

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАЗРЯДНОЙ ОБЛАСТИ ГЕНЕРАТОРА ОЗОНА С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

*Д.Д. Дмитриев, магистрант¹, Н.Ю. Лысов, канд. техн. наук, доц.¹,
А.И. Милосердов¹, В.И. Жунь, д-р хим. наук, проф.², А.Я. Шмелев³*

¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, Россия

²ВЭИ – филиал РФЯЦ–ВНИИТФ, Москва, Россия

³ООО «Московские озонаторы», Москва, Россия

В работе представлена расчетная модель разрядной области генератора озона с распределенными параметрами. Благодаря ей исследуется влияние неоднородности разрядного промежутка на общую емкость и мощность барьерного озонатора. Показано, что при подаче напряжения, равному напряжению зажигания разряда, при нулевом зазоре мощность равна нулю и увеличивается с ростом отклонения зазора. Однако при подаче полуторного значения напряжения зажигания, наблюдается обратная картина, максимальная мощность вырабатывается при отсутствии отклонения, а минимальная при критическом значении этого отклонения.

Ключевые слова: генераторы озона, озонатор, неоднородный разрядный промежуток, моделирование, мощность генератора озона.

Озон – экологически чистое средство для окисления и дезинфекции, особенно популярное в водоподготовке. В промышленности для его получения используют барьерный разряд [1, 2]. В генераторе озона переменное напряжение подается на электроды, один или оба из которых покрыты диэлектриком. Между электродами пропускают воздух или кислород, а расстояние между ними стараются сделать минимальным. Однако при большой площади электродов обеспечить идеальную равномерность этого зазора практически невозможно.

Производство озона в барьерном разряде – практически единственный плазмохимический процесс, используемый в промышленности, где объемы выпускаемой продукции достигают сотен килограммов [3]. Озонаторы – устройства, где синтез озона происходит в барьерном разряде. Для этого на их электроды подается высокое переменное напряжение [4].

Связь между мощностными параметрами разряда в озонаторе и кинетическими результатами фактически составляет основное направление исследований кинетики синтеза озона на протяжении более сотни лет. Принципиальные закономерности установлены: концентрация озона на срезе озонатора определяется плотностью вложенной в газ энергии, и эта связь носит выраженный нелинейный характер.

Однако на практике, в реальных генераторах озона, найденные закономерности проявляются не всегда однозначно. Кинетические кривые озонаторов могут существенно отличаться друг от друга. По мнению исследователей, ключевой фактор, влияющий

на эффективность озонатора – неравномерность зазора между электродами в разных точках. Эта неравномерность обусловлена технологическими ограничениями при производстве озонаторов, в частности, при изготовлении электродов с требуемой точностью. Из-за нее возникают неоднородности в распределении мощности и расхода газа по площади электродов.

Конструкция озонатора. Из большого числа различных современных конструкций озонаторов, использующих электрический разряд для получения озона, наибольшее распространение получили озонаторы с так называемым барьерным разрядом. Производительность одной установки может составлять от единиц граммов до сотен килограмм озона в час.

Барьерным разрядом называют разряд в узком газовом зазоре между плоскими или коаксиальными электродами, один из которых (или оба) покрыт слоем твердого диэлектрика. Если к электродам приложено переменное напряжение с амплитудой, превышающей пробивное напряжение газового промежутка, то в нем возникает разряд, состоящий из большого числа отдельных искр, дискретных в пространстве и во времени.

Конструкция такого озонатора представлена на рисунке 1, она состоит из: корпуса; высоковольтного генератора напряжения; высоковольтного и заземленного электрода; диэлектрического барьера и разрядного промежутка. Принцип работы генератора озона: воздух, проходя между двумя электродами подвергается воздействию очень мощного высоковольтного разряда (несколько тысяч вольт). При данном воздействии кислород переходит из двух-атомарного в трех-атомарное состояние, то есть, из молекулы кислорода образуется молекула озона. На выходе получается озono-воздушная смесь с высокой концентрацией чистого озона.

