

А. И. Смородин, Е. И. Борзенко,
Д. А. Тарабакин, А. В. Буторина,
А. В. Зайцев, А. А. Тарабакина

СОЗДАНИЕ ГЕНЕРАТОРА ОЗОНА С ПОВЕРХНОСТНЫМ РАЗРЯДОМ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ СОЦИАЛЬНО ЗНАЧИМЫХ ОБЪЕКТОВ

Разработана конструкция эффективного генератора озона, в котором электрод с потенциалом земли имеет стекломалевоый барьер, а высоковольтным электродом является плотно надетая на него спираль из проволоки. Установлено, что вплоть до концентрации озона в кислороде, равной 40... 50 г/м³, генератор озона с поверхностным разрядом имеет одинаковые технические характеристики с генератором озона на барьерном разряде.

E-mail: Smorodin38@rambler.ru

Ключевые слова: озон, электрод, генератор озона, поверхностный разряд, барьерный разряд, социально значимые объекты.

Озон является идеальным экологически чистым и мощным окислителем, способным вступать в химические реакции при нормальном давлении и температуре окружающей среды. Озон по окислительной способности занимает второе место, уступая только фтору и значительно превосходя другие широко применяемые окислители. Окислительный потенциал озона равен 2,07 эВ, а хлора — 1,30 эВ. Озон быстрее других окислителей вступает в реакции (и в меньших концентрациях).

В отличие от других окислителей озон в процессе реакции не образует никаких продуктов, которые загрязняли бы окисляемое вещество. Он или полностью расходуется на окисление, или же используется частично. Продуктом восстановления озона является кислород. Это обстоятельство в ряде случаев оказывается решающим при выборе того или иного окислителя, так как часто задача отделения продуктов восстановления окислителя от обрабатываемого вещества представляет значительные трудности, а иногда и вовсе практически невыполнима. Таким образом, применение озона способствует решению проблемы обеспечения безотходных экологически чистых технологий и производств.

Основные технологические процессы, в которых применение озона технически и экономически оправдано, следующие [1]:

- очистка (обеззараживание) питьевой воды;
- очистка промышленных стоков (в металлургии, нефтепереработке, на целлюлозно-бумажных комбинатах и др.);



Рис. 1. Применение озона для обеспечения условий жизнедеятельности и защиты социально значимых объектов

- энергоэффективное хранение пищевых продуктов в объектах холодильной техники;
- озono-кислородная отбелка целлюлозы;
- обработка жидких радиоактивных отходов, переработка изношенных автопокрышек в резиновую крошку, переработка тяжелых нефтяных фракций и т.д.

Одной из перспективных областей применения озонных технологий является применение озона для обеспечения жизнедеятельности социально значимых объектов (рис. 1). В настоящее время озон широко используется в таких социально значимых объектах, как объекты хранения пищевых продуктов, объекты массового скопления людей и т.д. При низкотемпературном хранении пищевых продуктов применение озона позволяет существенно снизить потери продуктов за счет замедления метаболических процессов и подавления развития вредной микрофлоры. Начиная с 1975 г. на хладокомбинатах Росмясомолторга начали применять озон при хранении плодоовощной продукции и продукции животного происхождения, что позволило сократить потери от микробиологической порчи в 1,5–2 раза по сравнению с традиционными рекомендуемыми режимами холодильного хранения.

Анализ выполненных исследований в области создания эффективных озонаторных установок показал, что к настоящему времени не определена приоритетная конструкция генератора озона, которая может преимущественно применяться в устройствах, обеспечивающих условия жизнедеятельности и защиты в социально значимых объектах.

Затраты на производство озона составляют наиболее существенную часть в общих затратах при реализации экологически лояльных

производств с применением озона, поэтому создание генераторов озона, обеспечивающих высокую эффективность синтеза озона при меньших затратах на их производство, является актуальной задачей.

