

СТРУКТУРА БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА И СИНТЕЗ ОЗОНА

Пичугин Ю.П.

Чувашский государственный университет, г. Чебоксары

Основная проблема ресурса генераторов озона - выход из строя озонаторных камер. Как правило, первым из строя выходит диэлектрический барьер, наиболее уязвимый элемент озонаторной камеры. Для резкого увеличения срока службы предлагаются различные варианты. Среди них наиболее радикальным является решение: вообще обойтись без барьера.

В патентной литературе описан такой безбарьерный озонатор. Из основных элементов озонатор включает в себя секционированный вдоль и поперек потока газа электрод и общий электрод, последовательно подключенную к каждому элементу секционированного электрода балластную емкостную нагрузку. С целью создания высокоресурсных озонаторов был проведен ряд экспериментов с безбарьерным озонатором по определению его производительности. Во всех без исключения случаях была зафиксирована очень низкая концентрация озона не более $0,5 \text{ г/м}^3$. В то же время при внесении диэлектрического барьера в зону разряда синтез озона резко активизировался, и концентрация его повысилась до 6 г/м^3 . Такие эксперименты показывают, что основным производителем озона является расширенная, прилегающая к барьеру, часть канала микроразряда.

Более убедительным и подтверждающим вышеприведенные результаты является эксперимент на специальной установке. Экспериментальная установка состоит из двух камер. Камеры герметичные и разделены друг от друга перегородкой, в которой расположен секционированный вдоль и поперек потока газа разрядный электрод. Рабочий газ, содержащий кислород, поступает в каждую камеру отдельно. Озоносодержащий газ отводится из каждой камеры также отдельно. Причем в одной камере есть барьер, а в другой нет. Эксперименты показали, что в камере, где происходит барьерный разряд, производительность по озону значительно выше, чем в камере, где барьер отсутствует.

СТРУКТУРА БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА И СИНТЕЗ ОЗОНА

Ю.П. Пичугин

Чувашский государственный университет, г. Чебоксары

С помощью экспериментальных моделей установлено участие разных частей микроканала барьерного разряда в синтезе озона.

При реализации и интенсификации различных процессов и явлений озонные технологии апробированы во многих отраслях производства, как за рубежом, так и в Российской Федерации. Однако вплоть до настоящего времени мало, а в отдельных случаях неэффективно используется озонирование. Главные причины: низкий ресурс, ненадежность и сложность в эксплуатации озонаторных установок. Это относится как к отечественному, так и к зарубежному оборудованию.

Основная проблема ресурса - выход из строя озонаторных камер, так как озон является сильнейшим окислителем, то в озонаторной камере происходит интенсивный износ ее элементов. Как правило, первым из строя выходит диэлектрический барьер, наиболее уязвимый элемент озонаторной камеры. Кроме воздействия озона, барьер испытывает разрушения, обусловленные как микроразрядами, так и непосредственно электрическим полем. Совместное воздействие этих факторов приводит к выходу из строя диэлектрического барьера, в итоге к короткому замыканию между электродами озонаторной камеры.

В [1] более глубоко рассмотрены причины разрушения барьера и предложены устройства, приводящие к резкому увеличению срока службы озонаторной камеры. Это генераторы озона на основе барьерного разряда с вращающимся барьером. Однако, реализация подобных устройств связана с определенными трудностями из-за вращения барьера, например, герметизация озонаторных камер. Другое радикальное решение: вообще обойтись без барьера. В патентной литературе [2] описан безбарьерный электрический озонатор.

На рис.1 схематично приведено это устройство. Из основных элементов озонатор включает в себя секционированный вдоль и поперек потока газа электрод 6 и общий электрод 1, последовательно подключенную к каждому элементу секционированного электрода балластную емкостную нагрузку 10.

С целью создания высокоресурсных озонаторов был проведен ряд экспериментов с безбарьерным озонатором по определению его производительности.

В процессе эксперимента варьировались значения емкости балластной нагрузки от $C=0,5$ пФ до $C=2$ пФ, что примерно должно соответствовать барьерной емкости отдельного микроразряда в барьерном озонаторе. При этом также изменялись как высота газоразрядного зазора от 1 до 3 мм, так и число секций секционированного электрода от 60 до 300 штук.