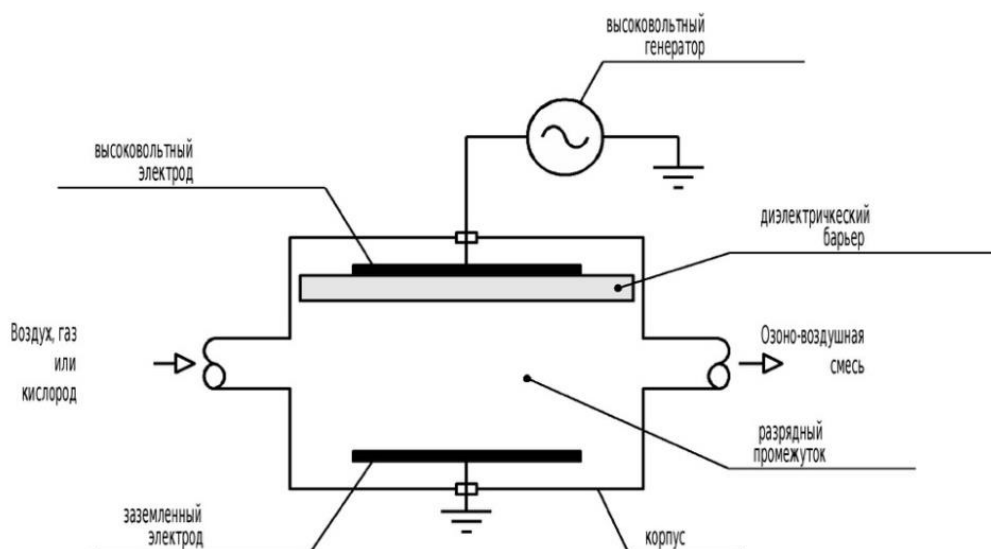


Рисунок 1. – Конструкция барьерного генератора озона

Описание модели. С помощью специально созданной расчетной модели, была проведена оценка влияния неравномерности газового зазора на эффективность использования объемного барьерного разряда при оптимальных значениях плотности мощности на примере генератора озона.

Оценивалась неравномерность газового зазора в плоском генераторе озона с однородным по толщине диэлектрическим барьером, расположенным на каждом из электродов. Эскиз генератора озона представлен на рисунке 2, где: 1 – высоковольтный электрод; 2 – диэлектрический барьер; 3 – заземленный электрод; 4 – дистанцирующие проставки.

