

УДК 533.9.02

Влияние фазового сдвига между напряжениями в контурах разряда на комбинированный барьерный разряд при атмосферном давлении в воздухе

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

Исследованный в данной работе при атмосферном давлении в воздухе комбинированный барьерный электрический разряд создается в разрядной камере двумя парами электродов различных конфигураций, подсоединенных к двум автономным высоковольтным источникам питания. В экспериментальной установке предусмотрена возможность изменения фазового сдвига между напряжениями, приложенными к двум контурам разряда. Получены при различных напряжениях, приложенных к контурам разряда, зависимости токов через них, а также выхода озона от фазового сдвига. Установлено, что существует оптимальный сдвиг фаз, при котором выход озона максимален.

PACS: 52.80.Tn

Ключевые слова: диэлектрический барьер, комбинированный барьерный разряд, оптимальная конфигурация электрического поля, плазмохимический реактор, синтез озона.

Введение

В технологии плазмохимических реакторов выход желаемого продукта сложным образом зависит от множества взаимосвязанных процессов в электрических разрядах и кинетике химических процессов, в частности, в случае синтеза озона. Вследствие этого, несмотря на фундаментальные исследования таких процессов [1–3], продолжают поиски оптимальных условий осуществления плазмохимических процессов в разрядах различных типов.

Так, в работе [4] рассмотрен при атмосферном давлении в воздухе комбинированный барьерный электрический разряд, создаваемый в разрядной камере двумя парами электродов различных конфигураций. В экспериментальной установке пары электродов подсоединены к двум автономным высоковольтным источникам питания. В этой работе показано, что за счет использования комбинированного барьерного разряда можно добиться увеличения производительности плазмохимического генератора озона при более низком энергопотреблении.

Таким образом, одной из причин высокого интереса к плазменным установкам на основе комбинированного барьерного разряда является возможность их применения, в частности, в качестве генераторов озона высоких концентраций при сравнительно простых способах поддержки газовых разрядов. В подобных установках сравнительно легко решается задача оптимизации энергии электронов [5] в разрядной камере с целью увеличения выхода озона. Это позволяет достичь при малых напряженностях электрических полей высокой производительности плазмохимического генератора и, следовательно, повышать ресурс его работы.

Отметим, что в работе [4] были получены и исследованы вольт-амперные характеристики разрядной камеры с двумя парами электродов различных конфигураций. Также получены зависимости концентрации озона в выходном воздушном потоке от напряжений на электродах. На основе полученных результатов были определены режимы работы разрядной камеры, наиболее оптимальные с точки зрения энергопотребления для синтеза озона. Тем не менее, необходимы дальнейшие изыскания по повышению общей эффективности установки.

Целью данной работы являлось исследование влияния на характеристики комбинированного барьерного электрического разряда в воздухе фазового сдвига между напряжениями высоковольтных источников, питающих две пары электродов различных конфигураций в экспериментальной установке.

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.: 8–902–287–05–12.

E-mail: andreev_vsevolod@mail.ru

Статья поступила в редакцию 20 января 2013 г.

© Андреев В.В., Пичугин Ю.П., Телегин В.Г., Телегин Г.Г., 2013

Экспериментальная установка

Схематический вид экспериментальной установки, а также принципиальная электрическая схема её питания представлены на рис. 1. Разрядная камера состоит из плоских металлических электродов 1, размещённых 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. Установка подключается к источнику питания через автотрансформатор с двумя выходами 10. Сплошные электроды 1 подключены через высоковольтный трансформатор 8 к одному выходу автотрансформатора 10. Электроды 3, выполненные из отрезков коаксиального кабеля с удаленной внешней оплеткой, подключены с чередованием полярности через одну, к автотрансформатору 10 через высоковольтный трансформатор 9.

Таким образом, с помощью системы электродов 1 и 3 при подаче на них высоковольтных напряжений создаются поперечные электрические поля. При этом способе возбуждения газа электрический разряд создается полями, приложенными перпендикулярно направлению потока газа в разрядной ячейке. Киловольтметры 6 и 7 служат для контроля напряжений, подаваемых соответственно на электроды 1 и 3. Переменный конденсатор C и переменное сопротивление R представляют собой фазовращающую RC -цепочку. Питание осуществляется от сети с частотой 50 Гц.

