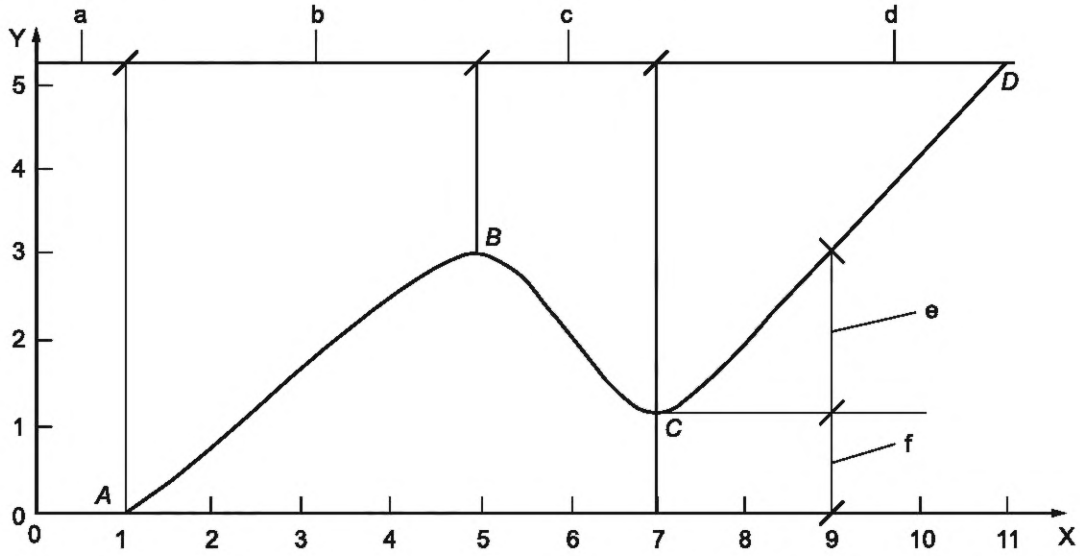
Добавленный хлор = потребность в хлоре + остаточный хлор

Остаточный хлор = связанный активный хлор + свободный хлор

То же самое относится и к бромиду.

6.2.4 Реакция точки перелома

Реакция между хлором и аммиаком вызывает уникальное явление, которое оказывает большое влияние на процесс обеззараживания хлором. При добавлении хлора в ОСВ (содержащие аммиак) происходит поэтапная реакция, как описано ниже (см. рисунок 2).



X — доза хлора, мг/л; Y — остаточный хлор, мг/л; *A*—*B* — связанный остаточный; *C* — точка перелома; *C*—*D* — свободный и связанный остаточный; a — разрушение остатков хлора восстановительными соединениями; b — образование хлорорганических и хлораминовых соединений; c — разрушение хлораминов и хлорорганических соединений; d — образование свободного хлора и наличие неразрушенных хлорорганических соединений; e — свободный остаточный; f — связанный остаточный

Рисунок 2 — Хлорирование до точки перелома [3]

Первый этап: разрушение остаточного хлора восстановительными соединениями. Неорганическими восстановителями, обычно встречающимися в сточных водах и вступающими в реакцию с хлором, могут быть: сероводород (H_2S), двухвалентное железо (Fe^{2+}), марганец (Mn^{2+}), нитрит (NO_2–). Эти восстановители на первом этапе забирают остаточный хлор, добавленный в воду до точки *A*.

Второй этап: образование хлорорганических и хлораминовых соединений. Как описано в разделе 6.1, аммиак (NH_3) содержится в сточных водах и вступает в реакцию с хлором на втором уровне. Он соединяется с хлором, образуя одну из трех форм хлорамина. Органические соединения вступают в реакцию с имеющимся в сточных водах хлором последними и образуют хлорорганические соединения (потребность в хлоре между точками *A* и *B*). В этом диапазоне молярное соотношение хлора и аммиака равно 1 и увеличивается по направлению к точке *B*.

Третий этап: разрушение хлорорганических и хлораминовых соединений. Между точкой *B* и точкой перелома *C* часть хлораминов превращается в трихлорид азота, остальные хлорамины окисляются до закиси азота (N_2O) и азота (N_2), а хлор восстанавливается до хлорид-иона. Молярное соотношение в точке перелома равно 1,5 к 1.

Четвертый этап: образование свободного хлора и наличие неразрушенных хлорорганических соединений. Продолжение добавления хлора после точки перелома *C* приводит к прямо пропор-

циональному увеличению свободного хлора. На этом этапе в воде присутствуют связанный и свободный хлор (остаточный хлор).

Перелом можно описать как точку, в которой потребность в хлоре была полностью удовлетворена (т. е. хлор вступил в реакцию со всеми восстановителями, органикой и аммиаком). Аммиачный азот может полностью исчезнуть в точке перелома или уменьшиться до следового количества, особенно при нейтральных значениях pH; но на практике остается «неснижаемый минимум» остаточного хлора (также называемый «нежелательным остатком»), как правило, в количестве нескольких десятых долей миллиграмма на литр в виде Cl_2.

6.2.5 Значения CT хлора/бромида и их соединений

Факторы, определяющие эффективность обеззараживания, включают тип дезинфицирующего средства, его концентрацию в воде и время действия на патогенные микроорганизмы в воде.

Эффективность обеззараживания для каждого типа дезинфицирующего средства рассчитывается по значению CT. Значение CT получают путем умножения остаточной концентрации дезинфицирующего средства C после заданного времени контакта T на время контакта. Значения CT используют для расчета дозы дезинфицирующего средства, необходимой для обеззараживания ОСВ, и выражают в единицах мг мин/л.

6.2.6 Хлорированные соединения для обеззараживания ОСВ

6.2.6.1 Хлор (Cl_2) [3]

Обеззараживание хлором является наиболее распространенным методом обеззараживания воды и ОСВ из-за простоты метода, оборудования и условий эксплуатации.

Хлор (Cl_2) может присутствовать в виде газа или жидкости (в резервуарах под давлением). При добавлении в воду происходят две реакции, как указано в общем описании в разделе 6.2.1 для галогенизированных окислителей: гидролиз с образованием гипохлористой кислоты (HOCl) [см. формулу (6)] и ионизация с образованием гипохлорит-иона (OCl^-) [см. формулу (7)]:

$$Cl_2 + H_2O \rightarrow HOCl + H^+ + Cl^-, \quad (6)$$

$$HOCl \rightarrow H^+ + OCl^-. \quad (7)$$

Эти две реакции могут снизить уровень pH воды и изменить растворимость солей, на которую влияет уровень pH воды. Это может вызвать проблемы, если концентрация ионов близка к пределу растворимости в воде.

Относительное распределение в воде двух форм [см. формулы (6) и (7)] имеет большое значение, так как гермицидная эффективность HOCl значительно выше, чем у OCl^-.

Было доказано, что распад HOCl в воде зависит от температуры, и pKa (константа распада) для HOCl находится в диапазоне от 7,49 до 7,82 при температуре от 0 °C до 30 °C. При 20 °C и уровне pH = 7,58 присутствует по 50 % каждой формы (см. рисунок 1 и таблицу 4).

Соединения OCl^- и HOCl, как правило, относят к свободному хлору (см. 6.2.3), который чрезвычайно реакционноспособен с многочисленными компонентами бактериальной клетки.

6.2.6.2 Дезинфицирующее средство гипохлорит натрия и кальция («жидкий отбеливатель» и «хлорный порошок»)

Гипохлорит натрия и гипохлорит кальция — это соединения хлора, образующиеся в результате реакции хлора с гидроксидами. При применении гипохлорита в водных системах образуются гипохлорит-ион и гипохлористая кислота [см. формулы (8)—(11)]:

$$NaOCl \rightarrow OCl^- + Na^+, \quad (8)$$

$$OCl^- + Na^+ + H_2O \rightarrow HOCl + Na^+ + OH^-, \quad (9)$$

$$Ca(OCl)_2 \rightarrow 2\,OCl^- + Ca^{2+}, \quad (10)$$

$$2\,OCl^- + Ca^{2+} + 2\,H_2O \rightarrow 2\,HOCl + Ca^{2+} + 2OH^-. \quad (11)$$

Хотя незначительная доля щелочи при добавлении гипохлорита не может сильно повлиять на конечный уровень pH воды, из-за буферной емкости ОСВ некоторое повышение уровня pH может способствовать выпадению нерастворимых солей.

6.2.6.3 Диоксид хлора (ClO_2)

Диоксид хлора является эффективным дезинфицирующим средством. Его преимущества включают эффективность в широком диапазоне значений уровня pH и повышенных температур. Он эффективен против широкого спектра организмов (включая цисты и простейшие) и вирусов.

Еще одним преимуществом использования диоксида хлора по сравнению с хлором является то, что диоксид хлора не образует соединений с аммиаком, который снижает эффективность обеззараживания хлором.

Диоксид хлора является нестабильным и взрывоопасным газом, и его получают на месте за счет реакции хлорита натрия ($NaClO_2$) по формуле

$$2\ NaClO_2 + 2\ Cl_2 \rightarrow 2\ ClO_2 + 2\ NaCl. \quad (12)$$

6.2.6.4 Производство хлора на площадке

В случаях, когда необходимо произвести обеззараживание небольшого количества сточных вод в отдаленных районах, затраты на транспортировку дезинфицирующих средств могут превышают стоимость дезинфицирующего средства.

В таких случаях можно использовать твердые таблетки хлора или несколько методов производства относительно небольшого количества активного хлора (гипохлорита натрия) на площадке, например, получение хлора из соли или из раствора соленой воды.

Такая технология основана на производстве гипохлорита путем пропускания электрического тока через соленую воду. При этом на месте производства образуется гипохлорит натрия, а также газообразный водород (H_2). В воду добавляется только хлорид натрия (NaCl) либо используется морская или соленая вода.

Реакция описана в формуле

$$NaCl + H_2O + \text{электрический ток} \rightarrow NaOCl + H_2. \quad (13)$$

Для эффективной работы системы в нее следует подавать умягченную воду.

По соображениям безопасности эксплуатации требуется специальная система для контроля и обработки концентрации газообразного водорода.

Хлор также можно получать путем электрохлорирования на площадке (OSEC) раствора гипохлорита натрия в концентрации от 0,8 % до 1 %. Раствор гипохлорита всегда доступен в стабильной концентрации и избавляет от необходимости работать с опасными химическими реактивами.

Один из этих методов следует использовать особенно в районах, где ОСВ используются для орошения в местах, удаленных от очистных сооружений, например, если необходимо обеззаразить ОСВ по месту использования.

6.2.7 Преимущества, недостатки и технические особенности метода обеззараживания на основе хлорных биоцидов

Хлор является мощным окислителем и поэтому обеспечивает более высокую скорость удаления микроорганизмов в воде. Хлорирование — это хорошо отработанная технология, легкодоступная во всем мире, обладающая способностью поддерживать остаточный хлор в очищенных стоках. Однако использование хлора и его соединений может увеличить содержание хлоридов в ОСВ; остатки хлора нестабильны в присутствии высоких концентраций материалов, поглощающих хлор, что требует более высоких доз для достижения необходимого уровня обеззараживания; некоторые виды паразитов показали устойчивость к используемым на практике дозам хлора, в том числе ооцисты криптоспоридии парвум, цисты дизентерийной амебы и лямблии кишечной, а также яйца паразитических червей.

Соединения хлора могут вступать в реакцию с компонентами в очищенной воде с образованием канцерогенных побочных продуктов.

Обращение и хранение хлора и его соединений может быть сопряжено с определенными трудностями, как показано в таблице 5.

