

ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ РАЗРЯДНОГО ПРОМЕЖУТКА НА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В БАРЬЕРНОМ ОЗОНАТОРЕ

**А.И. Милосердов, магистрант¹; Н.Ю. Лысов, канд. техн. наук, доц.¹,
Д.Д. Дмитриев¹, 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 проводится расчёт газодинамического потока в барьерном генераторе озона цилиндрической формы с помощью специализированного программного комплекса. Исследуется влияние неоднородности разрядного промежутка на поле скоростей потока рабочего газа. Показано, что при аксиальной неоднородности зазора возможно получить простую формулу, с помощью которой возможен практический расчёт газораспределения для определения снижения эффективности генератора озона. В тоже время показано, что при других типах неоднородности найти подобную формулу не представляется возможным.

Ключевые слова: барьерный генератор озона, неоднородный зазор, разрядный промежуток, моделирование, газовый поток.

Озон находит широкое применение в качестве экологически безопасного окисляющего и дезинфицирующего вещества. Наиболее широкое применение озон нашел в области водоподготовки. В промышленности для синтеза озона применяется барьерный разряд [1, 2]. Генератор озона представляет собой систему электродов, на которую подаётся переменное напряжение. Один или оба электрода покрыты слоем диэлектрика. Через зазор между электродами подаётся воздух или кислород. Сам зазор стремятся сделать как можно меньше, что при больших площадях электродов неизбежно приводит к его неравномерности.

Существует зависимость количества генерируемого в разряде озона от объемного расхода газа, который в свою очередь зависит от величины разрядного промежутка. Из теоретического анализа известных зависимостей и экспериментальных данных [3] следует, что с ростом неоднородности газового промежутка снижается эффективность генерации озона. В работах [4, 5] детально исследовано влияние неоднородности на электрические характеристики барьерного разряда.

В работе [6] проведено исследование влияния неравномерности газового потока вследствие неоднородности разрядного промежутка на эффективность синтеза озона. Показано значительное отрицательное воздействие неоднородности на генерацию озона. В тоже время работа рассматривает газодинамические процессы поверхностно и учитывает только аксиальную неоднородность, задаваемую смещением осей электродов.

Для исследования влияния неоднородности газового зазора на газодинамические процессы в генераторе озона проводится численное моделирование поля скоростей с использованием специального программного комплекса.

Описание модели. При создании модели рассматривается цилиндрическая форма электродов как наиболее распространённая [1]. На рисунке 1 представлены продольное(а) и поперечное(б) сечения модели. Для наглядности рисунки выполнены не в масштабе.

Подача воздуха в разрядный промежуток генератора озона осуществляется через небольшое отверстие (рис. 1а, поз.1) с одного конца внешнего электрода, при этом воздух поступает через участок с широким газовым зазором. Такая конструкция позволяет выровнять поле скоростей на входе в разрядную зону и уменьшить длину участка установления потока. На другом конце располагается отверстие для выхода азотосодержащей смеси. Внутренний электрод покрыт диэлектрическим барьером (рис. 1а, поз.2) толщиной 0,5 мм. Диаметр внешнего электрода (рис. 1а, поз.3) составляет 58 мм, а внутреннего (рис. 1а, поз.4) вместе с барьером – 57 мм. Внутренний электрод охлаждается проточной водой. Длина электродов составляет 400 мм. Расход газа составляет 5 л/мин.

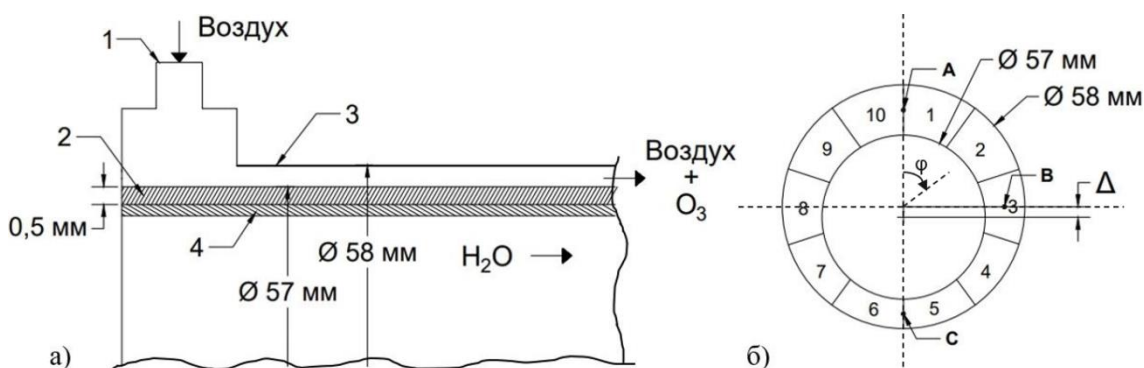


Рисунок 1. – Продольное(а) и поперечное(б) сечения модели генератора озона [6]

Неоднородность газового зазора может быть следствием целого ряда факторов: разнотолщинность диэлектрического барьера, продольные и поперечные искривления труб, из которых изготавливаются электроды, локальные дефекты поверхности, плохая сборка. Она может иметь различный характер, но в данной работе будет рассматриваться аксиальная неоднородность, для которой смещение Δ электродов постоянно, и неоднородность «изгиб», для которой Δ меняется по синусоидальному закону по длине зазора. Точки А, В и С (рис. 1б) – характерные точки потока, по которым определяется процесс установления поля скоростей.

