

УДК 541.13

## Комбинированный барьерный разряд в воздухе при атмосферном давлении

В. В. Андреев, Ю. П. Пичугин, В. Г. Телегин, Г. Г. Телегин

*Исследован при атмосферном давлении в воздухе комбинированный (сдвоенный) барьерный электрический разряд. Он создается в разрядной камере двумя парами электродов различных конфигураций, подсоединенных к двум автономным высоковольтным источникам питания. Исследован плазмохимический синтез озона в воздухе при атмосферном давлении в зависимости от параметров каждого из контуров разряда. Анализ проводился с точки зрения эффективности и практического применения комбинированного барьерного разряда.*

PACS: 52.80.Tn

**Ключевые слова:** комбинированный барьерный разряд, основной и управляющий разряд, плазмохимический синтез озона, вольт-амперная характеристика, диэлектрический барьер.

### Введение

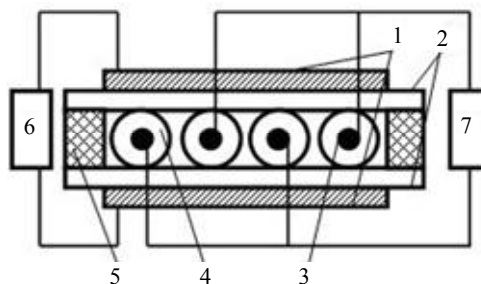
В технологии плазмохимического синтеза озона выход конечного продукта сложным образом зависит от множества взаимосвязанных процессов в электрических разрядах и кинетике химических реакций. Поэтому, несмотря на фундаментальные исследования этих процессов [1—3], продолжают поиски оптимальных условий образования озона в разрядах различных типов.

В данной работе были проведены исследования со сдвоенными (комбинированными) электрическими разрядами в воздухе при атмосферном давлении [4]. Интерес к комбинированным плазменным системам такого типа обусловлен возможностью их применения в качестве генераторов озона высоких концентраций при сравнительно простых способах поддержки газовых разрядов. Цель работы — решение задачи оптимизации энергии электронов [5] в разрядной камере для увеличения выхода озона. Кроме этого, в результате использования комбинированного разряда можно достичь при малых напряженностях электрических полей высокой производительности озонаторов и, следовательно, повышать ресурс их работы.

### Экспериментальная установка

Схема установки приведена на рис. 1. Ее основной частью является разрядная камера. Она со-

стоит из плоских металлических электродов 1, размещенных на диэлектрических пластинах 2, служащих барьерами для электрического разряда. Между ними располагаются цилиндрические электроды 3 с изолирующими оболочками 4, которые также являются диэлектрическими барьерами. Вкладыши 5 из изолирующего материала герметизируют разрядную камеру. Сплошные электроды 1, подключены к одному источнику питания 6. Электроды 3, выполненные из отрезков коаксиального кабеля с удаленной внешней оплеткой, подключены с чередованием полярности через одну к источнику питания 7. Таким образом, с помощью системы электродов 1 и 3 при подаче на них высоковольтных напряжений от источников 6 и 7 создаются поперечные электрические поля. При этом способе возбуждения газа электрический разряд создается полями, приложенными перпендикулярно направлению потока газа в озонаторной ячейке.



**Рис. 1. Схематическое изображение установки для возбуждения сдвоенного электрического разряда:**  
1 — плоские металлические электроды; 2 — диэлектрические пластины; 3 — цилиндрические электроды; 4 — изолирующие оболочки; 5 — вкладыши из изолирующего материала; 6, 7 — высоковольтные источники напряжений

В целом разрядная камера представляет собой герметичную конструкцию и позволяет прогонять компрессором через патрубки атмосферный воз-

Андреев Всеволод Владимирович, доцент, зав. кафедрой.

Пичугин Юрий Петрович, доцент.

Телегин Василий Геннадьевич, аспирант.

Телегин Геннадий Гаврилович, профессор, зав. кафедрой. Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова. Россия, 428015, г. Чебоксары, Московский пр., 15.

Тел. 8-9022870512. E-mail: andreev\_vsevolod@mail.ru

Статья поступила в редакцию 25 июня 2011 г.

© Андреев В. В., Пичугин Ю. П., Телегин В. Г., Телегин Г. Г., 2011

дух (поток порядка 100 л/ч). После его обработки разрядом образовавшаяся озono-воздушная смесь прокачивается через измеритель концентрации озона и выводится в окружающую атмосферу.