Таблица 5 — Преимущества, недостатки и технические соображения по хлору и его соединениям

Соединение	Преимущества	Технические соображения и/или недостатки
Хлор (Cl_2) Хранится в жидкой форме в контейнерах под давлением	Хранение газа в резервуарах под давлением позволяет хранить большое количество на относительно небольшой площади. Газ в контейнерах не меняет своих свойств с течением времени и поэтому может храниться длительное время. Концентрация хлора в растворе составляет 100 %, поэтому его использование экономично. Оборудование, необходимое для хлорирования и дозирования воды, относительно дешево и просто в эксплуатации	Газ ядовит для людей и животных, как для кожи, так и для органов дыхания. Поскольку утечка резервуарного газа создает высокий экологический риск, резервуары должны быть очищены или храниться вдали от жилых районов и мест скопления людей. Побочные продукты обеззараживания, такие как ТНМ, могут быть опасны для окружающей среды и могут биоаккумулироваться на сельскохозяйственных культурах
Гипохлорит натрия (жидкий отбеливатель) (NaOCl) Образуется при разбавлении хлора в воде	Хранение раствора в допустимых концентрациях для обеззараживания воды и ОСВ (11 %—12 %) не представляет опасности и поэтому не требует дистанцирования от населения. Цена материала относительно невысокая. Оборудование, необходимое для хлорирования и дозирования воды, относительно дешево и просто в эксплуатации	Считается опасным окислителем в высоких концентрациях (более 40 % хлора). Считается умеренно опасным окислителем в низких концентрациях. Поставляется для бытового использования в концентрации около 3 %. Для хранения требуются большие объемы, чем для газообразного хлора (в зависимости от концентрации материала в воде). Раствор в воде со временем теряет свою силу, поэтому его следует хранить до использования не более одной-двух недель. Раствор многократно транспортируется с места производства. Побочные продукты обеззараживания, такие как ТНМ, могут быть опасны для окружающей среды и могут биоаккумулироваться на сельскохозяйственных культурах
Гипохлорит кальция (хлорный порошок) ($Ca(OCl)_2$)	Может применяться для особых целей. Может использоваться в районах, где ОСВ используются для орошения вдали от места расположения очистных сооружений, например, если необходимо обеззараживать ОСВ в месте использования. Возможно длительное хранение при добавлении стабилизирующих материалов. При хранении в сухом, прохладном месте практически не распадается	Содержит всего 68 % хлора. Дороже, чем две другие формы хлора (газообразный хлор и гипохлорит натрия). Низкая растворимость в воде, поэтому использование в качестве дезинфицирующего средства сложнее, чем для двух других форм хлора
Диоксид хлора (ClO_2)	Более сильный окислитель, чем хлор. Более высокая эффективность обеззараживания в отношении уничтожения вирусов и паразитов по сравнению с обеззараживанием хлором. Менее подвержен влиянию изменений уровня pH и температуры по сравнению с хлором. Создает меньше вредных побочных соединений по сравнению с хлором	Необходимо производить на месте обеззараживания. Невозможно хранить большое количество материала. Производство диоксида хлора (ClO_2) дороже, чем производство хлора. Побочные продукты обеззараживания, такие как ТНМ, могут быть опасны для окружающей среды и могут биоаккумулироваться на сельскохозяйственных культурах

6.2.8 Технология хлорирования

Для того чтобы технология хлорирования была эффективной, необходимо соблюдение двух основных условий: быстрое смешивание хлора в применяемой форме с ОСВ и достаточное время контакта (время удержания) хлора с ОСВ, а именно:

- **первоначальное смешивание.** Быстрое первоначальное смешивание хлора и ОСВ должно происходить практически мгновенно (в течение нескольких секунд). Для добавления хлора может применяться перекачивание с мгновенным смешиванием, для этого используются различные смесители [3], в том числе: поточный турбинный смеситель, насос инжекторного типа и поточный статический смеситель;

- **время контакта.** Время, прошедшее с момента введения дезинфицирующего средства в ОСВ до момента использования ОСВ (или попадания в резервуар без остатков дезинфицирующего средства [4]). Для обеспечения достаточного времени контакта следует использовать один или оба из следующих способов:

1) пропускание ОСВ с дезинфицирующим средством через контейнер подходящего объема в соответствии со скоростью потока обеззараживаемых ОСВ. Контейнер может быть сконструирован в виде серпантина для улучшения фактического времени удержания;

2) пропускание ОСВ с дезинфицирующим средством через трубопровод подходящего объема. Время протекания ОСВ в трубопроводе не должно быть меньше требуемого времени контакта, учитывая диаметр трубы, длину трубы и скорость потока ОСВ в трубопроводе.

6.2.9 Бромированные соединения для обеззараживания ОСВ

6.2.9.1 Бромид натрия, активированный гипохлоритом

Бромид натрия (NaBr) после активации гипохлоритом (12 %) является эффективным дезинфицирующим средством, используемым в рецептуре жидких бромид-натриевых микробиоцидов для борьбы с водорослевым, бактериальным и грибковым шламом в промышленной водоподготовке, а также для обеззараживания сточных вод. Это быстродействующий биоцид, эффективный в широком диапазоне уровней pH. NaBr можно хранить и транспортировать как неопасный материал либо в твердом виде, либо в виде состава на водной основе. Активный дезинфицирующий материал производится на месте после реакции с гипохлоритом (12 %), как описано в формуле (14):

$$NaBr + NaOCl \rightarrow Na^{+}\ OBr^{-} + NaCl. \quad (14)$$

Присутствие воды приводит к следующему частичному распаду бромноватистой кислоты с образованием ионов водорода и ионов гипобромита, как описано в формуле (15):

$$HOBr \leftrightarrow H^{+} + OBr. \quad (15)$$

Соотношение бромноватистой кислоты и гипобромит-ионов зависит от температуры, уровня pH и щелочности воды.

При использовании в качестве дезинфицирующего средства бромноватистая кислота действует путем окисления органических веществ в живых организмах и при этом восстанавливается до бромид-иона, как описано в формуле (16):

$$HOBr + L_m \rightarrow Br^{-} + D_m, \quad (16)$$

где L_m — живые микроорганизмы;

D_m — мертвые микроорганизмы.

6.2.9.2 Бромид аммония, активированный гипохлоритом

Бромид аммония (AmBr; 35 % раствор), активированный гипохлоритом (12 %), представляет собой технологию дезинфекционной обработки воды с превосходными биоцидными и противобиопленочными свойствами. Производство биоцида осуществляется на площадке с помощью запатентованных дозаторов, смешивающих бромид аммония в необходимых условиях и соответствующий окислитель (отбеливатель), что приводит к образованию уникального дезинфицирующего средства — BAC (бромид активированный хлорамин). Реакция с отбеливателем описана в формуле (17):

$$NH_4Br + NaOCl \rightarrow Br^{-}\ [NH_4Cl] + NaOH. \quad (17)$$

6.2.9.3 Стабилизированный раствор брома

Стабилизированный раствор брома (~16 % в виде Br_2) представляет собой однокомпонентный раствор. Это биоцид, основанный на окислительном действии брома, с улучшенными результатами в щелочных водных системах, особенно по сравнению с гипохлоритом натрия. Он контролирует микро-

биологический рост и уничтожает существующие микроорганизмы, такие как бактерии, грибки и водоросли. После дозирования в воду он высвобождает активный бром для эффективного обеззараживания воды. Для его применения требуется один дозирующий насос, и он прост в использовании. Стабилизированный бромированный раствор является сильным окислительным раствором, поэтому с ним следует обращаться с осторожностью.

6.2.9.4 Бактебром

Бактебром (уксусный раствор карбамида +HBr), активированный гипохлоритом (12 %), представляет собой технологию для обеззараживания промышленных вод, систем подачи сточных вод и ОСВ. Эффективная биоцидная обработка против нароста биопленок. Активный биоцид производится на площадке после реакции с отбеливателем в правильном соотношении [см. формулу (18)]:

$$[CO(NH_2)_2 + HBr] + NaOCl \rightarrow [H_2NCONHBr \leftrightarrow HOBr] + NaCl + (CO(NH_2)_2 + HBr). \quad (18)$$

Бактебром эффективен против всех типов биологических загрязнений, вызванных бактериями, грибками и водорослями, обладает отличной активностью для предотвращения нароста и удаления биопленок. Мягкий окислитель, способный работать в высоконагруженных системах (ТОС и органика) и в широком диапазоне уровней pH (pH 6—9). Это кислотный продукт, который не способствует образованию накипи. Оборудование для дозирования просто в использовании.

Дополнительные преимущества и недостатки соединений брома приведены в приложении С и таблице С.1.

6.2.10 Преимущества, недостатки и технические особенности метода обеззараживания на основе бромированных биоцидов

Биоциды на основе брома относятся к классу галогенизированных биоцидов и широко применяются в качестве дезинфицирующих средств для очистки воды и сточных вод. Бромированные биоциды являются быстродействующими биоцидами широкого спектра действия для борьбы с водорослями, бактериями и грибками. Некоторые из них также высокоэффективны против биопленок. Дополнительным преимуществом бромированных биоцидов является их высокая эффективность как при нейтральном, так и при щелочном уровне pH.

Тем не менее, следует учитывать, что с бромированными биоцидами и исходными биоцидными веществами следует обращаться с осторожностью, избегая прямого контакта с кожей. Хранить такие соединения следует в хорошо проветриваемых местах. При повышенных температурах некоторые соединения могут выделять бром, который является токсичным газом, вызывающим сильное раздражение. Применение любого галогенизированного биоцида, включая бромированные биоциды, может привести к образованию опасных соединений, которые могут быть токсичными для окружающей среды, или даже канцерогенных побочных продуктов.

В таблице 6 приведены некоторые примеры бромированных биоцидов, включая рекомендации по обращению с ними и их хранению.

Таблица 6 — Преимущества, недостатки и технические соображения по бромированным биоцидам и их соединениям

Соединение	Преимущества	Технические соображения и/или недостатки
NaBr — активированный гипохлоритом (12 %)	Может храниться и транспортироваться как неопасное твердое вещество. Водные растворы не опасны, обладают хорошей стабильностью при хранении. Дозирующее оборудование относительно дешево и просто в использовании. Мониторинг легко осуществим с помощью галогенных датчиков	Необходимо активировать на месте — с помощью гипохлорита
AmBr (Фузицид, 35 %-ный раствор AmBr) — активированный гипохлоритом (12 %)	Превосходный бактерицидный эффект за короткое время и в малых концентрациях. Эффективен против бактерий и широкого спектра микроорганизмов, таких как грибки и дрожжи. Мало расходуется растворенными органическими веществами, что способствует осмосу в слизь и подавляет ее рост.	Требуется установка специального дозирующего оборудования вблизи предполагаемой системы или площадки очистки. Требуется активация гипохлоритом

Окончание таблицы 6

Соединение	Преимущества	Технические соображения и/или недостатки
	Отсутствие усиления коррозии таких металлов, как нержавеющие и углеродистые стали, из-за незначительного окисления	
Стабилизированный раствор брома (~16 % в виде Br_2)	Регулирует микробиологический рост и уничтожает существующие микроорганизмы, такие как бактерии, грибки и водоросли. По сравнению с традиционной обработкой щелочных систем охлаждения (бромид натрия с отбеливателем) нет необходимости в дорогостоящей станции смешивания (включая два дозирующих насоса), а достаточно одного дозирующего насоса. Мониторинг легко осуществим с помощью галогенных датчиков	Является окислителем и не должен храниться вблизи восстановителей или сильных кислот
Бактебром (водный раствор карбамида + HBr) — активированный гипохлоритом (12 %)	Отличная активность против биопленки — предотвращение и удаление. Наличие карбамида и кислотный уровень pH делают его совместимым с широким спектром удобрений. Мягкий окислитель, способный работать в высоконагруженных системах (ТОС и органика) и в широком диапазоне уровней pH (pH 6—9). Кислотный продукт, который не будет способствовать образованию накипи. Оборудование для дозирования просто в использовании	Прекурсор бактеброма представляет собой концентрированную кислоту. Считается опасным раствором (коррозийная жидкость). Требуется установка дозирующего оборудования вблизи предполагаемой системы. Требуется активация гипохлоритом. Важно убедиться, что два концентрированных прекурсора (бактебром и гипохлорит) не смешиваются без разбавления
Примечание — В прошлом фермеров удерживало от использования брома опасение за безопасность работников. Новые материалы более безопасны для фермеров и рекомендованы для использования в оросительных системах для защиты распределительной системы и ирригационного оборудования.		