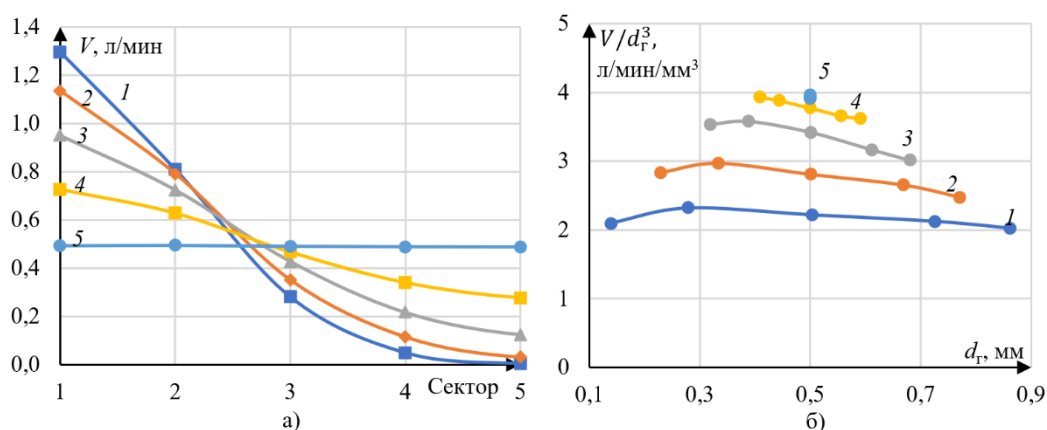
В связи с ограниченностью вычислительных ресурсов не учитывается изменение температуры вследствие выделения энергии барьерным разрядом, и система охлаждения принимается идеальной. А так как скорость движения рабочего газа много меньше скорости звука в нём, и принимается условие постоянства температуры, то можно считать рабочий газ несжимаемой жидкостью.

Результаты моделирования. Расчёт газораспределения при аксиальной неоднородности показал результаты аналогичные тем, что получены в [6]. Определим объёмный

расход газа (V) через поперечное сечение каждого сектора в области установившегося потока (рис. 2а). Виден, существенный разброс в объемных расходах газа даже при небольших значениях смещения. Замечено, что отношение объемного расхода (V) через сектор к кубу зазора (d_i) есть величина приблизительно постоянная (рис. 2б). В этом случае можно предложить формулу (1) для расчёта объемного расхода через каждый сектор по известному суммарному расходу газа на входе.

$$V_i = V_{\text{общ}} \cdot \frac{d_i^3}{\sum_{j=1}^N d_j^3}, \quad (1)$$

где $V_{\text{общ}}$ – суммарный расход газа;
 V_i – расход газа в i -том секторе;
 d_i – значение зазора в i -том секторе,
 N – число секторов.



а) – значения объемного расхода для секторов;
 б) – значения отношения объемного расхода к кубу зазора для секторов;
 1 – $\Delta = 0,4$ мм; 2 – $\Delta = 0,3$ мм; 3 – $\Delta = 0,2$ мм; 4 – $\Delta = 0,1$ мм; 5 – $\Delta = 0$ мм
 Рисунок 2. – Влияние неоднородности Δ на поток газа через генератор озона

Если перейти от объемных расходов к скоростям, то можно заметить, что отношение скорости в середине зазора к квадрату зазора величина постоянная, а отклонение наблюдается только в узкой части зазора, где погрешность определения скорости становится больше (рис. 3).

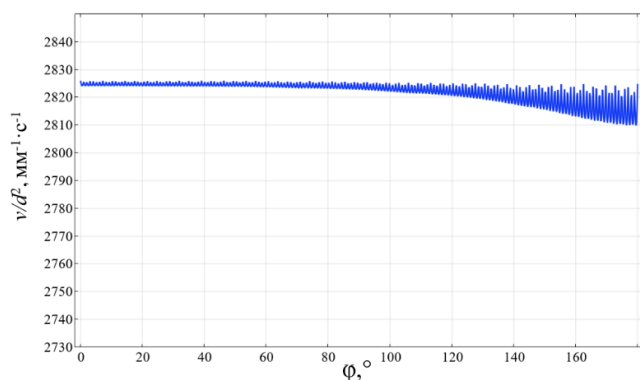


Рисунок 3. – Зависимость отношения скорости к квадрату зазора от угловой координаты при $\Delta = 0,4$ мм