Два плоских металлических электрода с диэлектрическими пластинами, разделенные прокладками 5, служат в качестве электродов для поддержания разряда, называемого далее для определенности "основным". Разряд, создаваемый между уложенными в один ряд цилиндрическими электродами, условно назовем "управляющим". В такой конструкции создается комбинированный разряд.

Озонатор работает следующим образом. Поток рабочего газа, задаваемый компрессором, проходит в разрядный зазор, образованный поверхностями барьеров 2 и вкладышами. При подаче высокого напряжения  $U_b$  от источника питания 6 на электроды 1 возникает барьерный разряд. Одновременно при подаче высокого напряжения  $U_c$  от источника питания 7 на электроды 3 образуется второй барьерный разряд.

В созданной экспериментальной установке активная площадь электродов основного разряда составляет 2 дм<sup>2</sup>, высота разрядного зазора — 3 мм, а толщина стеклотекстолитовых барьеров 1 мм.

### Экспериментальные результаты и их анализ

Наличие в плазмохимическом генераторе разрядного промежутка, обладающего нелинейным активным сопротивлением, затрудняет расчеты его электрических характеристик. Вследствие этого изучение внешних вольт-амперных характеристик является основой разработки электрической теории этих сложных электрических приборов [2]. В данной работе получены вольт-амперные характеристики плазмохимического генератора озона, схематический вид которого представлен на рис. 1. В ходе экспериментов подавалось переменное напряжение  $U_c$  до 10 кВ с частотой 50 Гц на электроды управляющего и  $U_b$  до 20 кВ на электроды основного разряда.

На рис. 2 представлена вольт-амперная характеристика установки при подаче напряжения только на электроды основного разряда (электроды 1 на рис. 1). На начальном участке вольт-амперной характеристики (см. рис. 2) заметен излом при напряжении  $U_b \approx 2$  кВ. Точка излома соответствует возникновению электрического разряда между электродами. Семейство вольт-амперных характеристик между электродами управляющего разряда (электроды 3 на рис. 1) при различных напряжениях, поддерживаемых на электродах основного разряда, представлено на рис. 3. На кривой 1 на рис. 3, соответствующей отсутствию напряжения на электродах основного разряда, заметен излом при

напряжении около 2,5 кВ. Он связан с пробоем разрядного промежутка между электродами 3 в разрядной камере (см. рис. 1). На кривых 2—6 на рис. 3, полученных при напряжениях выше  $U_b = 2,5$  кВ на электродах основного разряда 1, такой излом отсутствует, так как пробой разрядного промежутка уже произошел вследствие подачи высокого напряжения на электроды основного разряда.

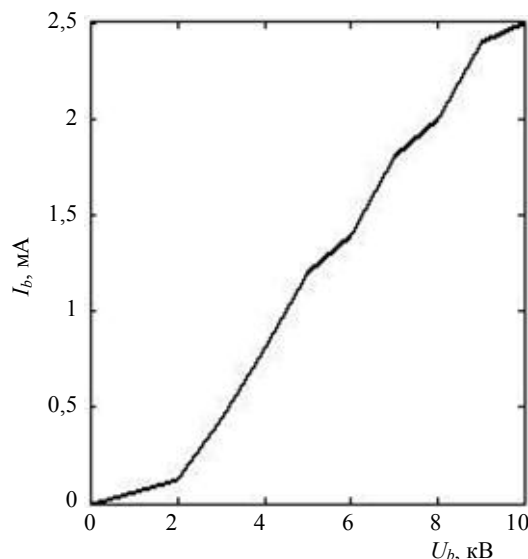


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика основного разряда при отсутствии напряжения на электродах управляющего разряда