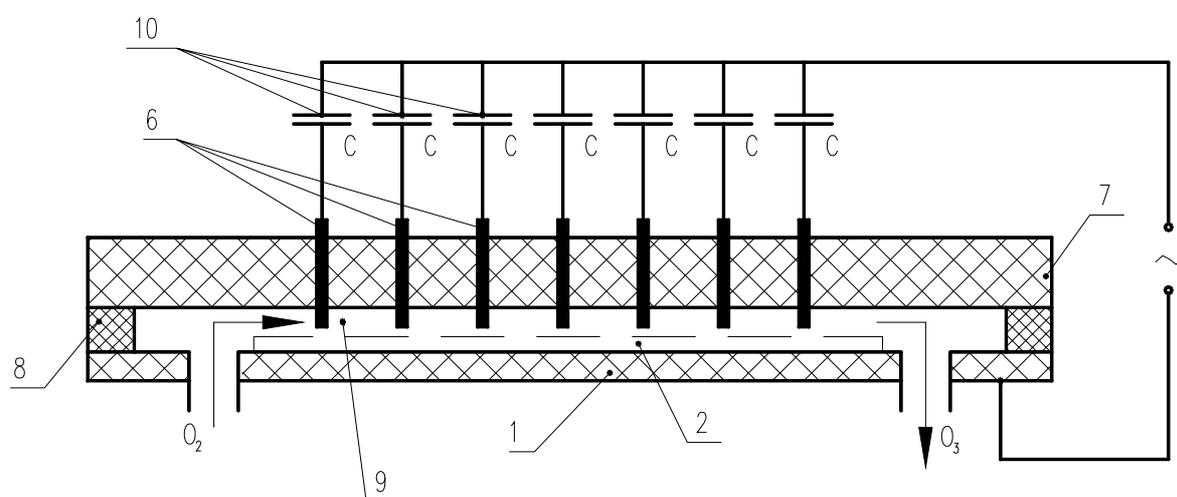


Рис.1. Электромонтажная схема безбарьерного озонатора

1 - металлический электрод; 2 - зона возможного расположения диэлектрического барьера; 6 - секционированный электрод; 7 - стенка из оргстекла; 8 - вкладыши; 9 - разрядный зазор; 10 - балластная нагрузка

При использовании в качестве озонируемого газа неосушенного воздуха во всех без исключения случаях была зафиксирована очень низкая концентрация озона не более $0,5 \text{ г/м}^3$. Такие показания лимитированы чувствительностью озонатора. В то же время при внесении диэлектрического барьера в зону 2 (рис.1) синтез озона резко активизировался и концентрация его повысилась вплоть до 6 г/м^3 [5]. Эксперименты с осушенным воздухом дали следующие результаты: концентрация озона $1,5 \text{ г/м}^3$ при отсутствии и 15 г/м^3 при наличии барьера. За счет осушки воздуха эффективность синтеза озона активизировалась в обоих случаях, при сохранении барьерного эффекта.

Для объяснения таких результатов необходимо более подробно рассмотреть структуру барьерного разряда.

Барьерный разряд возникает между двумя диэлектриками или диэлектриком и металлом. Из-за наличия диэлектрика питание осуществляется переменным током. Согласно [3] электрический пробой такого газового промежутка при приложении высокого напряжения происходит в виде серий микроразрядов. Длительность одной серии равна десятым долям микросекунды ($0,1 \div 0,2 \mu\text{с}$); длительность отдельного микроразряда ($10 \div 30$) нс, т.е. составляет десятки наносекунд. Время между отдельными сериями зависит от напряжения и длины газового промежутка и примерно на три порядка больше длительности отдельной серии. Отдельные каналы не закреплены в определенных точках, а распределяются случайно (стохастически).

Из приведенной структуры барьерного разряда ясно, что источником озона в барьерном разряде являются каналы микроразрядов. В связи с этим встает вопрос: весь ли канал микроразряда является источником озона или какая часть канала является наиболее производительной по озону? В литературных источниках приводятся теоретические соображения, которые не дают окончательных выводов. Данный вопрос очень насущный. Очевидно, что точное представление о производительности различных частей канала микроразряда должно повлиять как на способы и устройства по производству озона, так и на режимы их работы.

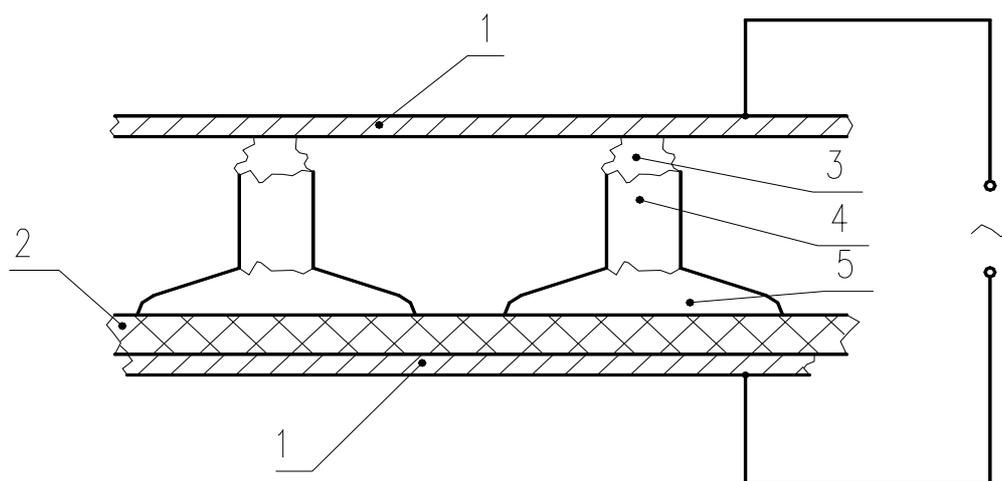


Рис.2. Геометрия канала микроразряда

3 - приэлектродная часть канала металлического электрода 1;

4 - столб канала; 5 - приэлектродная часть канала диэлектрического барьера 2.