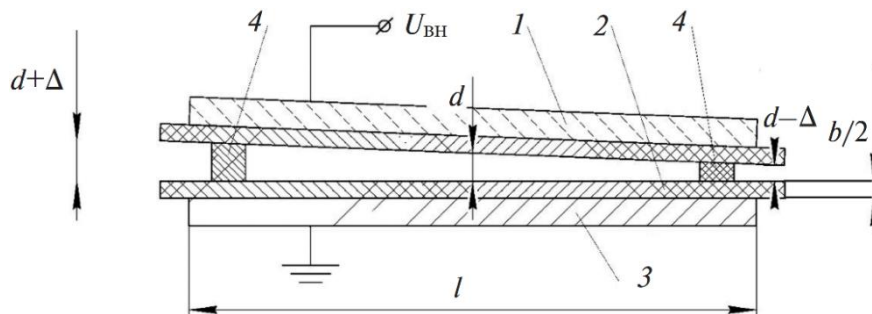


Рисунок 2. – Расчетная модель барьерного генератора озона

В основе созданной модели лежит представление ГО как большого числа параллельно соединенных маленьких ГО эффективной площадью в 10–20 мм² каждый, что по порядку соответствует площади, занимаемой одним микроразрядом в реальных ГО при газовых промежутках размером от долей до единиц миллиметров. В предполагаемой схеме номинальное значение зазора d находится в центре протяженной электродной системы длиной l и глубиной h . Отклонение зазора предполагается только вдоль стороны l и равняется Δ . Отклонение описывается линейным законом и изменяется в интервале от $d+$ до $d-$ на краях электрода. Барьер с диэлектрической проницаемостью ε и толщиной $b/2$ расположен на каждом металлическом электроде. Разряды происходят между поверхностями барьера. Разрядный промежуток разбивается на n частей, каждая из которых представляет собой самостоятельный разрядный промежуток, соединенный параллельно с $n-1$ другими. В первый момент времени на поверхности барьеров отсутствует осевший заряд [5].

Напряжение, при котором выполняется условие самостоятельности в газовом зазоре, вычислялась по выражению (1):

$$U = A\delta d + B\sqrt{\delta d}, \quad (1)$$

где A и B – коэффициенты, зависящие от вида газа (для воздуха $A = 24,5$, $B = 6,4$, для кислорода 26 и 6,35, соответственно);

d – зазор в см;

δ – относительная плотность газа.

Мощность, вырабатываемая озонатором, вычислялась по выражению (2):

$$P = 4U_{\Gamma}C_6f \left(U_m - U_{\Gamma} \frac{C_{\text{общ}}}{C_6 - C_{\text{общ}}} \right), \quad (2)$$

где U_{Γ} – напряжение на газовом зазоре;

C_6 – емкость барьера;

C_r – емкость газового зазора;
 f – частота приложенного напряжения;
 U_m – максимальное значение приложенного напряжения;
 U_r – напряжение на газовом зазоре;
 $C_{общ}$ – общая емкость барьера и газового промежутка.

Результаты моделирования. На основе созданной модели были проведены расчеты с целью обнаружения зависимости общей емкости от величины отклонения зазора. Данная зависимость представлена на Рисунке 3. Как можно заметить, емкость растет с увеличением отклонения зазора. Разница при нулевом и максимальном отклонении составляет 7,5 %. Минимизация межэлектродной емкости является одним из показателей качества сборки генератора озона.

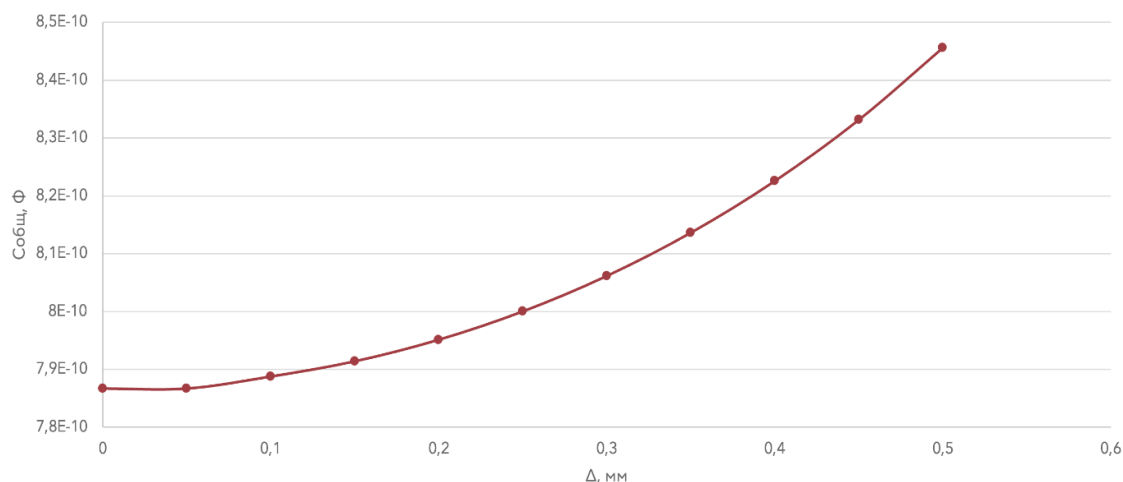


Рисунок 3. – Зависимость общей емкости от отклонения зазора

Далее были проведены расчеты по определению мощности, вырабатываемой озонатором, в зависимости от отклонения зазора от равномерности. Расчеты проводились при различном напряжении, подаваемом на электрод, от $U_{зж}$ до $1,5 U_{зж}$. Зависимости мощности генератора озона от отклонения зазора Δ при различных напряжениях на электроде представлены на рисунке 4.