6.3 Озон

6.3.1 Химическая структура обеззараживания озоном

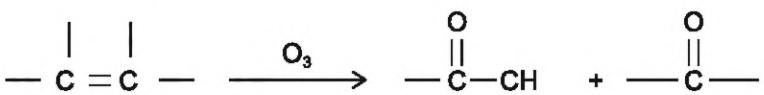
Озон, высокотоксичный окисляющий газ, состоящий из трех атомов кислорода (O_3) и характеризующийся сильным запахом, может использоваться в водоподготовке для обеззараживания и окисления (например, для устранения запаха, обесцвечивания, нейтрализации микрозагрязняющих веществ и т. д.) или их комбинации.

Озон нестабилен в воде, и его реакция не является простой, поскольку многие химические реакции могут происходить одновременно с некоторыми компонентами водной матрицы.

Озон может реагировать с веществами двумя различными способами: непосредственно с соединением (см. 6.3.2) или может производить гидроксильные радикалы, которые являются сильнейшими окислителями в воде, которые затем реагируют с соединением (см. 6.3.3).

6.3.2 Прямая реакция с озоном

Механизм, задействованный при прямой реакции с озоном, представляет собой селективную реакцию, в которой молекула озона реагирует с ненасыщенной связью, благодаря своей полярной структуре, и приводит к расщеплению связи [см. формулу (19)]:



(19)

Для получения $OH^{\bullet}$, который имеет более высокий потенциал окисления, чем молекулярный озон, и может быстро и неизбирательно воздействовать на органические и неорганические молекулы, используются передовые технологии окислительной обработки воды.

Озон обладает большей эффективностью обеззараживания против бактерий и вирусов по сравнению с хлорированием и бромированием.

Озон нестабилен и разрушается в течение времени от нескольких секунд до 30 минут. Скорость разрушения зависит от химического состава воды, уровня pH и температуры воды.

Из-за высокого уровня обеззараживания озоном и его нестабильности все остатки озона необходимо удалять из воды по окончании процесса обеззараживания [7].

6.3.3 Косвенная реакция с озоном

Механизм, задействованный в косвенной реакции с озоном, можно разделить на три разных этапа: инициация, развитие цепи и обрыв цепи. На первом этапе озон (O_3) в воде (H—OH) реагирует с гидроксильными ионами (OH^-, инициаторы), образуя вторичные окислители, гидроксильные радикалы ($OH^{\bullet}$), описанные в формуле (20) и формуле (21):

$$O_3 + OH^- \rightarrow O_2^{\bullet -} + HO_2^{\bullet}, \quad (20)$$

$$HO_2^{\bullet} \leftrightarrow O_2^{\bullet -} + H^+. \quad (21)$$

Типовыми инициаторами являются: OH^-, H_2O_2/HO_{2-} или Fe^{2+}.

На втором этапе супероксид-анион $O_2^{\bullet -}$ вступает в реакцию с озоном с образованием аниона озонида ($O_3^{\bullet -}$) [см. формулы (22)—(24)]:

$$O_3 + O_2^{\bullet -} \rightarrow O_3^{\bullet -} + O_2, \quad (22)$$

$$O_3^{\bullet -} + H^+ \leftrightarrow HO_3^{\bullet}, \quad (23)$$

$$HO_3^{\bullet} \rightarrow OH^{\bullet} + O_2. \quad (24)$$

Вещества, способствующие цепной реакции, т.е. превращающие $OH^{\bullet}$ в супероксидные радикалы ($O_2^{\bullet -}/HO_2^{\bullet}$), действуют как активные центры реакции (промоторы). Некоторые органические молекулы, R, также могут выступать в качестве промоторов. Наличие определенных функциональных групп приводит к реакции с $OH^{\bullet}$ и образованию органических радикалов $R^{\bullet}$ [см. формулу (25)]:

$$H_2R + OH^{\bullet} \rightarrow HR^{\bullet} + H_2O. \quad (25)$$

Типовыми промоторами являются: гуминовая кислота, арил-R или первичные и вторичные спирты.

Некоторые органические и неорганические вещества реагируют с $OH^{\bullet}$ с образованием вторичных радикалов, которые не производят супероксидные радикалы, выступая в качестве ингибиторов (или раскислителей), которые завершают цепную реакцию и препятствуют распаду озона [см. формулы (26) и (27)]:

$$CO_3^{2-} + OH^{\bullet} \rightarrow OH^- + CO_3^{\bullet -}, \quad (26)$$

$$HCO_3^- + OH^{\bullet} \rightarrow OH^- + HCO_3^{\bullet}. \quad (27)$$

Цепная реакция может также прекратиться в результате реакции двух радикалов, описанных в формуле (28):

$$HO_2^{\bullet} + OH^{\bullet} \rightarrow O_2 + H_2O. \quad (28)$$

Типовыми раскислителями являются: HCO_3^-, CO_3^{2-}, PO_4^{3-}, гуминовые кислоты, алкил-R и *трет*-бутиловый спирт.

Таким образом, распад озона, инициированный гидроксид-ионом, приводит к цепной реакции, производя быстро реагирующие и неселективные OH^- радикалы, которые из-за своей реактивности имеют очень короткий период полураспада, поэтому они вступают в реакцию немедленно после контакта с органическими соединениями. Комбинация реакций показывает, что в общей реакции три молекулы озона производят два $OH^{\bullet}$ [см. формулу (29)]:

$$3O_3 + OH^- + H^+ \rightarrow 2OH^{\bullet} + 4O_2. \quad (29)$$

Бикарбонат и карбонат играют важную роль раскислителей OH^- радикалов в природных системах, поскольку они могут выступать в качестве ингибиторов при обычном озонировании [7].

6.3.4 Преимущества, недостатки и технические особенности метода обеззараживания озоном

Озонирование является очень эффективным методом для удаления бактерий, вирусов и простейших (включая *лямблии* и *криптоспоридии*), а также для устранения широкого спектра неорганических, органических проблем и неприятного запаха.

Тем не менее, можно рассмотреть и другие технические аспекты озонирования, принимая во внимание характеристики каждого проекта повторного использования ОСВ, в том числе, для орошения. Например, образуются богатые кислородом соединения, такие как альдегиды и карбоновые кислоты, которые могут увеличить биоразлагаемость, и поэтому в некоторых случаях после озонирования может потребоваться этап биологической доочистки для удаления биоразлагаемых побочных продуктов окисления и сокращения нароста биопленки.

Преимущества, недостатки, технические соображения методов обеззараживания озоном приведены в таблице 7.

Таблица 7 — Преимущества, недостатки и технические соображения обеззараживания озоном [8]

Преимущества	Технические соображения и/или недостатки
Озон эффективен в широком диапазоне уровней pH, быстро вступает в реакцию с бактериями, вирусами и простейшими и обладает более сильными бактерицидными свойствами, чем хлорирование. Он обладает очень сильной окислительной способностью с коротким временем реакции	Озонирование не обеспечивает остаточного бактерицидного или дезинфицирующего действия для подавления или предотвращения повторного роста бактерий
В процессе очистки в воду не добавляются химические вещества	Озон хуже растворяется в воде по сравнению с хлором, поэтому необходимы некоторые методы смешивания газа с жидкостью
Озон может устранить широкий спектр неорганических, органических и микробиологических проблем и неприятных запахов. Микробиологические агенты включают бактерии, вирусы и простейшие (такие как *лямблии* и *криптоспоридии*)	

6.3.5 Конфигурация системы

Озон может быть получен в современном озонаторе. Прохождение высоковольтного переменного электрического разряда (А.С.) через поток газа, содержащего кислород, приводит к распаду молекулярного кислорода на атомарный кислород. Озон образуется, когда молекулы кислорода (O_2) разлагаются источником энергии на атомы кислорода, а затем сталкиваются с молекулой кислорода, образуя нестабильный газ, озон (O_3), который используют для обеззараживания сточных вод. На большинстве водоочистных сооружений озон получают посредством пропускания переменного тока высокого напряжения (от 6 до 20 кВ) через диэлектрический разрядный промежуток, содержащий кислородсодержащий газ. Озон получают на площадке, поскольку он нестабилен и разлагается на элементарный кислород через короткое время после получения.

Озон, производимый промышленным способом для реакций окисления, всегда производится в виде газа из очень сухого воздуха с концентрацией от 1,0 % до 2,0 % по массе или из кислорода с концентрацией свыше 2 % и до 8 % (или более) по массе.

После получения озон подают в контактную камеру с нисходящим потоком, содержащую сточные воды, подлежащие обеззараживанию. Основная задача реактора заключается в переносе озона из газового пузыря в объем жидкости при обеспечении достаточного времени контакта для обеззараживания. Как правило, используют следующие типы реакторов: диффузионный пузырь (с прямотоком и противотоком), впрыск под давлением, отрицательное давление (Вентури), механическое перемешивание и колонну с насадкой. Поскольку озон расходуется быстро, его контакт должен быть равномерным в реакторе с практически идеальным вытеснением.

Биологическую нитрификацию, за которой следует озонирование, следует тщательно контролировать, так как NO_2 хорошо поглощает озон [8].

6.3.6 Мониторинг озонирования

Для контроля эффективности системы озонирования до и после обеззараживания контролируют ответственные микробиологические параметры, такие как термотолерантные колиформы или другие

показатели (например, вирусы и простейшие) для систем водопотребления высокого качества, чтобы оценить способность их удаления и доказать соответствие качества воды требованиям целевого применения, т. е., как правило, национальным стандартам.

Чтобы убедиться, что система обеззараживания работает должным образом с точки зрения контроля образования побочных продуктов обеззараживания, можно проводить мониторинг основных или опасных побочных продуктов в соответствии с конфигурацией системы.

Поскольку озонирование начинает использоваться для удаления некоторых загрязняющих веществ, вызывающих новую озабоченность, таких как фармацевтические соединения, могут быть представлены специальные программы мониторинга в соответствии с предполагаемыми целями.

Подробную информацию о мониторинге и контроле системы см. в ISO 20468-3 [9].

6.4 Воздействия химического обеззараживания на окружающую среду

6.4.1 Воздействия на окружающую среду обеззараживания посредством хлорирования/бромирования

Во время обеззараживания воды могут происходить вторичные реакции и образовываться побочные продукты обеззараживания (DBP). Некоторые из таких побочных продуктов могут представлять угрозу для окружающей среды из-за присущих им свойств, а именно они могут представлять значительный риск для водной среды или через нее, благодаря своей токсичности, стойким характеристикам, способности к биоаккумуляции или эндокринному разрушению.

