

НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ СТАНЦИЙ ОЗОНИРОВАНИЯ ПИТЬЕВОЙ ВОДЫ, ПРОМЫШЛЕННЫХ И БЫТОВЫХ СТОЧНЫХ ВОД

Исаков В.Д.

ФГУП НИИ машиностроения, Свердловская обл., г. Нижняя Салда

АННОТАЦИЯ

Современное промышленное оборудование по озонированию воды, как правило, базируется на инновационных технологиях ее обработки, обеспечивающих конкурентоспособность: миниатюризации, энергосбережении и удешевлении изготовления не менее чем в два раза по отношению к существующим рыночным ценам. ФГУП "НИИмаш" разработал и выпускает параметрический ряд оборудования по озонированию воды производительностью 100, 1000, 2000 и 10000 м³/сутки. Предлагаемая контактная камера-реактор в РФ и за рубежом аналогов не имеет. Исключительное право в РФ на способ и конструкцию принадлежит НИИмаш. Институт разработал и приступил к промышленному изготовлению МИНИ-станций производительностью 25...100 м³/сутки с автоматизированной системой управления, которые имеют законченный технологический цикл обезвреживания и обеззараживания воды, включая подготовку воздуха, получение озона, деструкцию остаточного озона. Для комплектации МИНИ-станций создан специальный плазмохимический высокочастотный высоковольтный озонатор производительностью до 15 г/ч при минимизации его общего габаритного объема до 0,006 м³. Также разработан и изготовлен плазмохимический деструктор газов, в том числе, и озона, где на деструкцию "работает" холодная плазма, имеющая температуру от 5000 до 10000 °С.

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из способов дезинфекции питьевой воды из поверхностных водоемов была ее обработка озоном. Как отмечается в заключениях ведущих институтов России НИИ ВОДГЕО и НИИ коммунального водоснабжения и очистки воды (НИИ КВОВ), без применения озона и углей в большинстве случаев не удастся получить воду, соответствующую требованиям СанПиН 2.1.4.559-96 «Питьевая вода». Особенно неблагоприятно санитарное состояние Волжского бассейна и других источников, включая Урал и Западную Сибирь, где водозабор для питьевых целей ведется из открытых

водоемов.

В ходе экспериментов, проведенных в НИИ машиностроения за период с 1990 г. по 1996 г., была поставлена цель создать в процессе очистки такие условия, когда вредные вещества взаимодействовали бы с достаточным для окисления количеством озона, а требуемый результат достигался бы в течение короткого промежутка времени и с уменьшенным потреблением озона. Так возникла идея гидродинамического способа, который заключался в том, чтобы главные процессы очистки сформировать в рабочей зоне аппарата, подвергнув рабочую среду в ней разнообразным интенсифицирующим физическим воздействиям.

Примером воплощения данной идеи послужила разработанная и введенная в действие в 1989 г. установка производительностью по воде 2000 м³/сутки для обработки озоном промышленных стоков на очистных сооружениях испытательной станции ракетных двигателей малой тяги НИИ машиностроения, очищающих воду от остатков высокотоксичного ракетного топлива, содержащихся в растворе в виде органических соединений.

Реализованная в ней технология [1] была запатентована (патент РФ № 2034799) и удостоена золотой медали на Всемирном салоне изобретений, научных исследований и промышленных инноваций «Брюссель-Эврика-96». Ее эффективность более чем в 100 раз превысила традиционные промышленные способы очистки. Это подтолкнуло распространить данную технологию на обработку питьевой воды и воды плавательных бассейнов от органических загрязнителей.

Нефтепродукты постоянно присутствуют в промышленных сточных водах (ПСВ) многих предприятий. Образованию устойчивой эмульсии "нефть в воде" способствует присутствие синтетических поверхностно-активных веществ (СПАВ). Одним из направлений и явилась разработка конструкции камеры-реактора для обезвреживания озоном ПСВ от большинства органических веществ, в том числе, эмульгированных нефтепродуктов и СПАВ.

Развитие гигиенической науки в части влияния хлорорганических соединений на живые организмы потребовало ограничения концентрации ряда веществ в бытовых сточных водах (БСВ), образующихся при обеззараживании последних (хлороформ, четыреххлористый углерод и т. п.). БСВ перенасыщены органикой, поэтому в случае их хлорирования избежать превышения ПДК по хлорорганическим соединениям практически не удастся. Новые подходы к проектированию оборудования позволяют сделать технологию озонирования БСВ эффективной и конкурентоспособной, по сравнению с хлорированием.

2. МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИЯ

Процесс обработки воды озоном представляет собой сложную физико-химическую систему взаимосвязанных процессов, находящихся во взаимодействии с окружающей средой.

Известны способы и устройства обезвреживания воды озоном с механическими аэрирующими устройствами различной конфигурации. Так как вредные вещества находятся в растворенном состоянии, а окисление производится газообразным веществом, то в зависимости от способа смешения при прочих равных условиях обезвреживание может происходить от нескольких минут до нескольких суток.

Более ста лет разрабатывается теоретический аспект традиционного барботажного способа озонирования воды. Он охватывает процессы, протекающие на разных уровнях: молекулярном, в малом объеме, в рабочих зонах аппаратов, где осуществляются физико-химические воздействия. Сущность рассматриваемой физико-химической системы раскрывается, как правило, при ее рассмотрении на макроуровне малого объема с уточнением микроуровня и последующим синтезом в объемах рабочих зон. Основными недостатками барботажного метода является продолжительность очистки и большой расход озона.

Химические реакции озона с органическими веществами, содержащимися в воде и определяющими ее органолептические свойства, протекают в диффузионной области после того, как газообразный озон «доставлен» к поверхности раздела фаз и через эту поверхность проникает в жидкую фазу.

Требования [2], [3] к рабочей зоне:

- Наличие развитой поверхности контакта газовой и жидкой фазы.
- На основную скорость потока накладывается пульсационная скорость макрообъемов (турбулентная пульсация).
- Образование тонких пленок жидкости в потоке должно быть устойчивым для обеспечения возможных прямых реакций озона с органическими веществами.
- Смешение жидкости и газа должно идти как в жидкой, так и в объеме газовой фазы.
- В рабочей зоне в поперечном направлении потока с определенной периодической частотой распространяются значительные макрообъемы вещества.
- В рабочей среде распространяются звуковые или ультразвуковые колебания.

В основу эксперимента была положена гидродинамическая теория течения водовоздушного потока в вакуумном эжекторе с противодавлением. Экспериментальный эжектор-смеситель изображен на рис. 1. Он имеет корпус 1, патрубки подвода обезвреживаемой воды 2 и озона 3, цилиндрический участок 4, диффузор 5, сопло 6 и

сопло-форсунку 7. Через патрубок 2 и сопло-форсунку 7 исходная вода поступает в камеру смешения эжектора (цилиндрический участок 4), где захватывается озон, подаваемый через патрубок 3.

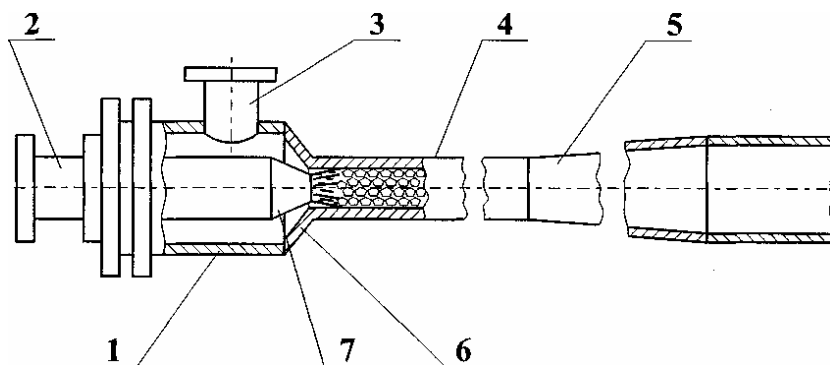


Рис. 1 1 - корпус, 2 - трубопровод подвода воды, 3 - трубопровод подвода озон-воздушной смеси, 4 - цилиндрический участок, 5 - диффузор, 6 - сопло, 7 - сопло-форсунка.

Эжектор выполняет роль смесителя. На цилиндрическом участке течение является сверхзвуковым. В диффузоре 5 статическое давление резко возрастает, и поток становится дозвуковым. При этом изменение давления происходит скачкообразно на очень короткой длине. За фронтом скачков уплотнения реализуется активная кавитация по всему объему. Было допущено, что оба фактора - образование двухфазной сверхзвуковой смеси и воздействие на нее скачков уплотнения - должны способствовать интенсификации процесса окисления в случае, когда воздух будет насыщен озоном. Указанные явления сопровождаются звуковыми и ультразвуковыми возмущениями. Жидкость в сверхзвуковой двухфазной смеси распределена в тонкой пленке. Доступ необходимого количества молекул озона к молекулам вредного вещества «незагроможден» молекулами жидкости. Времени пребывания смеси в цилиндрической части эжектора хватит для начала химических реакций, продолжающихся в реакторе, подстыкованном к эжектору-смесителю через тракт]-образного типа, и размещенном непосредственно под ним.