В целом, разрядная камера представляет собой герметичную конструкцию и позволяет прогонять компрессором через патрубки атмосферный воздух (поток порядка 100 л/час). После его обработки электрическим разрядом озono-воздушная смесь прокачивается через измеритель концентрации озона и выводится в окружающую атмосферу.

Два плоских металлических электрода 1 с диэлектрическими пластинами 2, разделённые прокладками 5, служат в качестве электродов для поддержания разряда, называемого далее для определённости «основным». Разряд, создаваемый между уложенными в один ряд цилиндрическими электродами, условно назовём «управляющим». В такой конструкции создается комбинированный разряд.

Разрядная ячейка работает следующим образом. Поток рабочего газа, задаваемый компрессором, проходит в разрядный зазор, образованный поверхностями барьеров 2 и вкладышами 5. При подаче высокого напряжения U_b от высоковольтного трансформатора 8 на электроды 1 возникает барьерный разряд. Барьерный электрический разряд, создаваемый электродами 1, назовём «основным». Одновременно при подаче высокого напряжения U_c от высоковольтного трансформатора 9 на электроды 3 образуется второй барьерный разряд, который назовём «управляющим».

В созданной экспериментальной установке активная площадь электродов основного разряда составляет 2 дм², высота разрядного зазора плоскими электродами 1 равна — 3 мм, а толщина стеклотекстолитовых барьеров 2 равна 1 мм.

Измерение концентрации озона в выходном воздушном потоке осуществлялась ультрафиолетовым оптическим газоанализатором фона модели «Циклон—5.11». Погрешность измерений не превышала 5%.

Напряжения измерялись высоковольтным вольтметром системы С—196 класса точности 1.0. Измерения силы тока осуществлялись милливольтметром марки ВЗ—42/45. Погрешности измерений напряжения и силы тока не превосходили 5%.

Результаты и их анализ

Результаты измерений на экспериментальной установке представлены на рис. 2—4. На этих ри-

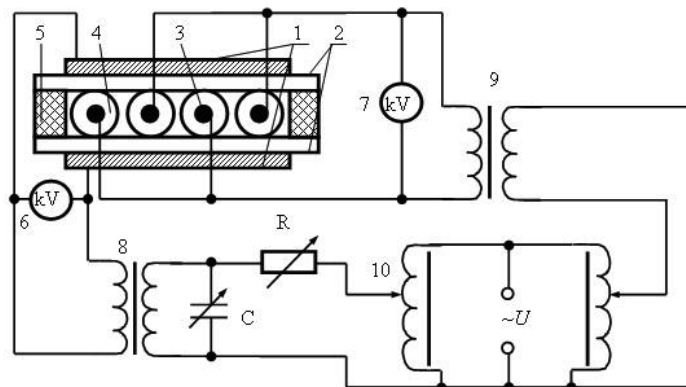


Рис. 1. Схематическое изображение установки для возбуждения комбинированного электрического разряда и принципиальная электрическая схема для исследования влияния сдвига фаз между напряжениями, питающими отдельные пары электродов.

сунках кривые получены при следующих значениях напряжения на электродах 3 управляющего разряда: 1 — $U_c = 7$ кВТ; 2 — $U_c = 5$ кВТ; 3 — $U_c = 3$ кВТ; 4 — $U_c = 2$ кВТ; 5 — $U_c = 0$. Звёздочками на рис. 2–4 отмечены экспериментальные точки.

Как видно из кривых, представленных на рис. 2–4, эффект влияния фазового сдвига между напряжениями, питающими два контура разряда, возрастает по мере увеличения напряжения U_c на электродах управляющего разряда 3