Во время обеззараживания воды хлор и бром, вероятно, вступают в реакцию с природным органическим веществом (NOM), которое представляет собой гетерогенную смесь органических макромолекул, изменяющихся как во времени, так и в пространстве, и в основном состоящую из гуминовых веществ, карбоновых кислот, аминокислот, белков и углеводов. Поэтому NOM выступает в качестве прекурсора при образовании DBP, таких как тригалометаны (THM), которые включают хлороформ ($CHCl_3$), дихлорбромметан ($CHBrCl_2$), дибромхлорметан ($CHBr_2Cl$) и бромоформ ($CHBr_3$). В более низких концентрациях могут также образовываться галогензамещенные уксусные кислоты, галуацетонитрилы, галокетоны и хлорпикрин. Другими важными DBP являются *N*-нитрозамины, которые оказывают токсическое воздействие; данный тип соединений является канцерогеном для человека [11], [12].

Тригалометаны являются основной группой DBP, а именно хлороформ, который представляет риск для здоровья человека, риск рака, а также представляет риск для бентосных сообществ.

Примечание — Характеристики NOM, доза хлора/брома, время контакта, уровень pH и температура, по-видимому, влияют на образование DBP. Определение потребности в хлоре/броме может быть использовано для корректировки методик обеззараживания, таких как доза хлора/брома и время реакции, с целью сокращения образования DBP до минимума.

6.4.2 Воздействия на окружающую среду обеззараживания посредством озонирования

Как и другие химические дезинфицирующие средства для обработки воды, озон нестабилен в воде и вступает в реакции с некоторыми компонентами водной матрицы. Однако его разложение на неселективные гидроксильные радикалы (OH°) имеет более широкий спектр действия на окисление многих органических загрязнителей, таких как пестициды, фармацевтические препараты и средства личной гигиены, натуральные и синтетические гормоны. В ходе этого процесса также может образовываться некоторое количество DBP, однако современные знания о его поведении в окружающей среде все еще ограничены.

Образование DBP является очень сложным процессом и сильно зависит от характеристик воды (например, TOC, бромиды, аммиак, карбонатная щелочность), а также от используемых технологий очистки и рабочих параметров (например, уровень pH, температура, доза озона, время контакта). Следовательно, даже на одном объекте могут наблюдаться сезонные колебания. Кроме того, при озонировании DBP образуется сложная смесь и может вызывать синергетические или антагонистические взаимодействия с другими веществами, т. е. обработка озоном может либо увеличивать, либо уменьшать токсичность и мутагенность.

Окисление хлора и брома может также привести к образованию хлоратов и броматов, которые оказывают токсическое воздействие. Броматы являются потенциальным канцерогеном.

Образование DBP следует контролировать с помощью одного из следующих методов:

- удалением прекурсоров, которые вступают в реакцию с дезинфицирующими средствами для образования нежелательных DBP (снижение концентрации NOM);

- оптимизацией обработки воды для контроля образования DBP, например, посредством контроля уровня pH и/или концентрации растворенного озона;
- удалением образовавшихся DBP (глубокая доочистка).

Это также относится к хлору/брому (см. 6.4.1).

7 Ультрафиолетовое обеззараживание

7.1 Общие положения

Убивающий микробы ультрафиолетовый свет — это часть светового спектра от 200 нм до 415 нм, которая проникает и повреждает споры, цисты и вегетативные клетки. Доказана эффективность ультрафиолетового света излучения против бактериальных и простейших патогенов, вирусов и водорослей, а также микробов, образующих биопленку, которые устойчивы к обычно используемым дезинфицирующим средствам, таким как хлор. Это более безопасно в сельскохозяйственных условиях, поскольку передозировка ультрафиолета на воду не влияет, в то время как передозировка химикатов в воде может отрицательно сказаться на орошаемой продукции.

Для разных целевых организмов требуются разные дозы УФ. УФ может нейтрализовать патогенные микроорганизмы без образования канцерогенных побочных продуктов обеззараживания (DBP) или остатков, которые могут оказать экологическое воздействие на принимающие водотоки.

Механизм обеззараживания УФ-светом значительно отличается от механизмов химических дезинфицирующих средств. УФ-свет поглощается клеткой и нейтрализует микроорганизмы, повреждая их нуклеиновую кислоту и белки, тем самым делает не возможной их репликацию или, в некоторых случаях, восстановление повреждений. Микроорганизм, который не может реплицироваться или восстанавливаться, не может заразить хозяина или распространиться.

Проектирование, эксплуатация и обслуживание систем УФ-обеззараживания также отличаются от традиционных химических дезинфицирующих средств. Такие аспекты, как температура и уровень pH, которые являются важными для эффективности химического обеззараживания, практически не влияют на эффективность УФ-обеззараживания.

Поскольку ультрафиолет не оставляет остатков, которые можно контролировать, чтобы определить, правильно ли была получена доза, системы УФ-обеззараживания должны пройти валидацию, чтобы можно было рассчитать необходимые параметры для достижения необходимого уровня обеззараживания в каждой конкретной ситуации. Валидацию ультрафиолетовой системы выполняют в соответствии с опубликованными протоколами. Прошедшая валидацию УФ-система может заменить химические реактивы для первичного обеззараживания сточных вод для орошения, поскольку она способна нейтрализовать как типовые, так и химически устойчивые бактерии, вирусы, грибки, водоросли, плесень и дрожжи, не образовывая при этом канцерогенные DBP.

Соответствующие методы валидации рассматриваются в разделе 7.7.

Поскольку периодический контроль остатков не является актуальным для УФ-излучения, после монтажа УФ-установки для оценки и проверки эффективности УФ-излучения требуется только непрерывный мониторинг ключевых переменных. К ключевым переменным относятся:

- интенсивность УФ-излучения;
- скорость потока;
- пропускание ультрафиолета (UVT).

Эксплуатационные переменные, такие как загрязнение, старение и мощность лампы, также следует учитывать при оценке эффективности УФ-излучения [13].

7.2 Технологии ультрафиолетового излучения и принцип их действия

7.2.1 Общие положения

Ультрафиолетовый свет генерируется в лампе путем подачи напряжения на газовую смесь, в результате чего происходит разряд фотонов. Конкретные длины волн света, излучаемого фотонным разрядом, зависят от элементарного состава газа и мощности лампы. В ультрафиолетовых лампах, предназначенных для обработки воды, как правило, используют смесь, содержащую ртуть, которая излучает свет в бактерицидных длинах волн. В зависимости от приложенного давления и напряжения, а также составляющих и количества различных элементов внутри лампы, будет генерироваться различное сочетание длин волн.

Основной механизм обеззараживания включает поглощение ультрафиолетового фотона пиримидиновыми основаниями (в основном тимином), когда два пиримидиновых основания находятся рядом друг с другом в цепи ДНК. В результате образуется «димер», который связывает два основания вместе, препятствуя репликации. Ультрафиолетовый свет также может повреждать клеточные мембраны, клеточную РНК и микробные белки, которые могут запускать механизмы восстановления, особенно у вирусов.

Хотя длины волн от 200 нм до 415 нм являются бактерицидными, конкретная реакция микроба («эффект дозы») будет отличаться в зависимости от его чувствительности или устойчивости к УФ-излучению. Такой «спектр действия» определяет дозу, необходимую для нейтрализации организма, чтобы он не мог восстановиться. Конкретная доза будет разной в зависимости от того, если применяется только одна длина волны (лампы низкого давления или лампы низкого давления с высокой светоотдачей, или амальгамные лампы), или, если применяется несколько длин волн (лампы среднего давления).

Скорость потока является важным параметром, который отражает время нахождения воды в камере обеззараживания и время воздействия УФ-излучения. Как правило, имеет место линейная зависимость от дозы. Скорость потока также влияет на гидравлические характеристики и дозировку внутри камеры.

УФ-системы должны обеспечивать мониторинг производительности в режиме реального времени, чтобы документально доказать, что они работают в заданных условиях. Характеристики, соответствующие техническим условиям, должны включать надлежащую дозу, скорость потока, интенсивность УФ-излучения, измеряемую калиброванным датчиком интенсивности УФ-излучения, при этом учитывать текущее качество воды (UVT). Отчеты и протоколы используют для того, чтобы в сочетании с отбором проб и контролем патогенов помочь сельхозпроизводителю отследить любые возможные нарушения технологии дезинфекции и определить, можно ли убирать урожай с поля.

Примечание — УФ-излучение в сельском хозяйстве часто применяют в теплицах и культивационных помещениях для обработки дренажной воды с целью повторного использования этой воды для орошения. В связи с опасениями загрязнения воды бактериями или другими патогенами фермеры вкладывают средства в системы обеззараживания, и УФ-излучение используется как один из важных компонентов для обеззараживания воды и предотвращения распространения болезней на здоровые растения.

7.2.2 Компоненты системы УФ-обеззараживания

Система УФ-обеззараживания может включать в себя:

- источник ультрафиолетового излучения;
- камеру обеззараживания (иногда называемую «реактором»);
- пускорегулирующую аппаратуру, обеспечивающую питание, которое лампа преобразует в УФ-фотоны (энергию);
- датчики, измеряющие УФ-излучение, генерируемое лампой;
- датчики, измеряющие качество поступающей воды, которую обрабатывает ультрафиолет;
- защитные гильзы для ламп;
- механизмы очистки/протирки;
- программное обеспечение, которое управляет технологическим процессом;
- программное обеспечение, которое отслеживает технологический процесс и обеспечивает проверку и протоколирование.

Для получения данных о расходе для контроля дозы следует использовать внешнее устройство измерения расхода или допущения о расходе.

На достижимую дозу УФ-излучения и количество энергии, необходимой для обеззараживания, влияет концентрация общего количества взвешенных твердых частиц (TSS), общего органического углерода (TOC) и растворенного органического углерода (DOC), которые взаимодействуют и влияют на коэффициент пропускания УФ-излучения (UVT).

7.3 Источник ультрафиолетового излучения

7.3.1 Общие положения

Мощность ультрафиолетового излучения зависит от концентрации ртути и давления паров ртути внутри ламп. В УФ-лампах низкого давления (LP) ртуть при низком давлении паров [почти вакуум; от 2×10^{-5} до 2×10^{-3} фунтов на квадратный дюйм] и умеренной температуре [40 °C] производит практически монохроматическое (одна длина волны) бактерицидное УФ-излучение с длиной волны

253,7 нм. В УФ-лампах среднего давления (MP) используется более высокое давление паров [от 2 до 200 фунтов на квадратный дюйм] и более высокая рабочая температура (от 600 °С до 900 °С) для увеличения частоты столкновений между атомами ртути, что позволяет получить УФ-свет широкого спектра (полихроматический) с общей более высокой интенсивностью.

В настоящее время на рынке доступны следующие типы ламп для УФ-обеззараживания ОСВ:

- лампа низкого давления (LP).

Ртутная газоразрядная лампа, работающая при внутреннем давлении от 0,13 до 1,3 Па (от $2 \cdot 10^{-5}$ до $2 \cdot 10^{-4}$ фунтов на кв. дюйм) и потребляемой электроэнергии 0,5 ватт на сантиметр (Вт/см). Это позволяет получить практически монохроматический световой поток на длине волны 253,7 нм при более низкой рабочей температуре и более высоком КПД преобразования мощности [16];

- лампа низкого давления с высокой светоотдачей (LPHO).

Ртутная газоразрядная лампа низкого давления, работающая при повышенной потребляемой электроэнергии (от 1,5 до 10 Вт/см), что приводит к более высокой интенсивности УФ-излучения по сравнению с лампами низкого давления. Она также обеспечивает значительный монохроматический световой поток на длине волны 253,7 нм. На монохроматические лампы также влияет температура поступающей воды;

- амальгамная лампа.