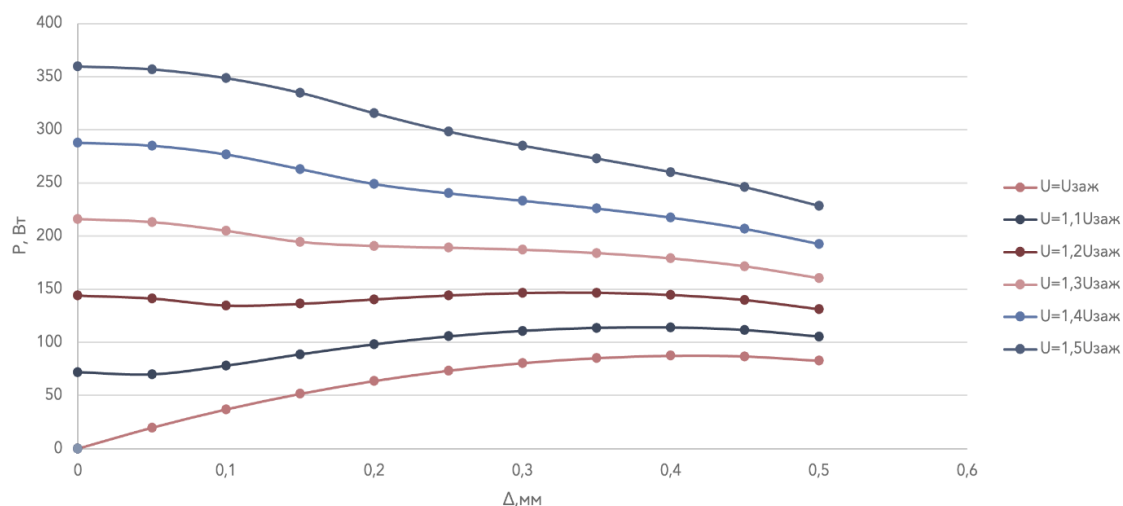


Рисунок 4. – Зависимость мощности от отклонения зазора

Выводы. Учет неоднородности разрядного промежутка генератора озона путем разбиения площади электрода на части оказался эффективным в расчетах параметров цепи питания реального озонатора.

Минимизация общей емкости генератора озона может служить показателем качества его сборки.

Существует такой режим работы генератора озона, при котором за счет установления некоторого превышения рабочего напряжения над начальным, суммарная вырабатываемая мощность не зависит от степени перекоса электродов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лунин В.В., Карягин Н.В., Ткаченко С.Н., Самойлович В.Г. Способы получения озона и современные конструкции озонаторов: Учебное пособие. – М.: МАКС Пресс, 2008. – 216 с.
2. Brandenburg R. Dielectric barrier discharges: progress on plasma sources and on the understanding of regimes and single filaments, 2018, Plasma Sources Sci. Technol. Volume 27, Nr. 7.
3. Теория и практика получения и применения озона / В. В. Лунин, В. Г. Самойлович, С. Н. Ткаченко, И. С. Ткаченко. – М.: Издательство Московского университета. –2016. – 416 с.
4. Физическая химия барьерного разряда / В. Г. Самойлович, В. И. Гибалов, К. В. Козлов М. – М.: Изд-во МГУ. –1989. –176 с.
5. Лысов Н. Ю. и др. Оценка влияния неравномерности газового зазора на характеристики объемного барьерного разряда //Электричество. – 2020. – №. 4. – С. 25–34.