В 1980-е гг. появились данные, показывающие возможность использования в электротехнологии разряда по поверхности твердого диэлектрика. В настоящее время известны примеры применения поверхностного разряда в генераторах озона, устройствах для зарядки аэрозолей и диспергированных материалов, системах накачки газовых лазеров. В работах [2, 3] показано, что возможности поверхностного разряда в части получения озона сопоставимы с возможностями традиционно используемых видов разряда, а в ряде случаев и превосходят их.

Исследования были направлены на создание эффективной и простой конструкции генератора озона, которая бы включала в себя достижения генератора озона с барьерным разрядом [1], но была бы более простой в конструктивном исполнении. С учетом этого была разработана трубчатая конструкция генератора озона с поверхностным разрядом. На рис. 2 представлена принципиальная схема разработанного генератора озона с поверхностным разрядом и развитие разряда на поверхности твердого диэлектрика.

В разработанной конструкции (рис. 3) наружный электрод генератора озона трубчатой конструкции с барьерным разрядом был заменен на проволочную спираль, которая плотно надевалась на внешнюю поверхность стеклоэмалевого слоя электрода диаметром 50 мм и активной длиной 180 мм, охлаждаемого проточной водой и находящегося под потенциалом земли. Спираль изготовлялась из проволоки диаметром 2 мм, а шаг спирали равнялся 6 мм. Внутренний электрод с надетой на него спиралью помещался в трубу из винипласта с внутренним диаметром 60 мм. Через зазор между наружной трубой и электродом, равный 5 мм, пропускался кислород. Высокое напряжение подавалось на проволочную спираль через специальный ввод.

Отметим, что в литературе отсутствует информация о такой конструкции генератора озона с поверхностным разрядом и, следовательно, отсутствуют экспериментальные данные. Поскольку отправной

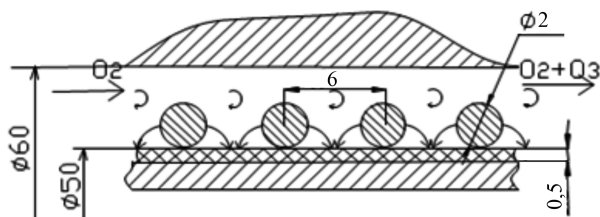


Рис. 2. Схема генератора озона с поверхностным разрядом



Рис. 3. Генератор озона с поверхностным разрядом (вверху электрод в сборе, внизу корпус из винилпластовой трубы с устройством для подвода высокого напряжения к спирали)

точкой при создании экспериментального образца являлась отработанная и эффективная конструкция генератора озона с барьерным разрядом, в которой реализовано и двустороннее эмалирование, и двустороннее охлаждение, то ожидалось получение оптимистических характеристик (концентрация озона, производительность по озону, выход озона с единицы поверхности).

На специально разработанном стенде [4] были проведены экспериментальные исследования трубчатых генераторов озона с барьерным и поверхностным разрядами. В качестве рабочего газа использовался кислород, получаемый на установке короткоциклового адсорбции. Геометрические характеристики исследуемых генераторов озона были практически одинаковыми. Были получены зависимости концентрации озона от объемной плотности мощности для каждой конструкции (рис. 4).

Сопоставление результатов исследования, показало, что разработанная конструкция генератора озона с поверхностным разрядом до концентрации озона равной $40 \dots 50 \text{ г/м}^3$, имеет такую же эффективность, как и генераторы озона с барьерным разрядом.

Для исследования влияния температуры охлаждающей жидкости на концентрацию озона в озono-кислородной смеси была создана экспериментальная установка [4]. Эксперименты проведены при постоянном расходе кислорода $0,3 \text{ м}^3/\text{ч}$ и частоте питающего напряжения 15 кГц . Постоянство температуры охлаждающей воды обеспечивалось работой холодильной машины мощностью 700 Вт , заполненной хлад-агентом R22. Перед проведением экспериментов вода в накопительном баке охлаждалась до температур: $8, 12, 16, 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Емкости накопительного бака, равной 60 л , хватало на проведение одной серии экспериментов. Жидкость из накопительного бака в генератор озона