Амальгамная лампа — это лампа низкого давления на основе сплава ртути (часто висмута), который находится в виде капель, а не в жидком состоянии. Она монохроматическая и обладает более высокой удельной отдачей энергии, чем другие типы ламп низкого давления. Ртутные шарики выступают в качестве регулятора давления и продлевают срок службы лампы. Тем не менее, амальгамные лампы намного сильнее нагреваются при работе, чем традиционные лампы LP, и менее стабильны в жарком климате и при нестабильном расходе воды;

- лампа среднего давления (MP).

Ртутная газоразрядная лампа, которая работает при внутреннем давлении от 1,3 Па до 13 000 Па (от 2 до 200 фунтов на кв. дюйм) и электрической мощности от 50 до 300 Вт/см. Она генерирует полихроматическое излучению ультрафиолетового света (или излучение широкого спектра) с несколькими длинами волн, как правило, от 200 до 400 нм, охватывающее спектры UVA, UVB, UVC. На лампы среднего давления не влияет температура поступающей воды.

Лампы низкого давления не столь эффективны для вторичных ОСВ с уровнем TSS выше 30 мг/л. Чем выше эти концентрации, тем меньше ультрафиолетового света проникает и может быть поглощено организмами.

Полихроматические лампы среднего давления потребляют больше энергии, чем лампы низкого давления, и обеспечивают более низкое пропорциональное преобразование энергии, но они генерируют примерно в 15—20 раз больше бактерицидного УФ-излучения, чем лампы низкого давления, и имеют меньшую общую площадь. Полихроматические УФ-фотоны среднего давления разрушают белки, запускающие механизмы восстановления, так что нейтрализованные микроорганизмы не могут восстановиться после обеззараживания, преодолевая «темные» и «светлые» механизмы восстановления, которые могут играть определенную роль, особенно в оросительной воде, подвергающейся воздействию солнечного света.

Температура воды влияет на время запуска и перезапуска, и УФ-излучение ламп низкого давления, но не ламп среднего давления. Температура лампы влияет на запуск ламп MP.

Примечание — В некоторых системах также требуется процесс охлаждения для поддержания надлежащей рабочей температуры ламп и предотвращения перегрева пускорегулирующей аппаратуры и соответствующих энергоустройств.

7.3.2 Защитный кожух источника УФ-излучения

УФ-лампы помещают в защитные гильзы. Любые отложения на гильзе могут поглощать ультрафиолетовый свет и снижать эффективность.

Гильзы, закрывающие и защищающие лампы, могут быть подвержены трещинам, которые могут возникать из-за внутреннего напряжения и внешних механических сил, таких как заедание очистителя, гидроудар, резонансная вибрация и удары предметов в текущей воде.

Во избежание трещин и последующей утечки воды следует надлежащим образом обращаться с гильзами, когда они снимаются для ручной очистки.

Разница температур между горячей лампой и более холодной водой может привести к поломке лампы. Поэтому гильзы для ламп должны быть достаточно толстыми, чтобы уменьшить их уязвимость к трещинам и защитить лампу. Следует использовать толстые гильзы.

7.4 Камера обеззараживания

Необходимо учитывать следующие факторы:

- влияние потоков во входных и выходных трубопроводах на гидравлические характеристики в камере;
- влияние конфигурации лампы на гидравлические характеристики;
- короткое замыкание;
- мертвые зоны;
- другие факторы, которые нарушают равномерность дозы и требуют больше энергии для достижения необходимой дозы.

Конфигурация УФ-приборов в установке должна обеспечивать заполнение водой всей камеры дезинфекции, без воздуха внутри.

7.5 Датчики

7.5.1 Датчики интенсивности УФ-излучения

Ультрафиолетовое излучение в системе измеряют специальным датчиком. На интенсивность УФ-лампы влияет срок эксплуатации лампы и загрязнение ее гильзы.

В идеале, в каждой лампе должен быть датчик интенсивности УФ-излучения для измерения фактической интенсивности УФ-излучения, чтобы определить, была ли достигнута необходимая доза в камере обеззараживания. Датчики интенсивности УФ-излучения следует калибровать и регулярно проверять на точность.

Примечание — Некоторые УФ-системы используют данные датчика интенсивности УФ-излучения для автоматической регулировки мощности лампы и, следовательно, интенсивности УФ-излучения, чтобы компенсировать срок эксплуатации лампы и другие факторы, влияющие на интенсивность, для получения необходимой дозы в зависимости от качества воды и скорости потока.

Датчики интенсивности ультрафиолетового излучения должны включать в себя следующее:

- оптические компоненты;
- фотодетектор;
- усилитель;
- корпус,
- электрический разъем.

Оптические компоненты могут включать контрольные окна, световоды, рассеиватели, диафрагмы и фильтры.

Контрольные окна и световоды подают свет на фотодетектор. Диффузоры и диафрагмы уменьшают количество ультрафиолетового света, достигающего фотодетектора, тем самым уменьшая снижение эффективности датчика, которое вызывает ультрафиолетовый свет. Оптические фильтры изменяют спектральную чувствительность таким образом, что датчик интенсивности УФ-излучения реагирует только на определенный набор длин волн (например, от 250 до 280 нм).

Датчики интенсивности УФ-излучения можно разделить на сухие и влажные следующим образом:

- сухие датчики контролируют ультрафиолетовое излучение через контрольное окно вне проточной воды;
- влажные датчики измеряют УФ-излучение непосредственно в контакте с водой, протекающей через устройство.

Контрольные окна и смачиваемые концы влажных датчиков могут со временем загрязняться, поэтому их следует очищать аналогично ламповым гильзам.

Датчики интенсивности УФ-излучения могут выполнять одну из двух функций:

- рабочие датчики интенсивности УФ-излучения: поточные датчики, которые постоянно контролируют интенсивность УФ-излучения;
- эталонные датчики интенсивности УФ-излучения: автономные датчики, используемые для оценки характеристик рабочего датчика интенсивности УФ-излучения. Эталонный датчик интенсивности УФ-излучения калибруют не реже одного раза в год на аттестованном объекте (например, у изготовителя) для подтверждения правильности калибровки [13].

Точные датчики интенсивности УФ-излучения используют для проверки надлежащей дозировки УФ-излучения во время работы, они должны иметь установленный режим проверки калибровки, чтобы гарантировать, что датчики интенсивности УФ-излучения всегда обеспечивают показания в пределах допуска 20 % или менее. Если интенсивность УФ-излучения выше фактической, система получит команду подавать меньше энергии и может не обеспечить достаточное количество энергии для надлежащего обеззараживания.

7.5.2 Датчики коэффициента пропускания УФ-излучения

UVT (коэффициент пропускания УФ-излучения) является показателем потребности в УФ-излучении. Он оказывает сильное влияние на дозу, передаваемую УФ-установкой. При снижении UVT интенсивность излучения во всем устройстве уменьшается, что снижает дозу, получаемую устройством. Ультрафиолетовые системы должны быть рассчитаны на необходимую дозировку УФ-излучения при определенных параметрах UVT.

Исходя из физических и химических составляющих поступающей воды, датчик UVT измеряет пропускание определенных длин волн УФ-фотонов через воду. Бактерицидные датчики UVT, как правило, измеряют в диапазоне от 250 до 280 нм, фокусируясь на 253,7 нм.

UVT измеряют по мере необходимости, поскольку качество ОСВ колеблется и изменяет количество ультрафиолетового излучения, необходимого для обеспечения обеззараживания. Некоторые установки имеют функцию измерения UVT в режиме реального времени, при которой UVT является частью расчета дозы УФ-излучения, и мощность лампы изменяется для поддержания соответствующей дозы УФ-излучения.

UVT допускается измерять с помощью настольного спектрофотометра или непрерывно измерять встроенными или внешними датчиками/анализаторами UVT в режиме реального времени.

Датчики UVT следует регулярно калибровать (в соответствии с инструкциями изготовителя) и сравнивать со значениями для той же воды, полученными с помощью настольного или альтернативного спектрометра. Допустимая погрешность UVT составляет не более ±2 %. Если значение UVT будет выше фактического, система получит команду подавать меньше энергии, и обеззараживание может быть не обеспечено.

7.6 Пускорегулирующая аппаратура

Пускорегулирующую аппаратуру следует защищать от чрезмерного нагрева с помощью вентиляции или кондиционирования воздуха в соответствии с условиями окружающей среды на объекте.

Электромагнитные пускорегулирующие аппараты работают на частоте сети, которая может меняться, и обеспечивают только ступенчатую регулировку интенсивности лампы. Электронные пускорегулирующие аппараты работают на частоте, превышающей напряжение сети, и обеспечивают почти непрерывную ступенчатую регулировку интенсивности лампы.

Примечание — Ультрафиолетовые лампы, питающиеся от электромагнитной ПРА, имеют склонность к большему затемнению конца лампы (т.е. напылению электродов) и более короткий срок службы по сравнению с лампами, запитанными от электронной ПРА, в связи с более высокими частотами, используемыми электронной ПРА.

7.7 Валидация УФ-установки

Производительность УФ-установки оценивают посредством процесса валидации. Доставка дозы в камере УФ-обеззараживания с непрерывным потоком УФ-излучения довольно сложна. Путь, который проходит организм, определяет количество ультрафиолета, которое он получит перед выходом из камеры обеззараживания, и определяет его нейтрализацию. Некоторые микроорганизмы проходят близко к УФ-лампам и получают более высокую дозу облучения, в то время как другие, которые проходят близко к стенкам камеры, получают более низкую дозу. Некоторые микроорганизмы проходят через камеру напрямую, в то время как другие проходят кружным путем. В результате каждый микроорганизм может покинуть устройство, получив разную дозу УФ-излучения. Чем равномернее распределение дозы, тем эффективнее устройство и тем меньше энергии оно потребляет для достижения необходимой дозы.

Для создания надлежащих систем УФ-обеззараживания требуется измеренная и надежная величина дозы. Она должна быть основана на полномасштабных проверочных испытаниях с известным проблемным организмом, который был количественно определен с помощью испытания эффекта дозы коллимированного пучка по опубликованным и принятым протоколам.

В то время как для валидации УФ-обеззараживания питьевой воды имеется ряд приемлемых протоколов (DVGW, ONORM, EPA), рекомендуемый протокол для установления эквивалентной дозы снижения (RED) для воды повторного использования был опубликован в 2012 году [17].

Валидация УФ-установки может быть выполнена независимой третьей стороной, компетентной в области УФ-излучения, чтобы убедиться, что номинальная доза обеспечит надежную очистку и безопасность для здоровья населения. При валидации УФ-установки рассматривают область рабочих режимов, которая описывает диапазоны скорости потока, коэффициента пропускания УФ-излучения, напряжения электропитания, потребляемой мощности ламп и сопоставляет их с микробиологическими результатами при различных условиях.

Основные компоненты протокола валидации УФ-обеззараживания воды для повторного использования включают особые методики:

- подготовки целевых микробов;
- испытания коллимированным пучком;
- отбора проб и испытания всей установки, включая матрицу качества воды;
- анализа данных;
- методов расчета дозы;
- конкретных пределов ОК/КК;
- калибровки приборов;
- протоколирования.

Для соответствия данным валидации и присвоения RED может быть составлена формула, аналогичная формуле (30):

$$R = 10^{a} \times A254^{b} \times (S/S_0)^{c} \times (1/Q)^{d}, \quad (30)$$

где R — RED (эквивалентная доза снижения) — *доза УФ-излучения* в мДж/см^2;

$A254$ — поглощение при 254 нм;

S — измеренные показания датчика интенсивности УФ-излучения;

S_0 — интенсивность УФ-излучения при 100 % мощности лампы;

Q — расход;

a, b, c, d — коэффициенты модели, которые получают при подгонке формулы к данным валидации [16].