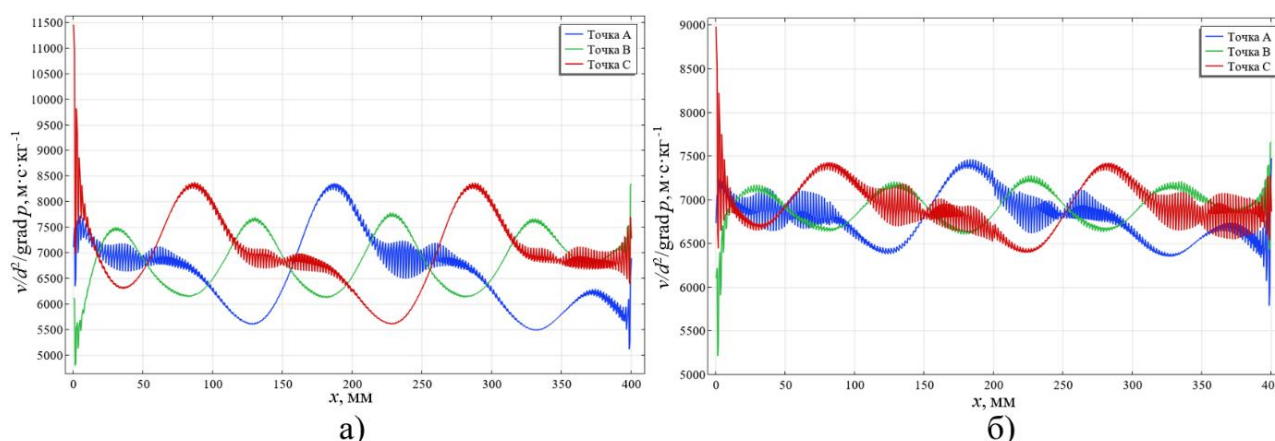
Далее было предположено, что возможно найти подобную зависимость и при других типах неоднородности. Было проведено моделирование газораспределения для неоднородности, меняющейся по следующей зависимости:

$$\Delta = 0,4 \sin\left(\frac{4\pi}{l} x\right), \quad (2)$$

где x – продольная координата;

l – длина генератора озона.

Влияние изменения суммарного объёмного расхода на характер газового потока при неоднородности с постоянным смещением, при отсутствии перехода к турбулентному потоку, очевидно, отсутствует, за исключением изменения длины участка установления. В случае же неоднородности «изгиб» происходит изменение формы потока вследствие его инерционности. При увеличении суммарного расхода наблюдается смещение газового потока по его направлению. Как видно из (рис. 4) при увеличении суммарного объёмного расхода отношение скорости к квадрату зазора к градиенту давления, начинает сильнее отклоняться от среднего значения, в тоже время при уменьшении расхода это отношение практически постоянно. Получаем, что в случае переменного смещения получить формулу, аналогичную (1), не представляется возможным.



а) – объёмный расход 15 л/мин; б) – объёмный расход 5 л/мин

Рисунок 4. – Отношение скорости к квадрату зазора к градиенту давления в характерных точках при изгибе

Выводы. При неоднородности с постоянным смещением на некотором расстоянии от входа поток устанавливается, можно говорить о течении Пуазейля и применять соответствующие уравнения, а постоянное отношение объёмного расхода к кубу величины газового зазора позволяет легко рассчитывать газораспределение в генераторе озона при оценке его эффективности. В тоже время, при неоднородности с переменным смещением по длине зазора к газовому потоку не применимы уравнения Пуазейля, поток не имеет установившегося значения. Более того инерционность потока делает невозможным отказ от численного моделирования и решения газодинамических уравнений даже в приближённых расчётах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Способы получения озона и современные конструкции озонаторов: Учебное пособие / В. В. Лунин [и др.]. – 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. Vol. 27, No. 7
3. Kitayama J., Kuzumoto M., Yoshikawa T. Effect of Discharge Gap Dispersion on Ozone Generation Characteristics, IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials, 2005, vol. 125, iss. 12, pp. 1011–1016.
4. Оценка влияния неравномерности газового зазора на характеристики объемного барьерного разряда / Н. Ю. Лысов, А. В. Орлов, А. Г. Темников [и др.] // Электричество. – 2020. – № 4. – С. 25–34.
5. Влияние неравномерности разрядного промежутка на энергетические характеристики барьерного генератора озона / Н. Ю. Лысов, В. И. Гибалов, А. Г. Темников [и др.] // Электротехника. – 2021. – № 8. – С. 56–60.
6. Влияние несоосности коаксиальных электродов барьерных озонаторов на эффективность синтеза озона / А. И. Милосердов, Н. Ю. Лысов, Д. Д. Дмитриев [и др.]// Электротехника. – 2024. – № 8. – С. 51–56.