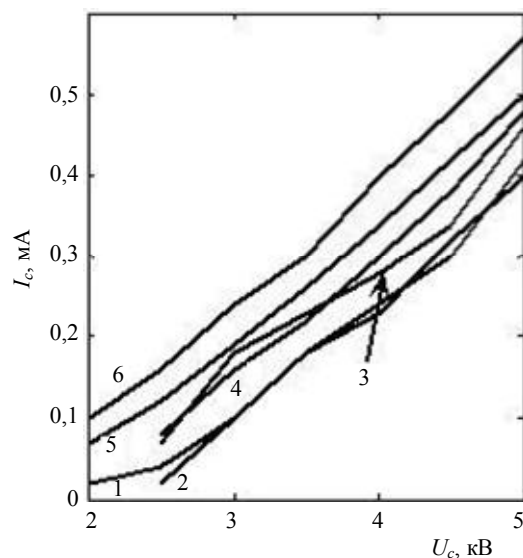


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика управляющего разряда при следующих значениях напряжений и токов на электродах основного разряда:  
 1 —  $U_b = 0$ ,  $I_b = 0$ ; 2 —  $U_b = 2,5$  кВ,  $I_b = 0,4$  мА; 3 —  $U_b = 5$  кВ,  $I_b = 0,8$  мА; 4 —  $U_b = 7,5$  кВ,  $I_b = 1,6$  мА; 5 —  $U_b = 10$  кВ,  $I_b = 2,2$  мА; 6 —  $U_b = 12,5$  кВ,  $I_b = 3,8$  мА

Из рис. 3 видно, что при напряжениях  $U_b = 0$  и 2,5 кВ на электродах 1 кривые 1 и 2 ведут себя друг относительно друга без особой закономерности.

сти, многократно пересекаясь друг с другом. Такое поведение связано с тем, что в данном случае напряжение  $U_b = 2,5$  кВ на электродах 1 при наличии пробоя разрядного промежутка сопоставимо с напряжением  $U_c$  на электродах управляющего разряда 3. При этом ввиду нелинейности процессов в разрядной камере происходит сложное взаимосвязанное перераспределение токов по цепям через электроды основного и управляющего разрядов. Такая же картина наблюдается между кривыми 3 и 4 на рис. 3. Однако здесь при приближении к значению напряжения  $U_c \approx 4$  кВ на электродах управляющего разряда 3 кривая 3, соответствующая напряжению  $U_b = 5$  кВ на электродах 1, идет уже ниже кривой 4, соответствующей напряжению  $U_b = 7,5$  кВ (см. рис. 3). Это указывает на то, что при таких значениях напряжений  $U_b$  и  $U_c$  разветвления токов через электроды основного и управляющего разрядов, соответственно, приобретают устойчивый и достаточно закономерный характер. При подаче еще более высокого напряжения на электроды основного разряда 1 (см. кривые 5 и 6 на рис. 3) указанная закономерность наблюдается при любых значениях напряжения  $U_c$  на электродах управляющего разряда 3.

На рис. 4 и 5 представлены зависимости концентрации озона в выходном воздушном потоке от напряжений на электродах основного и управляющего разрядов. Характерной особенностью зависимости, представленной на рис. 4, является наличие участка с более крутым подъемом на интервале  $10 \text{ кВ} \leq U_b \leq 11 \text{ кВ}$ . Это связано с тем, что при этом в разрядной камере достигается напряженность электрического поля, соответствующая наибольшей эффективности диссоциации молекул кислорода. Так, в работе [5] отмечено, что для этого наряду с генерацией электронов в барьерном разряде требуется обеспечить наибольшую длительность существования такой напряженности электрического поля. Эта напряженность электрического поля в соответствии с работой [5] в разрядном промежутке в кислороде и в воздухе при нормальных условиях должна составлять  $(1,5 - 2,5) \cdot 10^6$  В/м.

На рис. 5 на кривых 1 и 2, соответствующих напряжениям 5 и 7,5 кВ на электродах основного разряда, начиная с напряжения  $U_c \approx 3,5$  кВ на электродах управляющего разряда, также наблюдаются изломы, после которых кривые 1 и 2 поднимаются линейно более круто, чем до точки излома. Это также свидетельствует о том, что в разрядной камере достигаются условия, соответствующие наибольшей эффективности диссоциации молекул кислорода.