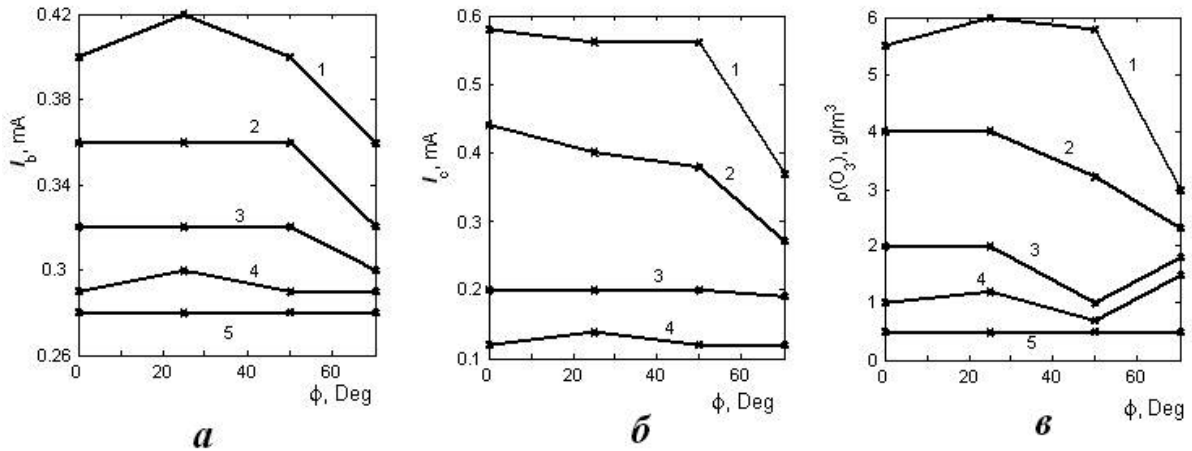


Рис. 2. Зависимость тока I_b через электроды основного разряда 1 от фазового сдвига между напряжениями на электродах 1 и 3 (а); зависимость тока I_c через электроды управляющего разряда 3 от фазового сдвига между напряжениями на электродах 1 и 3 (б); зависимость концентрации озона в выходном воздушном потоке от фазового сдвига между напряжениями на электродах 1 и 3 (в) при $U_b = 6$ кВ.

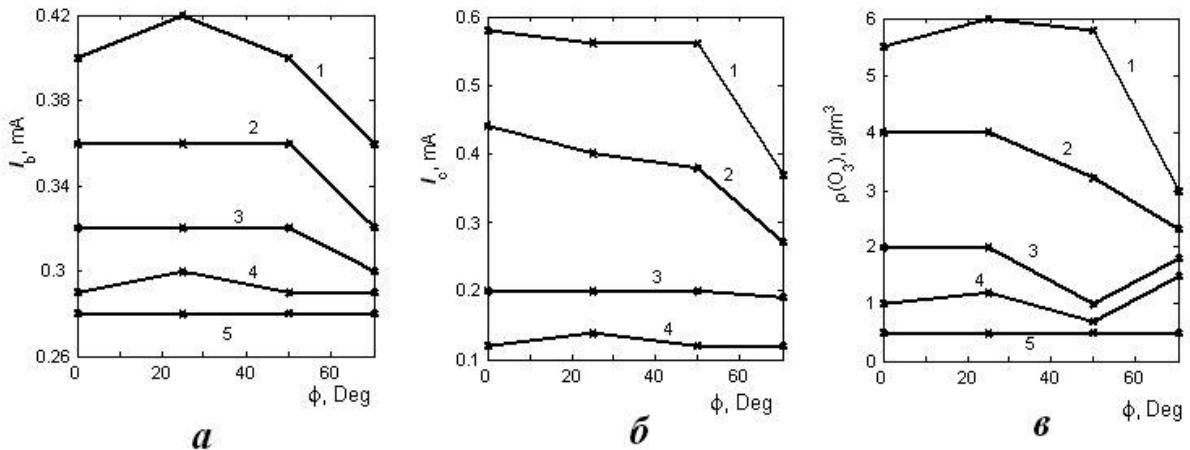


Рис. 3. Зависимость тока I_b через электроды основного разряда 1 от фазового сдвига между напряжениями на электродах 1 и 3 (а); зависимость тока I_c через электроды управляющего разряда 3 от фазового сдвига между напряжениями на электродах 1 и 3 (б); зависимость концентрации озона в выходном воздушном потоке от фазового сдвига ϕ между напряжениями на электродах 1 и 3 (в) при $U_b = 8$ кВ.