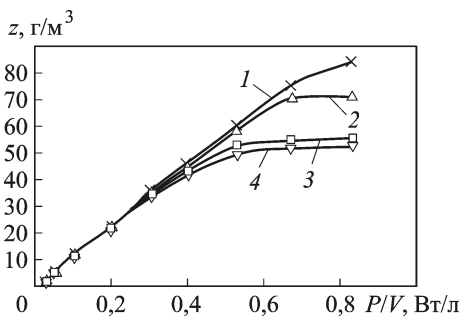


Рис. 4. Результаты экспериментальных исследований генераторов озона, с барьерным разрядом, двусторонним (1) и односторонним (2) охлаждением, с поверхностным разрядом (3, 4) (проволока диаметром 2, 0,35 мм)

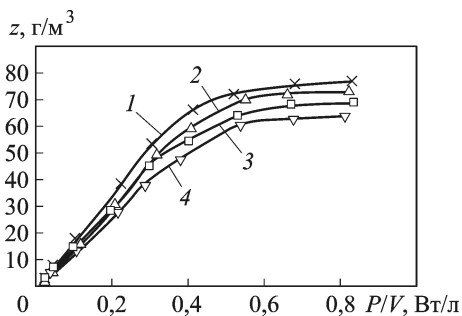


Рис. 5. Концентрация озона в зависимости от плотности мощности при различной температуре охлаждающей воды 8 °С (1), 12 °С (2), 16 °С (3) и 20 °С (4)

подавалась циркуляционным насосом. Температура воды поддерживалась автоматически.

На рис. 5 приведены экспериментальные результаты исследования, подтверждающие влияние температуры охлаждающей воды на концентрацию озона, которая увеличивается с ростом параметра объемной плотности мощности (P/V).

По форме кривых можно выполнить аппроксимацию этих кривых уравнением второго порядка, в результате получим

$$f(x) = c_0 + c_1x + c_2x^2, \quad (1)$$

где c_0 , c_1 , c_2 — коэффициенты, зависящие от температуры (таблица)

$T, ^\circ\text{C}$	c_0	c_1	c_2
8	-3,7828	180,15	-125,97
12	-4,0754	164,65	-110,41
16	-3,2209	154,12	-104,25
20	-3,2533	139,33	-90,678

Влияние температуры можно учесть с достаточной точностью при аппроксимации коэффициентов уравнения (1) линейной функцией:

$$c_0 = -4,4382 + 0,0611T;$$

$$c_1 = 206,11 - 3,3247T;$$

$$c_2 = -147,04 + 2,8009T.$$

Таким образом, окончательное выражение для вычисления концентрации озона следующее:

$$z = -4,4382 + 0,0611T + (206,11 - 3,3247T) \frac{P}{V} + (-147,04 + 2,8009T) \left(\frac{P}{V} \right)^2. \quad (2)$$

Сравнение вычислений по приведенной формуле с экспериментальными данными показывает, что погрешность, составляющая при высоких значениях не более 3 %, увеличивается до 15 % при стремлении к нулю объемной плотности мощности.

Для описания процесса теплообмена в генераторе озона с поверхностным разрядом были рассмотрены дифференциальные уравнения движения, неразрывности и энергии [5]. Был принят ряд допущений, вытекающих из анализа конкретной конструкции:

- поперечные (радиальные) составляющие скорости потока u, v отсутствуют, остается только продольное движение (теплоперенос при этом осуществляется как в продольном, так и поперечном направлениях);

- объемные силы отсутствуют; в дальнейшем это допущение может быть пересмотрено;

- теплофизические свойства не зависят от температуры (принимая на этапе математической формулировки; в компьютерных расчетах зависимость от температуры может быть учтена в итерационном процессе поиска решения);

- давление постоянно (диаметр соизмерим с длиной трубки — трубка короткая);

- жидкость (газ) идеальна.

При такой постановке задачи уравнения неразрывности и движения можно рассматривать независимо от уравнения энергии.

Поскольку уравнения гидродинамики для течения теплоносителя и хладоносителя идентичны, далее индексы “к” для кислорода и “в” для воды по возможности опускаем.