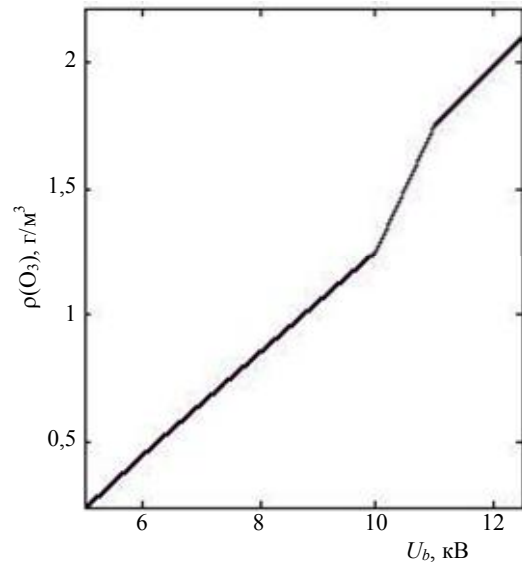


Рис. 4. Зависимость концентрации озона в выходном воздушном потоке от напряжения на электродах основного разряда при отсутствии напряжения на электродах управляющего разряда

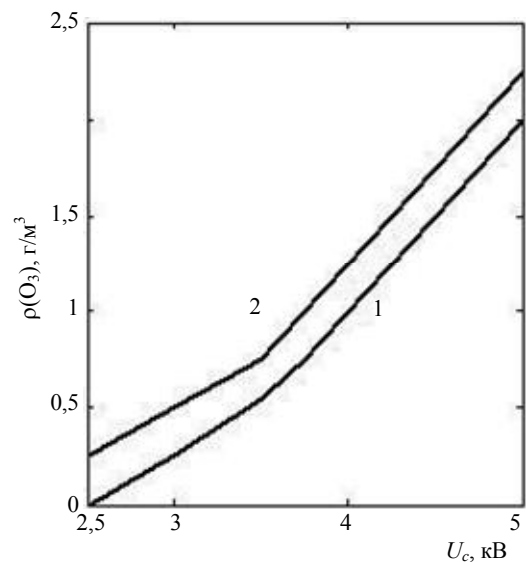


Рис. 5. Зависимость концентрации озона в выходном воздушном потоке от напряжения на электродах управляющего разряда при следующих значениях напряжений на электродах основного разряда: 1 —  $U_b = 5$  кВ; 2 —  $U_b = 7,5$  кВ

Оценим активную мощность разряда по формуле

$$P = (\bar{I} - \bar{I}_1) U_g, \quad (1)$$

полученной в работе [6]. Здесь  $\bar{I}$  — средний ток, при котором рассчитывается мощность;  $\bar{I}_1$  — средний ток зажигания разряда;  $U_g$  — мгновенное значение напряжения на разрядном промежутке.

Оценим по формуле (1) отношение активных мощностей разрядов, затрачиваемых на производство сопоставимого количества озона для случаев, представленных на рис. 4 и 5. Так, при напряже-

нии  $U_b = 11$  кВ концентрация озона в выходном воздушном потоке составляет  $\rho(O_3) \approx 1,75$  г/м<sup>3</sup> (см. рис. 4). Из рис. 2 при этом определяем, что ток через электроды основного разряда составляет  $\bar{I} \approx 2,5$  мА. При этом величина среднего тока зажигания разряда в соответствии с рис. 2 составляет  $\bar{I}_1 \approx 0,17$  мА. Этот ток соответствует на вольт-амперной характеристике ординате точки излома при зажигании разряда в плазмохимическом реакторе синтеза озона [2, 6]. Напряжение  $U_g$  в соответствии с работами [2, 6] находится как точка пересечения с осью абсцисс продолжения линии вольт-амперной характеристики, соответствующей горению разряда. Тогда из рис. 2 находим, что  $U_g \approx 1,5$  кВ.

Следует отметить, что хотя на рис. 2 и 3 по осям отложены эффективные значения токов и напряжений, а в формулу (1) входят средние значения токов и мгновенное значение напряжения, тем не менее, при оценке отношения активных мощностей разряда данными графиков на рис. 2 и 3 вполне можно воспользоваться.