Тем не менее, стандартная формула MS-2, разработанная специально для очищенных сточных вод для повторного использования, основана на определенных параметрах ОК/КК для MS-2 и может быть использована для присвоения RED$^{(14)}$ [см. формулу (31)]:

$$x = [y\ (\log [i] - 0{,}5464)]/0{,}0368, \quad (31)$$

где x — доза УФ-излучения;

i — нейтрализация.

Полномасштабные и масштабированные параметры и пределы реализации предусматривают интерполяцию, но не экстраполяцию номинальных значений дозы. Они должны быть основаны на самом высоком испытанном расходе, самом низком испытанном UVT, критериях датчика, точности, количественной оценке ОК/КК и пределах кривой эффекта дозы MS-2 в качестве контрольного организма.

Изменчивость мощности лампы представляет собой потенциально серьезную проблему для масштабирования УФ-системы. Принято считать, что УФ-лампы идентичны, однако при измерении мощности лампы наблюдаются значительные отклонения. Эти различия могут оказать существенное влияние на размеры и производительность УФ-систем, особенно при небольшом количестве ламп. Ожидается, что в более крупных системах изменчивость мощности лампы будет оказывать менее значительное влияние на производительность процесса. Эти аргументы указывают на еще один уровень погрешности при переходе от экспериментальных установок (где небольшое количество ламп является нормой) к полномасштабным системам. В некоторых случаях для гарантии производительности системы используются модели вычислительной гидродинамики (CFD), если полный диапазон рабочих параметров не прошел валидацию.

Чтобы устранить опасения по поводу масштабирования, проводят выборочную биооценку, в ходе которой исследуется и протоколируется фактическая производительность полномасштабной установки.

Система должна быть рассчитана на дозу УФ-излучения, исходя из нормативных требований, типа повторного использования сточных вод и максимального суточного расхода. Требуемая доза бу-

дет зависеть от типа предварительной обработки (например, фильтрация через пористую мембрану, микрофильтрация или фильтрация через полупроницаемую мембрану). Достигнутая доза должна постоянно регистрироваться, также как и интенсивность лампы, коэффициент пропускания УФ-излучения и скорость потока [17].

7.8 Эффективность системы УФ-обеззараживания

Различные конфигурации системы (например, открытый канал, закрытый канал, различные ориентации ламп и т. д.) определяют гидравлический профиль и распределение дозы. Таким образом, УФ-установки имеют различные требования к масштабированию, расположению и механическому резервированию, что определяет эффективность УФ-системы.

Расход в системе УФ-обеззараживания должен быть как можно более равномерным, с достаточным движением и перемешиванием для максимального воздействия УФ-излучения. Чем равномернее распределение дозы, тем ниже потребность в энергии для обеспечения обеззараживания. Конструкция УФ-установки должна исключать короткие замыкания и/или мертвые зоны, которые могут привести к широкому распределению дозы и, следовательно, к низкой эффективности [2].

Эффективность установленной системы УФ-обеззараживания, как правило, зависит [15]:

- от интенсивности УФ-излучения и профиля длины волны в сравнении с характеристиками поступающего потока и целевых организмов;
- типов и концентрации организмов в поступающей среде и спектра их действия;
- количества времени, в течение которого микроорганизмы подвергаются воздействию УФ-излучения;
- конфигурации источника УФ-излучения и гидравлических свойств;
- распределения/равномерности дозы внутри установки;
- качества поступающей воды с точки зрения химических характеристик, цвета, содержания растворенных частиц, твердых частиц и органических веществ;
- коэффициента пропускания УФ-излучения воды по сравнению с количеством УФ-излучения в камере обеззараживания;
- биообрастания и загрязнения от магния, железа и кальция.

7.9 Очистка

Недостаточная очистка и отложения на гильзах ламп являются наиболее распространенными проблемами, препятствующими эффективности УФ-системы. Некоторые методы предотвращают отложения, а некоторые удаляют их. Для предотвращения отложений на лампах допускается применять ультразвуковую очистку. Для удаления отложений может использоваться физическая очистка ламповых гильз одним из следующих методов:

- снятие защитных компонентов, их химическая очистка и возвращение на место;
- автономная химическая очистка, при которой устройство отключают, дренируют и промывают чистящим раствором;
- механические методы очистки с помощью механических скребков, которые физически удаляют загрязнения с поверхности гильзы лампы и не требуют слива воды из устройства, которое может оставаться в рабочем режиме. В некоторых случаях используется просто скребок, а в некоторых — пищевые химические растворы.

Периодичность очистки зависит от конкретного объекта, поскольку некоторые системы следует чистить чаще, чем другие. Химическую очистку производят с помощью лимонной кислоты. Другие чистящие средства могут включать слабые растворы уксуса, гидросульфита натрия или фосфорной кислоты. Допускается испытывать сочетание чистящих средств, чтобы найти средство, наиболее подходящее для характеристик ОСВ без образования вредных или токсичных побочных продуктов.

7.10 Воздействия УФ-обеззараживания на окружающую среду

Хотя условия применения УФ-обеззараживания могут быть разными, риск негативных последствий для окружающей среды минимален. В целом, более длинные волны с меньшей вероятностью приводят к образованию побочных продуктов обеззараживания (EPA 1997) [18]. Более высокие дозы (свыше 100 мДж/см^2) в водах, богатых нитратами, могут привести к образованию некоторого количества нитритов, хотя, как правило, их содержание ниже рекомендованных ВОЗ пределов. Ориентиро-

вочное значение для нитритов в питьевой воде составляет 3 мг/л в виде нитрит-иона (эквивалентно 0,9 мг/л в виде нитрит-азота) [19]. Сброс обеззараженной ультрафиолетом воды в окружающую среду не представляет риска загрязнения.

7.11 Преимущества, недостатки и технические соображения метода УФ-обеззараживания

Преимущества, недостатки и технические соображения методов УФ-обеззараживания перечислены в таблице 8.

Таблица 8 — Преимущества, недостатки и технические соображения УФ-обеззараживания

Преимущества	Технические соображения и/или недостатки
Эффективно в широком диапазоне уровней pH, быстро вступает в реакцию с бактериями, вирусами и простейшими, и обладает более сильными бактерицидными свойствами, чем хлорирование	Не обеспечивает остаточного бактерицидного или дезинфицирующего действия для подавления или предотвращения повторного заражения
Короткое время реакции	Ультрафиолетовый свет нейтрализует микроорганизмы, повреждая их нуклеиновую кислоту и белки. Предотвращает их репликацию, но некоторые повреждения, вызванные монохроматическим УФ-излучением, могут быть восстановлены посредством фотореактивации и темновой репарации
В процессе очистки в воду не добавляются химические реактивы	Требуется высокое качество ОСВ [соответствующий коэффициент пропускания УФ-излучения (UVT)]
Отсутствие образования побочных продуктов, опасных для здоровья	Требуется постоянный и надежный источник питания
Отсутствие экологического ущерба	Необходимость безопасной утилизации отработанных ламп
Метод не требует значительного обслуживания и прост в обращении	Требуется компьютерное отслеживание для проверки

8 Удаление патогенов с помощью мембранных методов

8.1 Общие положения

Удаление патогенов с помощью мембраны в основном осуществляется посредством фильтрации воды через мембраны с определенным диаметром пор, который меньше размера клеток патогенов. Процесс мембранной фильтрации удаляет патогенные микроорганизмы и вирусы из воды, но не нейтрализует их. Концентрат, не прошедший через мембрану необходимо безопасно обработать или удалить, так как он может содержать высокие концентрации патогенов. Совместное применение мембранной технологии с другими технологиями обеззараживания в качестве «мультибарьера» обеспечивает эффективное обеззараживание для выполнения самых строгих требований.

8.2 Мембранная система

Установка мембранной фильтрации, как правило, состоит из фильтра, мембранных модулей, баков, насосов, очистного устройства и вспомогательного оборудования. Мембраны MF/UF состоят из полимерных или керамических материалов, которые обладают пористой структурой.

По размеру пор мембраны MF/UF подразделяются по типам технологии, как показано в таблице 9.

Эффект концентрирования патогенов происходит по «механизму сита» и зависит от размера пор в пористой структуре и размера разделяемых веществ.

Мембраны NF/RO применимы для удаления TDS и бора.

Таблица 9 — Типы мембран и целевые загрязняющие вещества [21]

Тип технологии	Мембрана	TMP, приблизительный диапазон (МПа)	Удаляемые загрязняющие вещества	MWCO (кДа)
Микрофильтрация мембранная технология	MF	< 0,2	Частицы диаметром от 0,05 до 2,0 мкм: TSS, мутность, по крайней мере, 4-логарифмическое снижение содержания ооцист и цист простейших и бактерий, но не вирусов	>5 000
Ультрафильтрация мембранная технология	UF	0,2—1	0,008—0,05 мкм: TSS, мутность, макромолекулы, коллоиды, по крайней мере, 4—6-логарифмическое снижение содержания простейших и бактерий и 1—6-логарифмическое снижение содержания вирусов	5—5 000
Нанофильтрация мембранная технология	NF	0,5—3	0,001—0,02 мкм: пестициды и другие макромолекулы (с высоким молекулярным весом), цвет, коллоиды, все группы патогенов и поливалентные катионы. NF используется вместо RO, если требуется только смягчение или частичное обессоливание	0,1—5
Обратный осмос мембранная технология	RO	0,5—7	0,0001—0,002 мкм: используется для удаления растворенных солей и коллоидных/растворенных твердых частиц, включая следы органики, посредством разделения по размерам и диффузии раствора	< 0,1

8.3 Удаление патогенов с помощью мембранной фильтрации

Проектирование и выбор мембранного оборудования и системы осуществляют в соответствии с сертифицированным значением логарифмического уменьшения (LRV) для каждого класса патогенов. Системы MF эффективны для удаления ооцист и цист простейших, большинства бактерий (но не всех), но не вирусов, в то время как системы UF способны удалить большинство простейших, бактерий и вирусов. Степень удаления различных патогенов в различных мембранных системах представлена в таблице 10, приложении В и таблице В.1.

Ооцисты *криптоспоридии* не нейтрализуются при обеззараживании хлорированием, но могут быть эффективно удалены с помощью мембранной фильтрации.

Мембранные системы NF/RO не так часто применяются для удаления патогенов, поскольку их скорость удаления патогенов не превышает скорость удаления патогенов мембранными системами MF/UF с точки зрения LRV.

Преимуществом процесса мембранной фильтрации является высокий уровень удаления патогенов, достигаемый при сочетании с другими технологиями обеззараживания в качестве «мультибарьера».

8.4 Вопросы эксплуатации и обслуживания

При использовании мембранных систем необходимо учитывать следующие моменты:

- характеристики сырьевой воды;
- утилизацию концентрата;
- контроль за засорением мембраны;
- надлежащий мониторинг системы.

Полное описание см. в приложении D.

8.5 Мониторинг

Основными предметами мониторинга мембранной фильтрации являются качество воды и целостность мембраны. Характеристики мембраны и проверка целостности подробно описаны в ISO 20468-1 [20] и ISO 20468-5:2021 [21].

В отношении качества воды имеются два аспекта, которые следует контролировать и отслеживать:

a) качество исходной воды (на входе): первые испытания качества ОСВ на входе в мембраны проводят на стадии предварительного проектирования. Стратегия предварительной очистки должна быть определена соответствующим образом:

В процессе эксплуатации мембранной системы следует продолжать мониторинг факторов, перечисленных в пункте 1 приложения D. В отличие от природного источника воды, качество ОСВ может временно или постоянно меняться, особенно когда на очистные сооружения поступают сточные воды промышленного происхождения. Периодичность мониторинга части или всех параметров должна соответствовать такой изменчивости, определенной с течением времени;

b) качество продукта (выход): такой мониторинг проводят для того, чтобы установить, соответствуют ли сточные воды, очищенные с помощью мембранной технологии, требованиям, установленным местным законодательством, для выполнения которых была разработана система. Измеряемые параметры — это параметры, определяемые нормативными актами в отношении индикаторных микроорганизмов или некоторых конкретных патогенов.