Как видно из рис.2 канал микрозаряда состоит из трех основных частей: столб канала (4) и две приэлектродные части: (3), прилегающие к металлическому электроду (1) и часть (5), прилегающая к диэлектрическому барьеру (2). Диаметр приэлектродной части (5) в $(2\div 3)$ раза больше диаметра других частей канала, а высота ее порядка $0,1\div 0,2$ мм. Можно предположить, что расширенная часть (5) канала микрозаряда появляется в результате развития скользящего разряда по поверхности диэлектрического барьера. Столб канала (4) играет роль токопровода, с помощью которого подводится потенциал к диэлектрическому барьеру, вызывающий скользящий разряд. Типичные диаметры частей (3) и (4) канала микрозаряда порядка 1 мм, а расширенной части 3 мм, что хорошо согласуется с результатами теоретических исследований, изложенными в [3] рис.21.

Если диаметры частей канала сильно отличаются друг от друга, то плотности тока j различаются еще сильнее. А выделение тепла пропорционально j^2 . Таким образом, температура разных частей канала будет различной. Чем шире часть канала, тем меньше ее температура, что подтверждается результатами теоретических расчетов, изложенными в [4] рис.25. Производительность озонаторных установок есть результат одновременных процессов синтеза и разложения озона в озонаторных камерах. Чем выше температура, тем интенсивнее распад озона. Таким образом, различные части канала микрозаряда, отличающиеся по температуре, должны отличаться и по производительности озона.

Такие предположения подтверждаются и выше приведенными экспериментальными результатами по безбарьерному озонатору рис.1. Все они показывают, что основным производителем озона является расширенная, прилегающая к барьеру, часть канала микрозаряда. Однако, в данных опытах полной аналогии разрядов при наличии барьера и без него добиться практически невозможно. Более убедительным является эксперимент на модели, электромонтажная схема которой представлена на рис.3.

Экспериментальная модель состоит из двух разрядных камер. Камеры герметичные и разделены друг от друга перегородкой (7), выполненной из оргстекла. В перегородке расположен секционированный вдоль и поперек потоков газа электрод (6). Расстояние между секциями равно 6 мм, что соответствует среднестатистическому расстоянию между каналами микрозарядов классического озонатора. Секция представляет собой тонкий цилиндрический проводник диаметром 1,5 мм. С внешней стороны верхняя камера ограничена только металлическим электродом (1), а нижняя камера электродом (1) и диэлектрическим барьером (2). Рабочий газ, содержащий кислород, поступает в каждую камеру отдельно. Озонсодержащий газ отводится из каждой камеры тоже отдельно.

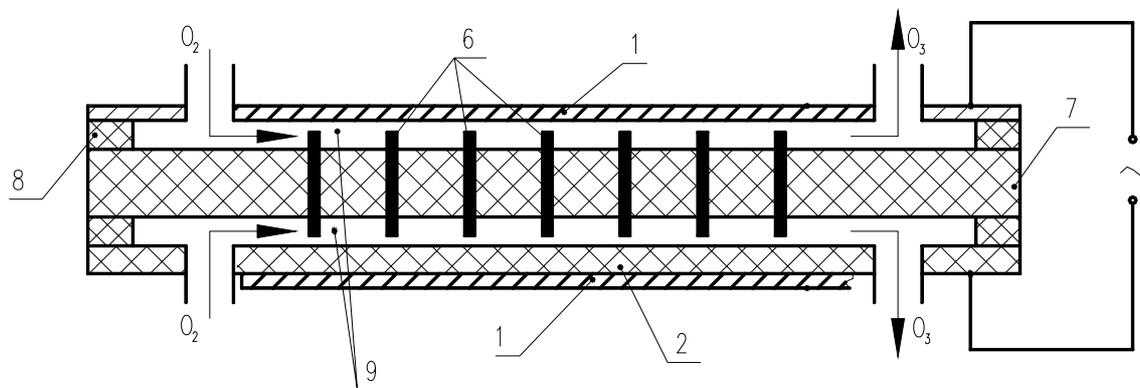


Рис.3. Электромонтажная схема экспериментальной модели

- 1 - металлические электроды; 2 - диэлектрический барьер; 6 - секционированный электрод; 7 - перегородка из оргстекла; 8 - вкладыши;
9 - разрядные зазоры