Дополнительное ударное воздействие реализуется при ударе газо-жидкостного потока о перпендикулярные стенки]-образного тракта, а противоток - на его вертикальном участке. Активный объем установки (эжектора-смесителя и реактора) выбран из условия времени пребывания газо-жидкостной смеси в контакте порядка трех минут.

На установке производительностью 2000 м³/сутки обезвреживались промышленно-сточные воды с продуктами разложения ракетного топлива. Наиболее трудноразрушаемой из его производных является молекула нитрозодиамиламина (НДМА). Этот процесс

определяет длительность цикла.

Обезвреживание НДМА при его концентрации в 5 ПДК (предельнодопустимой концентрации) осуществилось за 10 минут. При одинаковых исходных условиях, по сравнению с барботажным методом, расход озона снизился на два порядка.

Работы по обесцвечиванию поверхностной воды с ее забором из местного поверхностного источника проводилась на установках производительностью как 2000 м³/сутки, так и 10000 м³/сутки. Результаты исследований представлены в таблице 1. Как видно, цветность понижалась не менее чем на 10° при исходной величине в 40°. Оптимальный результат получен при $\alpha = 0,35 \dots 0,65$ (отношение объема газа к общему объему газа и жидкости). При этом время обработки не превысило трех минут. С точки зрения кинетики, длительность обесцвечивания воды более трех минут не только экономически невыгодна, но и начинает приводить к повышению цветности обработанной воды.

Таблица 1. Цветность очищаемой воды

α	Цветность исходной воды	Цветность обработанной воды	Время обработки, мин.	Режим течения
0,2	40°	36°	3	Эжекция
0,35	40°	30°	3	Сверхзвуковое течение
0,55	40°	25°	3	Сверхзвуковое течение
0,65	40°	24°	3	Сверхзвуковое течение
0,7	40°	34°	3	Снарядное течение

Во всем мире принята следующая комплектация систем озонирования: контактная камера, компрессионное оборудование, агрегаты очистки и осушки воздуха, озонатор и деструктор озона. Комплектуемое оборудование располагают или в отдельных помещениях или в одном, но очень большом.

При малой производительности (до 100 м³/сутки) комплектующие размещают на одной раме размером 2×3 м и более, но для очень большой группы индивидуальных потребителей это создает значительные эксплуатационные неудобства, т. к. существующие озонаторы довольно громоздки и представляют собой практически самостоятельные установки.

В многолетней практике по разработке и производству космической техники НИИ машиностроения всегда преследовал цели миниатюризации, энергосбережения, надежности и удобства в эксплуатации, поэтому была разработана МИНИ-станция производительностью 25 ... 100 м³/сутки с автоматической системой управления, которая имеет законченный технологический процесс обезвреживания и обеззараживания воды,

включая подготовку воздуха, получение озона, деструкцию остаточного озона.

Часть озона не участвует в химических реакциях. В отработанной газовой смеси концентрация остаточного озона на два порядка превышает предельно допустимую величину, которая составляет для персонала, обслуживающего технологические установки, не более $0,0001 \text{ г/м}^3$.

Поскольку озон относится к отравляющим веществам раздражающего действия, в технологической цепочке очистки воды с его применением всегда предусматриваются устройства по нейтрализации остаточного озона, гарантирующие соблюдение предельно допустимых его концентраций в воздухе.

Используемые на практике методы деструкции озона имеют в своей основе разработанный несколько десятков лет назад способ термического разложения O_3 при нагреве газов до $300 \text{ }^\circ\text{C}$. Установки, их применяющие, являются взрывоопасными вследствие возможных нежелательных химических реакций озона с азотом и другими газами в условиях повышенных температур. Кроме того, морально устаревшее и энергозатратное оборудование снижает конкурентоспособность технологии в целом, а предусмотренная замена в процессе эксплуатации гранулированного катализатора, который отсутствует в большинстве регионах сбыта, сдерживает рынок.

"Узкие" места были очевидны. Это способ нейтрализации отработанной газовой смеси и большие габаритные размеры озонаторов. Поэтому в процессе создания МИНИ-станции и устранения "узких" мест вначале пришлось обратиться к фундаментальным наработкам отечественных и зарубежных ученых. Выяснилось, что традиционные способы деструкции и синтеза озона неприемлемы для совершенствования рассматриваемого класса устройств. Тем не менее, поставленные задачи были решены посредством оригинальных конструкторско-технологических решений, основанных на плазмохимическом методе.