8.6 Воздействия мембранных систем на окружающую среду

Особое внимание следует уделить получению концентрата с высокой концентрацией загрязняющих веществ. Концентрат может сбрасываться в канализацию или испаряться для сокращения количества концентрата и получения системы нулевого жидкого стока (ZLD). Мембранные модули/элементы состоят из различных видов пластика или керамики, которые плохо поддаются переработке. Количество твердых отходов можно рассчитать исходя из срока службы мембранных модулей/элементов. Для остаточных химических веществ и нейтрализованных отходов, образующихся при очистке, которые необходимо собирать в качестве промышленных отходов, для оценки утилизации используют объем/массу химических веществ.

8.7 Преимущества, недостатки и технические соображения удаления патогенов методом обеззараживания с помощью мембранных систем

Преимущества, недостатки и технические соображения мембранного удаления с помощью систем фильтрации обобщены в таблице 10.

Таблица 10 — Преимущества, недостатки и технические соображения мембранных систем

Преимущества	Технические соображения и/или недостатки
Эффективное удаление бактерий и простейших	Частичное удаление вирусов в зависимости от типа мембранной системы
Удаление ооцист *криптоспоридии*	Требуется обработка концентрата и жидких отходов
Отсутствие повторного роста бактерий	
Отсутствие химической реакции	
Отсутствие побочных продуктов	
Возможна автоматическая эксплуатация	

Приложение А
(справочное)

Возбудители инфекционных заболеваний, потенциально присутствующие в неочищенных (сырьевых) сточных водах

Таблица А.1 — Возбудители инфекционных заболеваний, потенциально присутствующие в неочищенных (сырьевых) сточных водах [2]

Патоген	Заболевание	Количество в сырьевых сточных водах (на 1 литр)
Бактерии		
Шигеллы	Шигеллез (бациллярная дизентерия)	до 10^4
Сальмонелла	Сальмонеллез, гастроэнтерит (диарея, рвота, лихорадка), реактивный артрит, брюшной тиф	до 10^5
Холерный вибрион	Холера	до 10^5
Энтеропатогенная *кишечная палочка* (многие другие виды *кишечной палочки* не опасны)	Гастроэнтерит и септицемия, гемолитический уремический синдром (HUS)	
Иерсинии	Иерсиниоз, гастроэнтерит и септицемия	
Лептоспиры	Лептоспироз	
Кампилобактеры	Гастроэнтерит, реактивный артрит, синдром Гийена-Барре	до 10^4
Атипичные микобактерии	Респираторные заболевания (пневмонит гиперчувствительности)	
Легионеллы	Респираторные заболевания (пневмония, понтиакская лихорадка)	
Стафилококк	Кожные, глазные, ушные инфекции, септицемия	
Синегнойная палочка	Кожные, глазные, ушные инфекции	
Хеликобактер	Хронический гастрит, язва, рак желудка	
Вирусы		
Энтеровирусы (полиомиелит, эхо, коксаки, новые энтеровирусы, серотип 68—71)	Гастроэнтерит, аномалии сердца, менингит, респираторные заболевания, нервные расстройства, другие	до 10^6
Вирус гепатита А и Е	Инфекционный гепатит	
Аденовирус	Респираторные заболевания, инфекции глаз, гастроэнтерит (серотип 40 и 41)	до 10^6
Ротавирус	Гастроэнтерит	до 10^5
Парвовирус		
Астровирус		
*Калицивирусы (*включая *норовирус и саповирус)*	Гастроэнтерит	
Коронавирус	Гастроэнтерит	

Окончание таблицы А.1

Патоген	Заболевание	Количество в сырьевых сточных водах (на 1 литр)
Простейшие		
Энтамеба	Амебиаз (амебная дизентерия)	до 10^2
Лямблии	Лямблиоз (гастроэнтерит)	до 10^5
Криптоспоридия	Криптоспоридиоз, диарея, лихорадка	до 10^4
Микроспоридия	Диарея	
Циклоспора	Циклоспориоз (диарея, вздутие живота, лихорадка, желудочные спазмы и боли в мышцах)	
Токсоплазма	Токсоплазмоз	
Глисты		
Аскарида	Аскаридоз (заражение круглыми червями)	до 10^3
Анкилостома	Анкилостомоз (заражение анкилостомами)	до 10^3
Некатор	Некатороз (заражение круглыми червями)	
Анкилостома	Мигрирующая кожная личинка (заражение анкилостомами)	
Стронгилоиды	Стронгилоидиоз (заражение нитевидными червями)	
Трихурис	Трихуриаз (заражение глистами)	до 10^2
Солитер	Тениаз (заражение ленточными червями), нейроцистицеркоз	
Энтеробиус	Энтеробиоз (заражение острицами)	
Эхинококк	Гидатидоз (заражение ленточными червями)	

Приложение В
(справочное)

Эффективность удаления микробов с помощью различных мембранных фильтров

Таблица В.1 — Эффективность удаления микробов с помощью различных мембранных фильтров

Микроорганизм	Селективность мембраны	Концентрат (LRV)	Ссылка
Группа колиформных организмов	UF: MWCO: 100 000 дальтон UF: MWCO: 200 000 дальтон	>7 log 5,2 log ~ 6,3 log	[22], [23]
Ооциста *криптоспоридий*	UF: MWCO: 200 000 дальтон	8,8 log~ 9,8 log	[22]
Циста *лямблия мурис*	UF: MWCO: 100 000 дальтон	>4,0 log ~ 5,1 log	[21]
Кишечная палочка	UF: MWCO: 200 000 дальтон UF: MWCO: 15 000 дальтон MF: размер пор 0,03 мкм	4,6 log ~ 6,0 log 2,5 log ~ 3,0 log 2,7 log ~ >4 log	[22] [23]
Фаг Qβ	UF: MWCO: 20 000 дальтон MF: размер пор 0,03 мкм MF: размер пор 0,1 мкм MF: размер пор 0,2 мкм	3 log ~ 6 log 0,85 log ~ 2,7 log 2 log ~ >2 log 1,3 log ~ >2 log	[24] [23] [25]
Фаг MS	UF: MWCO: 100 000 дальтон	>6,5 log	[21]
Фаг MS2	UF: MWCO: 200 000 дальтон	4,5 log ~ 5,8 log	[26]

В целом, производительность концентрата патогенных бактерий традиционным методом, например, комбинацией коагуляционного осаждения и быстрой фильтрации, составляет 1-2 LRV (90 %—99 % концентрата), в то время как мембрана показывает более высокую эффективность концентрата для любых микроорганизмов.

Для фагов небольшого размера показана разница в производительности концентрата между UF мембраной и MF мембраной, а также тенденция разницы в размерах пор.

Приложение С
(справочное)

Дополнительные соединения брома

С.1 BCDMH (бром-хлор-5,5-диметилгидантоин)

Биоцид широкого спектра действия для борьбы с водорослевым, бактериальным и грибковым шламом в промышленных водных системах, бассейнах и минеральных источниках, а также в системах ОСВ, эффективен в широком диапазоне уровней pH (6—10). Это простой в обращении продукт в твердой форме и очень эффективное и быстродействующее дезинфицирующее средство.

С.2 DBNPA (2,2-дибромо-3-нитрилопропионамид)

Быстродействующий эффективный биоцид. Используется для контроля роста микроорганизмов, грибков и водорослей в промышленных системах водоснабжения. Очень эффективное дезинфицирующее средство для ОСВ. DBNPA действует как биоцидное активное вещество и может храниться либо в твердой форме, либо в виде 20 % водно-гликолевого раствора. Это опасный материал, с которым следует обращаться с осторожностью.

С.3 Преимущества и недостатки бромистых биоцидов

Таблица С.1 — Преимущества и недостатки бромистых биоцидов

Соединение	Преимущества	Недостатки
BCDMH — биоцид широкого спектра	Быстродействующий биоцид широкого спектра действия для борьбы с водорослями, бактериями и грибками, эффективен в широком диапазоне уровней pH (6—10). Прост в обращении, твердая форма. Оборудование для дозирования относительно дешево и просто в использовании. Мониторинг легко осуществим с помощью галогенных датчиков	Следует хранить в сухих условиях — влага может привести к высвобождению брома. Токсичен при вдыхании и является сильным раздражителем для кожи, глаз и слизистых оболочек
DBNPA	Быстродействующие эффективные биоциды для борьбы с ростом микроорганизмов, грибов и водорослей. Прост в использовании, простая система дозирования. Выпускается в виде 20 %-ного раствора в воде/ПЭГ для более удобного обращения	Сильно раздражает глаза, слабо раздражает кожу и опасен при вдыхании или проглатывании. Коррозийный материал
Примечание — Бром как дезинфицирующее средство более опасен, чем хлор. В прошлом фермеры воздерживались от использования брома, опасаясь за безопасность рабочих. Новые материалы более безопасны для фермеров и рекомендованы для использования в оросительных системах для защиты проводящей и распределительной системы и оросительного оборудования.		

Приложение D
(справочное)

Факторы эксплуатации, обслуживания и мониторинга мембранной системы

D.1 Характеристики сырьевой воды

При проектировании и использовании мембранных систем необходимо учитывать характеристики сырьевой воды для выбора соответствующей предварительной обработки и обслуживания мембран [28].

Следует учитывать следующие параметры сырьевой воды:

- концентрацию взвешенных частиц или мутность для предотвращения непроходимости;
- органические вещества, способствующие деградации и разрушению мембран;
- железо, марганец и другие элементы потенциального осадка;
- масло, смазка или плавающие твердые частицы для предотвращения засорения;
- эрозионные вещества для сокращения износа мембраны;
- уровень pH для предотвращения разрушения мембраны.

Для сокращения возможности засорения путем частичного или полного удаления загрязняющих материалов необходимо разработать и проводить предварительную очистку сырьевой воды в мембранных системах.

D.2 Обращение с мембранным концентратом

Утилизацию концентрата необходимо учитывать при проектировании мембранной системы. В результате мембранных процессов образуются отходы, составляющие до 15 % от общего объема очищенной воды. Это тупиковая система, например, с использованием керамических мембран. Концентрат содержит загрязняющие вещества, содержащиеся в ОСВ, в более высоких концентрациях, а также некоторые химические вещества, используемые при предварительной обработке воды или при обслуживании мембран.

Концентрат можно сбрасывать в исходную воду (предпочтительно после обеззараживания), но при этом необходимо уделять внимание соединениям, вызывающим новые опасения, чтобы избежать закономерного повышения концентрации в исходной воде. Исходной водой могут быть очищенные или неочищенные сточные воды на станции очистки сточных вод. Сброс мембранного концентрата в исходную воду должен быть предпочтительным решением, если источник ОСВ или сточных вод удален от мембранной системы. Альтернативой сброса в исходную воду является испарение воды и захоронение твердых отходов на санкционированной площадке или в городской канализации.

D.3 Техническое обслуживание

D.3.1 Общие положения

Для поддержания эффективности мембранного обеззараживания необходимо проводить ряд операций по техническому обслуживанию для поддержания стабильной работы мембранной системы.

Техническое обслуживание должно включать обнаружение и устранение повреждений мембраны, возникающих из-за непредвиденных неполадок, путем проведения плановых испытаний под давлением.