Определим аналогичные величины для кривых 1 и 2, представленных на рис. 5. Концентрация озона в выходном воздушном потоке при напряжении  $U_c = 5$  кВ в случае кривой 1 составляет  $\rho_1(O_3) \approx 2$  г/м<sup>3</sup>, а в случае кривой 2 —  $\rho_2(O_3) \approx 2,25$  г/м<sup>3</sup>. Кривым 1 и 2 на рис. 3 соответствуют вольт-амперные характеристики 3 и 4, соответственно. Как видно из рис. 3, при напряжении  $U_c = 5$  кВ токи через электроды управляющего разряда для кривых 3 и 4 составляют  $\bar{I}_c^{(1)} \approx 0,47$  мА и  $\bar{I}_c^{(2)} \approx 0,48$  мА, соответственно. При этом напряжение на электродах основного разряда составляет  $U_b = 5$  кВ (кривая 3) и  $U_b = 7,5$  кВ — для кривой 4. При таких напряжениях разряд в камере уже существует и в качестве величин  $\bar{I}_1$  и  $U_g$  можно использовать те же значения, которые выше были определены по данным рис. 2. В то же время при напряжениях  $U_b = 5$  и  $7,5$  кВ через электроды основного разряда текут токи  $\bar{I}_b^{(1)} \approx 1,25$  мА и  $\bar{I}_b^{(2)} \approx 1,9$  мА. Тогда, подставив приведенные значения токов и напряжений в формулу (1), получим

$$\frac{P_1}{P} \approx \frac{\bar{I}_b^{(1)} + \bar{I}_c^{(1)} - \bar{I}_1}{\bar{I} - \bar{I}_1} = \frac{1,55}{2,33} = 0,67.$$

Здесь  $P_1$  — активная мощность разряда в случае кривой 1 на рис. 5, а  $P$  — аналогичная величина для кривой на рис. 4. Для данного случая для отношения концентраций озона в выходном воздушном потоке имеем:

$$\frac{\rho_1(O_3)}{\rho(O_3)} \approx \frac{2}{1,75} = 1,14.$$

Запишем аналогичные оценочные отношения в случае кривой 2 на рис. 5:

$$\frac{P_1}{P} \approx \frac{\bar{I}_b^{(2)} + \bar{I}_c^{(2)} - \bar{I}_1}{\bar{I} - \bar{I}_1} = \frac{2,21}{2,33} = 0,95;$$

$$\frac{\rho_2(O_3)}{\rho(O_3)} \approx \frac{2,25}{1,75} = 1,29.$$

Из представленных оценочных вычислений можно сделать вывод, что режим, соответствующий кривой 3 на рис. 5, является наиболее оптимальным среди всех экспериментальных данных.

### Заключение

Как показывают приведенные оценочные вычисления по результатам экспериментов, за счет использования комбинированного барьерного разряда ощутимо увеличивается производительность озонатора при одновременном снижении рабочих напряжений источников питания. Это позволяет значительно повысить ресурсы работы плазмохимического генератора озона.

В практическом плане представленные результаты расширяют класс способов и устройств возбуждения электрических разрядов, предназначенных для создания энергосберегающих и ресурсосберегающих плазменных технологий.

### Литература

1. Филиппов Ю. В., Вобликова В. А., Пантелеев В. И. Электросинтез озона. — М.: Изд-во МГУ, 1987.
2. Лунин В. В., Попович М. П., Ткаченко С. Н. Физическая химия озона. — М.: Изд-во МГУ, 1998.
3. Самойлович В. Т., Гибалов В. И., Козлов К. В. Физическая химия барьерного разряда. — М.: Изд-во МГУ, 1989.
4. Пичугин Ю. П., Телегин В. Г., Телегин Г. Г. // Заявка на полезную модель генератора озона на основе комбинированного барьерного разряда, № 2010130142, приоритет от 19.07.2010, положительное решение.
5. Соколова М. В. // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. 1983. № 6. С. 99.
6. Емельянов Ю. М., Филиппов Ю. В. // Журн. физ. химии. 1959. Т. 33. № 5. С. 1042

## Combined barrier discharge in the air at an atmospheric pressure

*V. V. Andreev, Yu. P. Pichugin, V. G. Telegin, G. G. Telegin*

Chuvash State University,

15 Moskovsky av., Cheboksary, 428015, Russia

E-mail: andreev\_ysevolod@mail.ru

*The combined (dual) barrier electric discharge is investigated in the air at an atmospheric pressure. It is created in the discharge chamber with two pairs of electrodes of different configurations. The electrodes are connected to two independent high voltage power supply. The plasma-chemical synthesis of ozone was investigated depending on the parameters of the discharge contours each. The analysis was performed in terms of effectiveness and practical application of the combined barrier discharge.*

PACS 52.80.Tn

*Keywords:* combined barrier discharge, main discharge, control discharge, plasma-chemical synthesis of ozone, the current-voltage characteristics, dielectric barrier.

Bibliography — 6 references.

*Received June 25, 2011*