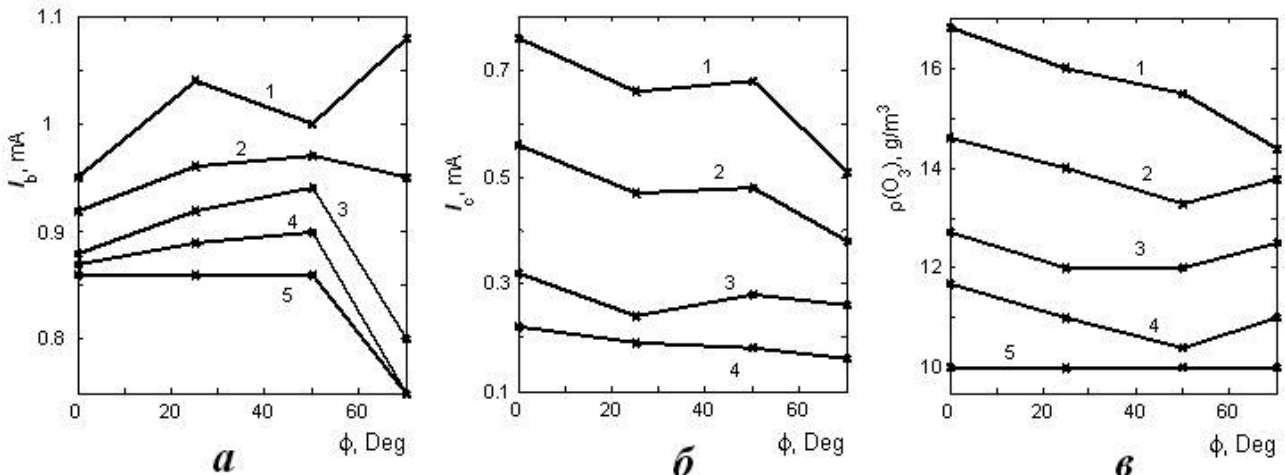


Рис. 4. Зависимость тока I_b через электроды основного разряда 1 от фазового сдвига между напряжениями на электродах 1 и 3 (а); зависимость тока I_c через электроды управляющего разряда 3 от фазового сдвига между напряжениями на электродах 1 и 3 (б); зависимость концентрации озона в выходном воздушном потоке от фазового сдвига между напряжениями на электродах 1 и 3 (в) при $U_b = 10$ кВ.

(см. рис. 1). Также, чем выше напряжение на электродах основного разряда 1, тем при меньших значениях напряжения U_c проявляется влияние фазового сдвига между ними на комбинированный барьерный разряд. Следует отметить, что все кривые на графиках симметричны относительно линии $\varphi = 90^\circ$.

Кривые на рис. 2, в — 4, в, отображающие зависимость концентрации озона в выходном воздушном потоке от фазового сдвига φ между напряжениями на электродах 1 и 3 (см. рис. 1), позволяют судить насколько электрический режим в разрядной камере близок к оптимальному. Так, в работе [5] отмечено, что наряду с генерацией электронов в барьерном разряде требуется обеспечить наибольшую длительность существования такой напряжённости электрического поля, соответствующей наибольшей эффективности диссоциации молекул кислорода (если речь идёт о синтезе озона). Эта напряжённость электрического поля в разрядном промежутке в кислороде и в воздухе при нормальных условиях в соответствии с работой [5] должна составлять $(1,5 - 2,5) \cdot 10^6$ В/м. Очевидно, в экспериментальной установке, представленной на рис. 1, суммарное электрическое поле является функцией фазового сдвига φ между напряжениями на электродах 1 и 3, т.е. $E = E(\varphi)$. В результате, в разрядной камере напряжения на электродах 1 и 3 достигают пиковых значений в разные моменты времени со сдвигом $\Delta t = \varphi/2\pi\nu$. Здесь ν — частота переменного источника питания. При этом одна пара электродов (например, 1 (см. рис. 1)) генерирует сначала электроны в барьерном разряде. Далее в течение времени Δt напряжение на этой паре электродов будет падать, а на других электродах 3 — возрастать. Так происходит изменение структуры электрического поля в разрядной камере во времени и в пространстве.

Пространственно-временная структура электрического поля и её изменения с течением времени определяются заданными геометрическими, электрическими и физико-химическими параметрами установки. При создании установки её геометрические, электрические и физико-химические параметры можно подобрать таким образом, чтобы как можно дольше и в как можно большей пространственной области разрядной камеры существовало электрическое поле с напряжённостью, соответствующей наибольшей эффективности протекания плазмохимического процесса. Следует отметить, что регулируемыми на этапе конструирования геометрическими параметрами являются, например, диаметр электродов с цилиндрическим поперечным сечением, толщина их изоляции, толщина диэлектрического покрытия

плоских электродов. Подбираемыми на этапе конструирования разрядной камеры физико-химическими параметрами являются, в частности, состав материала диэлектриков и их характеристики, включая поверхностное сопротивление диэлектрика и его ёмкость.