D.3.2 Механизмы засорения мембраны

Засорение мембраны необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации мембранных систем [25]. Этот потенциальный фактор влияет на необходимость предварительной обработки, требования к очистке и режим эксплуатации [20], [21].

Засорение мембраны — это явление, при котором вещества (взвешенные неорганические частицы, бактерии, бактериофаги и органические молекулы) в исходной воде оседают на мембране, что может привести к сопротивлению потоку через мембрану.

Четыре возможных процесса, по отдельности или в сочетании друг с другом, могут вызвать засорение, снижая при этом расход через мембрану [27]:

a) **засорение твердыми частицами** может привести к сужению пор, закупорке пор или образованию геля/корки, вызванных концентрационной поляризацией.

Сужение пор и закупорка пор может происходить только в том случае, если частицы в сырьевой воде меньше размера пор или границы отсечки по молекулярному весу задерживаемых компонентов.

Образование геля/корки обусловлено концентрационной поляризацией, под которой понимается возникновение градиентов концентрации на границе между мембраной и раствором в результате селективного переноса некоторых видов через мембрану. Это явление возникает, когда высокая доля твердого материала в сырьевой воде больше, чем размер пор или границы отсечки по молекулярному весу задерживаемых компонентов;

b) **осаждение неорганических солей** может привести к образованию накипи, которая представляет собой осадок пересыщенных солей;

c) **засорение органическими материалами**, которые присутствуют в сырьевой воде или добавляются в процесс очистки;

d) **засорение биологическими микроорганизмами** происходит в результате биологической активности на поверхности мембраны и в порах, усиливающейся из-за высокой концентрации органических материалов и питательных веществ в сырьевой воде. Когда микроорганизмы начинают заселять поверхность мембраны, водопроницаемость мембраны снижается.

D.4 Борьба с засорением мембраны

Для борьбы с засорением мембран применяют четыре основных метода обработки:

a) **предварительная обработка сырьевой воды**. Как упоминалось в 8.5a), сырьевая вода может содержать соединения, которые могут способствовать образованию засорения. Для снижения возможности засорения в сырьевой воде могут использоваться физические и химические средства. Предварительная обработка или сочетание видов предварительной обработки выбирают в соответствии с характеристиками сырьевой воды;

b) **химическая обработка**. Чтобы избежать образования накипи, уровень pH исходной воды можно регулировать в диапазоне 5,5—6,0 таким образом, чтобы карбонаты проходили через мембрану в виде CO_2 или увеличивалась растворимость других солей. В качестве альтернативы можно использовать постоянное применение ингибиторов отложений, чтобы избежать образования и роста кристаллов;

c) **обратная промывка**. Для удаления загрязняющих веществ, скопившихся на мембране, может быть разработана технология обратной промывки. Во время обратной промывки направление потока меняется на противоположное в течение нескольких минут при высокой скорости (для создания размывающего действия). Сила и направление потока выбивают загрязняющие вещества с поверхности мембраны и вымывают скопившиеся твердые частицы [5];

d) **химическая очистка**. Для борьбы с загрязнением мембран можно использовать химическую очистку. Химическая очистка заключается в химической очистке по месту (CIP), которая проводится, когда мембранные модули остаются внутри мембраны. В процессе очистки через мембранную систему рециркулирует чистящий раствор с высокой скоростью (для создания размывающего действия) и при повышенной температуре (для повышения растворимости загрязняющих веществ).

Некоторые из распространенных химических веществ, которые могут быть использованы, представлены в таблице D.1.

Таблица D.1 — Чистящие химические средства [27]

Категория	Распространенные химические средства	Типовые целевые загрязняющие вещества
Кислота	Лимонная кислота ($C_6H_8O_7$) Соляная кислота (HCl)	Неорганическая накипь
Основание	Сода каустическая (NaOH)	Органические вещества
Окислители/дезинфицирующие средства	Гипохлорит натрия (NaOCl) Газообразный хлор (Cl_2) Пероксид водорода	Биопленки
ПАВ	Различные	Органические вещества; инертные частицы

Приложение ДА
(справочное)

Сведения о соответствии ссылочных международных стандартов национальным стандартам

Таблица ДА.1

Обозначение ссылочного международного стандарта	Степень соответствия	Обозначение и наименование соответствующего национального стандарта
ISO 20670	—	*
* Соответствующий национальный стандарт отсутствует. До его принятия рекомендуется использовать перевод на русский язык данного международного стандарта.		

Библиография

[1] ASTM D6161-10 Standard Terminology Used for Microfiltration, Ultrafiltration, Nanofiltration and Reverse Osmosis Membrane Processes (Стандартная терминология, используемая для мембранных процессов микрофильтрации, ультрафильтрации, нанофильтрации и обратного осмоса)

[2] EPA.2012. Guidelines for Water Reuse (Руководящие указания по повторному использованию воды)

[3] Asano T., Burton F.L., Leverenz H.L., Tsuchihashi R., Tchobanoglous G. Water Reuse issues, Technologies, and Applications. Metcalf & Eddy, 2007

[4] ISO 16075-2:2015 Guidelines for treated wastewater use for irrigation projects — Part 2: Development of the project (Руководящие указания, относящиеся к проектам по использованию очищенных сточных вод для орошения. Часть 2. Разработка проекта)

[5] ISO 20419:2018 Treated wastewater reuse for irrigation — Guidelines for the adaptation of irrigation systems and practices to treated wastewater (Повторное использование очищенных сточных вод для ирригации. Руководящие указания по адаптации оросительных систем и технологии к очищенным сточным водам)

[6] Tchobanglous G., Burton F.L. Wastewater Engineering Treatment, Disposal and Reuse. Metcalf & Eddy, Third Edition, 1991

[7] Gottschalk C., Libra J.A., Saupe A. Ozonation of water and waste water: A practical guide to understanding ozone and its applications. 2nd completely rev. and updated edn. Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2010

[8] United States Environmental Protection Agency Office of Water Washington, 1999. Wastewater Technology Fact Sheet Ozone Disinfection. D.C. EPA 832-F-99-063 (Агентство по охране окружающей среды США. Департамент по водным ресурсам Вашингтона. 1999. Информационный бюллетень по технологии очистки сточных вод. Обеззараживание озоном. D.C. EPA 832-F-99-063)

[9] ISO 20468-3 Guidelines for performance evaluation of treatment technologies for water reuse systems — Part 3: Ozone treatment technology (Руководящие указания по оценке эффективности технологий очистки для систем повторного использования воды. Часть 3. Технология озонирования)

[10] Espigares E., Moreno E., Fernández-Crehuet M., Jiménez E., Espigares M. Sustainable and effective control of trihalomethanes in the breakpoint chlorination of wastewater effluents. Environ. Technol. 2013, 34 pp. 231–237. DOI:10.1080/09593330.2012.689371

[11] Matamoros V., Mujeriego R., Bayona J.M. Trihalomethane occurrence in chlorinated reclaimed water at full-scale wastewater treatment plants in NE Spain. Water Res. 2007, 41 pp. 3337—3344. DOI:10.1016/j.watres.2007.04.021

[12] ISO 20468-4:2021 Guidelines for performance evaluation of treatment technologies for water reuse systems — Part 4: UV disinfection (Руководящие указания по оценке эффективности технологий очистки для систем повторного использования воды. Часть 4. Обеззараживание воды с помощью УФ-излучения)

[13] Ultraviolet Disinfection Guidelines. National Water Research Institute, Third Edition, 2012 (Руководящие указания по ультрафиолетовому обеззараживанию. Национальный научно-исследовательский институт водных ресурсов, третье издание, 2012 г.)

[14] ÖNORM M 5873-1:2020 Devices for the disinfection of water using ultraviolet radiation — Part 1: Devices equipped with UV low pressure lamps — Requirements and testing, Austrian Standards International (Устройства для обеззараживания воды с помощью ультрафиолетового излучения. Часть 1. Устройства, оснащенные ультрафиолетовыми лампами низкого давления. Требования и испытания. Австрийский международный стандарт)

[15] ÖNORM M 5873-2:2003 Plants for the disinfection of water using ultraviolet radiation — Requirements and testing — Part 2: Medium pressure mercury lamp plants, Austrian Standards International (Устройства для обеззараживания воды с помощью ультрафиолетового излучения. Требования и испытания. Часть 2. Установки с ртутными лампами среднего давления. Австрийский международный стандарт, 2003 г.)

[16] EPA. 2006. UV Disinfection Guidance Manual (Руководство по обеззараживанию с помощью УФ-излучения)

[17] NWRI. 2012. Guidelines for UltraViolet Disinfection for Drinking Water and Water Reuse (Руководящие указания по обеззараживанию питьевой воды с помощью УФ-излучения и повторному использованию воды)

[18] EPA. 1997. Influence of UV disinfection on by-product formation and operational implications (Влияние обеззараживания с помощью УФ-излучения на образование побочных продуктов и эксплуатационные последствия)

[19] WHO. 2016. Guidelines for Drinking-water Quality Background document for development of Nitrate and Nitrite in Drinking-water (Руководящие указания по качеству питьевой воды. Справочный документ для разработки. Нитраты и нитриты в питьевой воде)

[20] ISO 20468-1:2018 Guidelines for performance evaluation of treatment technologies for water reuse systems — Part 1: General (Руководящие указания по оценке эффективности технологий очистки для систем повторного использования воды. Часть 1. Общие положения)

[21] ISO 20468-5:2021 Guidelines for performance evaluation of treatment technologies for water reuse — Part 5: Membrane filtration (Руководящие указания по оценке эффективности технологий очистки для систем повторного использования воды. Часть 5. Мембранная фильтрация)

[22] Jacangelo J.G., Laîné J.M., Carns K.E., Cummings E.W., Mallevialle J. Low-Pressure Membrane Filtration for Removing Giardia and Microbial Indicators. J. Am. Water Works Assoc. 1991, 83 (9) pp. 97—106

[23] Know J. et al. 1998. Performance of a novel hollow fiber UF membrane system: clarification and disinfection of a high turbidiy surface water source. Proc. AWWA Water Quality Technology conference, Vol. 1998:419-443.

[24] Fujita K. et al. Suidokyokaishi. 1991, 60 pp. 13—18

[25] Urase T. et al. Environmental Tech. Research Papers. 1994, 30 pp. 171—180

[26] Takahashi K. et al. Suidokyokaishi. 1994, 63 (4) pp. 51—61

[27] Yahya M.T. et al. Water Sci. Technol. 1993, 27 (3-4) pp. 445—448

[28] Minnesota Water Works Operation Manual. Minnesota Rural Water Association, Fourth Edition, 2009 (Руководство по эксплуатации водопроводных сооружений штата Миннесота. Ассоциация сельских водных хозяйств штата Миннесота, четвертое издание, 2009 г.)

УДК 631.42:006.354

ОКС 13.060.01
13.060.30

Ключевые слова: руководящие указания, использование очищенных сточных вод для оросительных систем, очищенные сточные воды, обеззараживание очищенных сточных вод, эквивалентная обработка

Редактор *Е.Ю. Митрофанова*
Технический редактор *В.Н. Прусакова*
Корректор *И.А. Королева*
Компьютерная верстка *И.А. Налейкиной*

Сдано в набор 17.10.2023. Подписано в печать 08.11.2023. Формат 60×84⅛. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 4,65. Уч.-изд. л. 4,18.

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

Создано в единичном исполнении в ФГБУ «Институт стандартизации»
для комплектования Федерального информационного фонда стандартов,
117418 Москва, Нахимовский пр-т, д. 31, к. 2.

gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru

gost.e-ecolog.ru