Преимущество плазмохимической нейтрализации газовой смеси перед традиционным термохимическим методом состоит в отсутствии катализатора и использовании только электроэнергии. При этом затраты последней сокращаются не менее чем в два раза.

Преимущество плазмохимического синтеза озона перед традиционным синтезом озона на основе барьерного электрического разряда заключается в снижении энергопотребления и значительном уменьшении габаритов устройств. Ожидалось, что и плазмохимический высоковольтный высокочастотный озонатор (ПВВОз) будет иметь те же преимущества перед традиционными озонаторами с синтезом озона путем барьерного электрического разряда. Указанная концепция нашла подтверждение в ходе дальнейших работ.

3. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Результаты исследований, описанных выше, используются при создании унифицированного оборудования по озонированию воды в питьевых целях для объектов муниципальной и государственной собственности в виде параметрического ряда установок производительностью 100, 1000, 2000 и 10000 м³/сутки (патент РФ № 44069 на промышленный образец).

3.1. Контактная камера

Контактная камера установки по обработке воды озоном производительностью 10000 м³/сутки (рис. 2) представляет собой конструкцию, состоящую из отдельных агрегатов в полной заводской готовности, выполняющих заданные функции [4]:

- реактор для обработки воды озоном имеет два горизонтальных резервуара в форме параллелепипеда со скругленными ребрами, установленных на невысоких опорах; первый резервуар с помощью коротких патрубков с фланцами присоединен к резервуару идентичного внешнего вида, но без эжектора-смесителя;
- на первом горизонтальном резервуаре сверху, параллельно его поверхности, установлен эжектор-смеситель, оснащенный цилиндрической трубой с удлиненным коническим раструбом.



Рис. 2 Контактная камера производительностью по воде 10000 м³/сут.

Технические характеристики:

- | | | | |
|--|-------------------------|------------------------------------|----------------|
| • пропускная способность, м ³ /сут. | 1000 | 2000 | 10 000; |
| • габаритные размеры, м | 2,6×1,2×2,5 | 5,2×1,2×2,5 | 11,8×1,2×2,75; |
| • вес (без жидкости), кг | 950 | 2200 | 4100 |
| • степень очистки | | до 0,05 мг нефтепродуктов на литр; | |
| • способ регулирования подачи озона: | ручной, автоматический. | | |

Представленные контактные камеры обладают следующими преимуществами, по

сравнению с аналогами, выпускаемыми в Российской Федерации и за рубежом:

- модульность, позволяющая изготавливать, собирать и настраивать оборудование в заводских условиях с последующим монтажом на месте эксплуатации;
- малогабаритность и компактность: площади, занимаемые озонатором, контактной камерой и нейтрализатором остаточного озона в установках с наибольшей производительностью (10000 м³/сутки) не превышают 25м²;
- возможность использования для размещения оборудования уже имеющиеся здания и сооружения со стандартной высотой потолков благодаря его горизонтальной компоновке (применяемые в обычной практике контактные камеры имеют высоту до пяти метров);
- отсутствие остаточного озона в обработанной воде;
- уменьшение затрат озона в 20 ... 100 раз в зависимости от природы загрязнений за счет интенсификации процесса обработки воды; обеспечивается также снижение потребного времени очистки.

3.2. "МИНИ станция"

НИИмаш приступил к промышленному изготовлению МИНИ-станции (патент РФ № 51136 на промышленный образец) производительностью 25...100 м³/сутки (рис. 3).



Согласно выбранному техническому решению конструкция установки предусматривает очистку ПСВ в диапазоне расходов 25...100 м³/сутки. Настройка на тот или иной расход (25, 50, 100 м³/сутки) осуществляется подбором различных типов эжекторов-смесителей и генераторов озона.

Технические характеристики:

- | | |
|----------------------------------|---------------|
| • Расход воды, м ³ /ч | 1,0 ...5,0 |
| • Габариты, мм | 1200×700×1600 |
| • Напряжение питания, В | 220 |
| • Потребляемая мощность, кВт | 3,0 |
| • Масса, кг | 300...500 |

Рис. 3 МИНИ-станция.

МИНИ-станция:

- обеспечивает очистку промышленных стоков от эмульгированных нефтепродуктов, синтетических поверхностно-активных веществ и других органических загрязнений до их предельно-допустимых концентраций для рыбохозяйственных водоемов;
- уменьшает цветность, содержание железа, марганца и производит обеззараживание питьевой воды до требований СанПиН 2.1.4.559-96;
- дезинфицирует воду в плавательных бассейнах объемом 25...100 м³ до требований СанПиН 2.1.2.568-96;
- обеззараживает бытовые сточные воды без образования хлорпроизводных соединений (четырёххлористый углерод, хлороформ, и т.п.); снижает их цветность, окисляет фенолы, нитриты и другие вредные вещества.