Анализируя зависимости концентрации озона $\rho(\text{O}_3)$ в выходном воздушном потоке от фазового сдвига φ на рис. 2, в можно заметить, что в случае кривых 1 и 2, начиная с определённых значений φ , наблюдается существенное падение величины $\rho(\text{O}_3)$. Это свидетельствует о том, что электрический режим в разрядной камере всё больше уходит от оптимального. В то же время кривая 1 на рис. 2, в проходит через небольшой максимум. Здесь кривые 1 и 2 отличаются тем, что в первом случае $U_c = 7$ кВт, а во втором — $U_c = 5$ кВт.

Из зависимостей на рис. 3, в видно, что максимум появляется и на кривой 2. Отметим, если зависимости на рис. 2 получены при $U_b = 6$ кВт, то на рис. 3 — при $U_b = 8$ кВт. Анализируя кривые 1 и 2 на рис. 3, в можно заключить, что, оптимизируя электрический режим в разрядной камере варьированием фазового сдвига φ , можно добиться при меньших значениях напряжения на управляющих электродах 3 практически той же производительности плазмохимического генератора, как и в установке без такой оптимизации. Так, в случае кривой 2 при фазовом сдвиге $\varphi \approx 50^\circ$ ($U_c = 5$ кВт) достигается практически такая же производительность по озону, что и в случае кривой 1 при $\varphi = 0^\circ$ ($U_c = 7$ кВт). В то же время, начиная с определённых значений фазового сдвига φ , кривые 1 и 2 здесь, как и в случае аналогичных кривых на рис. 2, в, довольно быстро падают.

При дальнейшем увеличении напряжения на электродах основного разряда 1 (см. рис. 1) максимумы на кривых 1 и 2 исчезают (рис. 4, в, $U_b = 10$ кВт). При этом концентрация озона $\rho(\text{O}_3)$ в выходном воздушном потоке в случае кривой 1 падает с ростом фазового сдвига φ вплоть до достижения величины $\varphi = 0^\circ$, а при меньших значениях напряжения U_c на электродах управляющего разряда 3, проходя через минимум, начинает расти (кривые 2—4 на рис. 4, в). Всё это позволяет сделать вывод, что, подобрав, в частности, соответствующие значения напряжений U_b и U_c , а также величину фазового сдвига φ между ними, для конкретной разрядной камеры можно добиться оптимального электрического режима для осуществления желаемых плазмохимических процессов.

Очевидно, при отсутствии напряжения U_c на электродах управляющего разряда 3 должна отсутствовать какая-либо зависимость концентрации озона $\rho(\text{O}_3)$ в выходном воздушном по-

токе от фазового сдвига φ , что демонстрируют кривые 5 на рис. 2, *a* — 4, *в*. Также следует отметить, что на рис. 4, *a* зависимость тока I_b через электроды основного разряда 1 в случае кривой 1 имеет тенденцию к увеличению с ростом фазового сдвига φ , хотя при этом концентрация озона $\rho(\text{O}_3)$ в выходном воздушном потоке падает (кривая 1 на рис. 4, *в*). Это свидетельствует о том, что в барьерном электрическом разряде генерируется большое количество высокоэнергетических электронов, эффективность которых в процессе плазмохимического синтеза озона весьма низка.

Оценка активной мощности разряда в исследуемой камере с двумя независимыми контурами разряда была выполнена в предыдущей работе [4]. В указанной работе [4] показано, что использование электродов управляющего разряда (электроды 3 на рис. 1) позволяет достичь при меньшей активной мощности разряда более высокой производительности по синтезу озона по сравнению со случаем, когда задействованы только электроды основного разряда 1. Следует отметить, что если в разрядной камере задействованы только электроды основного разряда 1, то производительность по озону сопоставима с аналогичной величиной для барьерной разрядной камеры с плоскими электродами. Достаточно подробный обзор ячеек барьерного разряда приведён в работах [1–3].