При подаче высоковольтного переменного напряжения на металлические электроды (1) в межэлектродных зазорах зажигаются разряды в верхней и нижней камерах. В нижней камере имеет место барьерный разряд. Здесь канал микрозаряда состоит из трех частей в соответствии с рис.2 (в каждом канале имеется наиболее производительная по озону расширенная часть (5), прилегающая к диэлектрическому барьеру). В верхней камере осуществляется разряд между двумя металлическими электродами. Здесь из-за отсутствия диэлектрического барьера отсутствует расширенная часть (5) канала микрозаряда. Секционированный электрод 6 в этой модели выполняет роль балансира. Сколько микрозарядов в нижней камере, столько же микрозарядов в верхней. Причем величина тока микрозаряда в верхней камере и его зависимость во времени определяются соответствующим микрозарядом нижней камеры. Каждому элементу секционированного электрода (6) одновременно соответствуют два микрозаряда: один происходит в нижней камере, а другой в верхней. Таким образом разряд в верхней камере аналогичен разряду в нижней, если не учитывать отсутствие в верхней камере расширенных частей у каналов микрозарядов. В итоге в нижней камере

синтезируется озон за счет всех частей каналов микроразрядов, а в верхней при отсутствии расширенной части (5). Сравнивая производительности по озону обеих камер, можно судить о производительности различных частей канала микроразряда.

В модели использовался секционированный электрод (6), состоящий из 300 элементов (30 элементов вдоль и 10 поперек потоков газа). Относительно большое количество элементов (300 шт.) необходимо для получения суммарной производительности и соответственно более точного измерения. Экспериментальные исследования выполнены при действующем значении напряжения $U=15$ кВ для промышленной частоты 50 Гц, одинаковом расходе озонируемого не осушенного воздуха в каждой камере $Q=0,2$ м³/час и одинаковом воздушном зазоре равном $d=2$ мм. Измерения осуществлялись одновременно для обеих камер с помощью озонметров. Показания озонметра: для нижней камеры 7 г/м³, тогда производительность будет 1,4 г/час; для верхней соответственно $< 0,5$ г/м³ и $< 0,1$ г/м³ [5]. Показания для верхней камеры лимитированы чувствительностью озонметра. Затем были проведены исследования с осушенным воздухом, которые подтвердили результаты. А именно: концентрация озона в верхней камере 1,5 г/м³, в камере с барьером до 18 г/м³. За счет осушки воздуха концентрация озона в обеих камерах повысилась примерно в три раза.

Как видно из экспериментальных данных в нижней камере, где происходит барьерный разряд, производительность по озону значительно выше, чем в верхней камере. Отсюда следует окончательный вывод: основным производителем озона в барьерном разряде является расширенная часть канала микроразряда, прилегающая к диэлектрическому барьеру.

Такой результат подтверждает последние достижения в озонаторной технике. Известно, что наибольшей производительностью обладают озонаторы с минимальным зазором до 0.5 мм. В данном случае величина зазора соизмерима с толщиной наиболее производительной части канала микроразряда и остальная непроизводительная часть объема сведена к минимуму. В противном случае, газ, пройдя по непроизводительной части объема озонаторной камеры, мало озонируется и разбавляет озон. В итоге концентрация по озону падает. Кроме этого, заметная производительность безбарьерных озонаторов [2] имеет место только при больших расходах озонируемого газа, т.е. при очень низких концентрациях озона. Это объясняется отсутствием в разрядных каналах наиболее производительной по озону расширенной части каналов микроразрядов

В заключение можно сделать следующие выводы:

1. Работа высокоресурсных безбарьерных озонаторов возможна только при очень низких концентрациях озона.

2. Для эффективной работы озонаторов необходимо использовать барьерный разряд.

3. Минимальная длина столба канала микро разряда - гарантия надежности и производительности генераторов озона.

4. Экспериментально показано, что наиболее производительной по озону является расширенная часть канала микро разряда, прилегающая к диэлектрическому барьеру.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пичугин Ю.П. // Материалы 20-й конференции "Генераторы озона и озонные технологии" Москва, 2000, с.43-50.

2. А.с.1763357 (СССР), кл. С 01 В 13/11

3. Самойлович В.Г., Гибалов В.И., Козлов К.В. // Физическая химия барьерного разряда. М., 1989.

4. В.В. Лунин, М.П. Попович, С.Н. Ткаченко.// Физическая химия озона. М.,1998.

5. Пичугин Ю.П. // Материалы 25-го Всероссийского семинара "Озон и другие экологически чистые окислители. Наука и технологии". Москва, 2003, с.36-47.