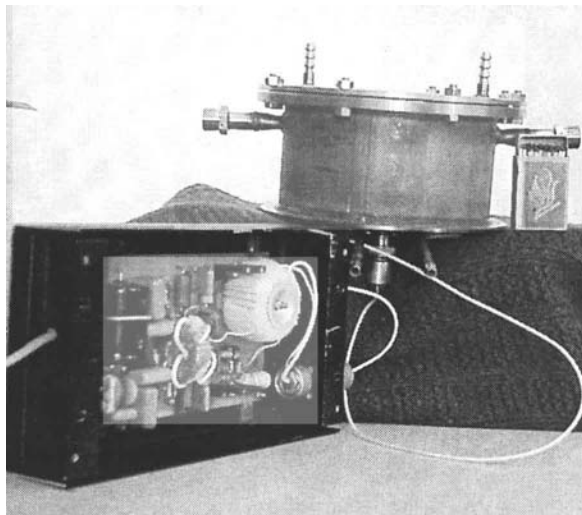
Любой озонатор состоит из двух основных частей: генератора озона и источника электропитания.

Традиционные генераторы для синтеза озона из кислорода используют барьерный электрический разряд, возникающий между двумя электродами, разделенными диэлектриком. В зависимости от материала и конструкции электродов и диэлектрика разрабатывается источник электропитания. Этот источник является преобразователем сетевого электроснабжения величиной 220 В или 380 В и частотой 50 Гц в напряжение 5000...20000 В и частоту 600...10000 Гц.

Механизм образования озона у современных промышленных озонаторов (использующих барьерный электрический разряд) заключается в возбуждении молекулы кислорода электроном с энергией более 7 электрон-вольт. Только 20 % энергии барьерного разряда расходуется на образование таких электронов, а остальная энергия идет на нагрев газа, что неэкономично и вредно.

Озонатор, включенный в состав МИНИ-станции, будучи самостоятельным агрегатом, применяет низкотемпературную плазму. В качестве источника электропитания служил экспериментальный высоковольтный преобразователь напряжения.

Плазмохимический высоковольтный высокочастотный озонатор (рис. 4) на базе разрядника с прямоугольными пазами подвергся многократным испытаниям при непрерывной работе до 12 часов. По результатам испытаний проведены доработки конструкции. В конечном счете испытания показали удовлетворительные результаты и озонатор (патент РФ № 2233793) рекомендован для включения в комплект МИНИ-станции.



Технические характеристики:

- Производительность по озону, г/ч 10...15
- Расход воздуха, м³/ч 0,6...1,0
- Расход воды охлаждения, л/ч 30...50
- Электропитание:
 - напряжение, В..... 220
 - частота, Гц..... 50

Рис. 4 Генератор озона и блок электропитания

Плазмохимический высоковольтный высокочастотный озонатор имеет следующие преимущества перед аналогами:

Тип озонатора	Синтез озона из воздуха, г/ч	Габаритный объем, м ³	Вес, кг	Потребление электроэнергии, кВт
Плазмохимический высоковольтный высокочастотный озонатор	10...15	0,006	≤3	≤0,4
Традиционный озонатор на основе барьерного электрического разряда	10...15	0,6	≥30	≤0,6

Согласно принятой концепции в НИИмаш был разработан (патент РФ № 2234971) и изготовлен плазмохимический деструктор газов, в том числе и озона, где на деструкцию "работает" холодная плазма, имеющая температуру от 5000 до 10000 °С.

Нейтрализатор остаточного озона, также входящий в комплект МИНИ-станции, рассчитан на максимальный расход озона при любом варианте ее комплектации.

Все агрегаты МИНИ-станции монтируются на общей раме. В представленной на рисунке 3 компоновке озонатор, нейтрализатор остаточного озона и эжектор размещены в верхней части МИНИ-станции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Исаков В.Д. // - М. : НТЦ "Информатика", Эврика № 7, 1996, 20 – 21
2. V.D. Isakov, Ye. V. Kutueva // - М: Eswatech – 98, Regional Conference on Ozone, 301 – 315
3. Исаков В.Д., Кутуева Е.В. // - Екатеринбург: УрОРАН, 1999, "Урал: Наука, Экология", 346 – 358
4. НИИ машиностроения // - М. : ГУП "ВИМИ", 2000, Новые технологии и оборудование в водоснабжении и водоотведении/ Сборник материалов Госстрой России, НИИКВОВ/, 21 - 26