Вообще, наиболее слабым местом промышленных плазмохимических реакторов, основанных на барьерном разряде, является диэлектрик. Последний разрушается вследствие воздействия микроразрядов на его поверхность в электрических полях высокой напряжённости [6]. Поэтому многие исследования по применению барьерного разряда направлены на создание в разрядной ячейке условий, позволяющих достичь высокой производительности при малых напряжённостях электрических полей [7–9]. Из результатов настоящей работы следует, что показатели по производительности озона могут быть ещё улучшены, если учитывать фазовые соотношения между напряжениями, питающими два независимых разрядных контура в камере.

Заключение

Проведённые исследования с разрядной камерой с использованием двух независимых контуров разряда показывают возможность создания в ней оптимального электрического режима, соответствующего наибольшей эффективности протекания конкретных плазмохимических процессов, в частности, реакции синтеза озона. Хотя в работе исследован только синтез озона в разрядной

камере, но следует отметить, что физика многих других плазмохимических реакций во многом является аналогичной. Так, в работе [5] отмечено, что, наряду с генерацией электронов в барьерном разряде, требуется обеспечить наибольшую длительность существования напряжённости электрического поля в разрядной камере, соответствующей наибольшей эффективности диссоциации реагирующих молекул. Эта напряжённость электрического поля обычно ниже критической величины E_{cr} , при которой возникает коронный разряд, и различна для разных плазмохимических процессов.

Кроме того, использование двух независимых контуров разряда позволяет сравнительно легко управлять пространственно-временной конфигурацией электрического поля в разрядной камере. Это особенно важно для поддержания оптимального электрического режима в плазмохимическом генераторе в условиях, когда с течением времени параметры системы начинают «плавать». Одной из причин такого «плавания» может являться то, что с течением времени изменяются параметры поверхности диэлектрика вследствие воздействия микроразрядов. В результате пространственно-временная конфигурация электрического поля может стать далёкой от оптимальной, соответствующей наибольшей эффективности (с точки зрения выхода целевого продукта и энергопотребления) конкретного плазмохимического процесса. Управляя барьерным разрядом в камере с помощью двух независимых контуров разряда сравнительно легко поддерживать оптимальную пространственно-временную конфигурацию электрического поля. Конечно, при этом следует учитывать, что фазовые зависимости могут изменяться со временем.

Результаты данной работы наряду с результатами работы [4], показывают, что за счет использования комбинированного барьерного разряда можно добиться большей производительности плазмохимического генератора при более низкой потребляемой мощности. Это, в частности, позволяет значительно повысить ресурс работы плазмохимической установки.

Литература

1. Филиппов Ю.В., Вобликова В.А., Пантелеев В.И. Электросинтез озона. —М.: Изд-во МГУ, 1987.
2. Лукин 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. Андреев В.В., Пичугин Ю.П., Телегин В.Г., Телегин Г.Г.// Прикладная физика. 2011. № 6. С. 74.

5. Соколова М.В.// Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. 1983. № 6. С. 99.

6. Пичугин Ю.П.// Материалы 25-го Всероссийского семинара «Озон и другие экологически чистые окислители. Наука и технологии», 2003. С. 36.

7. Cieplak T., Yamabe C., Olchowik J.M., Ozonok J.// Materials Science- Poland. 2006. V. 24. No. 4. P. 1087.

8. Савельев А.В., Гибалов В.И., Саенко В.Б., Рахимов А.Т.// Журн. физ. химии. 2000. Т. 74. № 8. С. 1713.

9. Гибалов В.И., Ткаченко И.С., Лунин В.В.// Журн. физ. хим.. 2008. Т. 82. № 6. С. 1156.

Influence of the phase shift between the voltages in the discharge contours on the combined barrier discharge at atmospheric pressure in air

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

Chuvash State University,
15 Moskovskii av., Cheboksary, 428015, Russia
E-mail: andreev_vsevolod@mail.ru

Investigated in this paper at atmospheric pressure in the air the combined barrier electrical discharge is created in the discharge chamber with two pairs of electrodes of various configurations. The pairs of electrodes are connected with two independent high-voltage power sources. In the experimental apparatus it is possible to change the phase shift between the voltages applied to the two discharge contours. Dependences from the phase shift of the electric current through the discharge contours, as well as of the ozone production are obtained at different voltages, applied to the discharge contours. It is established that there is an optimal phase shift at which the ozone production maximum

PACS: 52.80.Tn

Keywords: dielectric barrier, combined barrier discharge, the optimal configuration of the electric field, plasma-chemical reactor, ozone synthesis.

Bibliography — 9 references

Received January 20, 2013