Уравнение движения (при отсутствии радиальной составляющей скорости) запишем так

$$w \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{4}{3} \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}. \quad (3)$$

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (4)$$

Уравнения (3) и (4) дают после интегрирования распределение скорости вдоль трубы. Граничное условие на входе в трубу $w|_{z=0} = w_0$. На выходе из трубы ($z = L$) применяем условие неразрывности $G_L = G_0$,

где $G_0 = \rho_0 w_0 F$ и $G_L = \rho_L w_L F$ – массовые расходы на входе и выходе, кг/с. Получаем второе граничное условие:

$$w|_{z=L} = w_L = \frac{\rho_0 w_0}{\rho_L}. \quad (5)$$

В результате интегрирования уравнений (3) и (4) получаем распределение скорости потока вдоль трубы

$$w = w_0 \left(\frac{z}{L} \frac{\rho_0 - \rho_L}{\rho_L} + 1 \right). \quad (6)$$

Уравнение энергии имеет вид

$$c_p \rho w \frac{\partial T}{\partial z} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_v. \quad (7)$$

Подобное уравнение может быть записано для каждого канала (внутренняя труба, межтрубное пространство)

$$c_p^k \rho^k w^k \frac{\partial T^k}{\partial z} = \lambda^k \left(\frac{\partial^2 T^k}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T^k}{\partial z^2} \right) + q_v; \quad (8)$$

$$c_p^B \rho^B w^B \frac{\partial T^B}{\partial z} = \lambda^B \left(\frac{\partial^2 T^B}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T^B}{\partial z^2} \right). \quad (9)$$

Аналитическое решение системы (6), (7) в случае зависимости c_p , ρ , λ от искомой температуры невозможно. Следует использовать численные методы.

Численное решение поставленной задачи проводилось применительно к условиям экспериментальных исследований процесса синтеза озона в генераторе с поверхностным разрядом. Расчеты выполнены для пяти значений электрической мощности и четырех значений температуры охлаждающей воды (см. рис. 5). В результате решения выявили, что среднемассовая температура кислородно-озонной смеси в разрядном промежутке зависит от температуры охлаждающей воды.

Расчетные исследования показали, что использование этиленгликоля в качестве охлаждающей жидкости с температурой 258 К при одинаковой электрической мощности, равной 150 Вт, позволяет снизить температуру в разрядном промежутке на 17 °С. Снижение температуры озono-кислородной смеси в разрядном промежутке приводит к уменьшению численного значения константы скорости разложения озона [6], а следовательно, при одном и том же значении вложенной в разряд мощности концентрация озона возрастает, а удельные энергетические затраты на получение озона сокращаются.

Таким образом, разработанная конструкция генератора озона с поверхностным разрядом, отвечает современным требованиям по энергоэффективности, простоте и низкой стоимости при изготовлении и надежности при эксплуатации в социально значимых объектах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. С м о р о д и н А. И., К а р я г и н И. В. Современное состояние и перспективы развития озонаторостроения // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2007. – № 8. – С. 3–8.
2. К о з л о в М. В. Исследование поверхностного разряда с целью повышения эффективности работы электротехнологических установок: Дисс. . . канд. техн. наук. – М., 1994. – 221 с.
3. Л ы с о в Н. Ю., П а ш и н М. М. Энергетические характеристики синтеза озона в поверхностном и объемном барьерных разрядах // Электричество. – 2011. – № 12. – С. 43–46.
4. С м о р о д и н А. И., Т а р а б а к и н Д. А., Б о р з е н к о Е. И. Создание и исследование генератора озона для обеспечения условий жизнедеятельности защиты социально-значимых объектов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2012. – № 3. – С. 37–39.
5. Б о р з е н к о Е. И. Статика и динамика элементов криогенных систем. – Ленинград.: Изд-во ЛГУ, 1988. – 212 с.
6. Ф и л и п п о в Ю. В., В о б л и к о в а В. А., П а н т е л е е в В. И. Электро-синтез озона. – М.: Изд-во МГУ им. М.В. Ломоносова, 1987. – 237 с.

Статья поступила в редакцию 27.06.2012