

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА, СОЗДАВАЕМОГО ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ ПЛОСКИМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

В.В. Андреев

Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, Чебоксары,
Российская Федерация
e-mail: andreev_ysevolod@mail.ru

Исследовано влияние напряженности электрического поля, а также других физических параметров, на формирование диэлектрического барьерного разряда. Проанализированы формулы для оценки геометрических размеров и длительности существования отдельного микроу разряда в ячейках диэлектрического барьерного разряда. Эти формулы исследованы для модельных систем двух видов: 1) плоский электрод с диэлектрическим покрытием, к которому примыкает расположенный перпендикулярно к нему второй плоский металлический электрод; 2) плоский электрод с диэлектрическим покрытием, к которому примыкает расположенный перпендикулярно к нему второй электрод с цилиндрическим поперечным сечением. Рассмотрен барьерный разряд, возникающий на поверхности диэлектрика, на которой расположен ряд параллельных плоских металлических электродов. С противоположной стороны на поверхности диэлектрика находится сплошной заземленный электрод. Показано, что существует оптимальная геометрическая конфигурация разрядной ячейки (ширина металлической полосы, зазор между плоскими электродами на поверхности диэлектрика), для которой достигается наилучшая энергетическая эффективность протекания плазмохимических процессов. Полученные результаты могут быть использованы при создании новых плазмохимических реакторов для установления оптимальных режимов их работы в целях увеличения выхода целевого продукта при одновременном снижении энергопотребления установки.

Ключевые слова: диэлектрический поверхностный барьерный разряд, плазмохимический процесс, синтез озона, оптимальная конфигурация электрического поля, энергетическая эффективность плазмохимических процессов.

INVESTIGATION OF SURFACE DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE, CREATED BY PARALLEL PLANAR ELECTRODES

V.V. Andreev

Ul'yanov Chuvash State University, Cheboksary, Russian Federation
e-mail: andreev_ysevolod@mail.ru

The influence of electric field intensity as well as of other physical parameters on the formation of a dielectric barrier discharge is investigated. Formulas for estimation of the geometrical dimensions and the duration of existence of a separate microdischarge in the cells of the dielectric barrier discharge are analyzed. These formulas are studied for model systems of two types: (1) the planar electrode coated with a dielectric, to which the second planar metal electrode is adjoined perpendicularly; (2) the planar electrode with a dielectric coating, perpendicularly to which the second electrode with a cylindrical cross section is adjoined. The barrier discharge is investigated, which arises on the dielectric surface where planar metallic electrodes are arranged in a parallel row. On the opposite side of the dielectric surface, the solid grounded electrode is located. It is shown that there is an optimal geometric configuration of the discharge cell (a width of the metal strip, a width of the gap between the strips-electrodes on the dielectric surface), for which the best

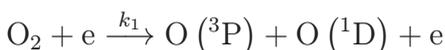
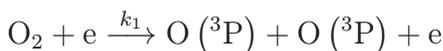
energy effectiveness of plasma-chemical processes is achieved. The results obtained can be used for the development of new plasma-chemical reactors for finding optimal regimes of their work with the aim of increasing the desired product yield while reducing simultaneously the power consumption of the facility.

Keywords: dielectric surface barrier discharge, plasma-chemical process, the ozone synthesis, the optimal configuration of the electric field, the energy effectiveness of plasma-chemical processes.

Введение. Диэлектрический барьерный разряд, включая поверхностный, является одним из наиболее эффективных способов получения приповерхностной плазмы в различных плазменных и плазмохимических технологиях. В последние годы существенный интерес вызывает создание технологий управления высокоскоростными воздушными потоками вблизи поверхности летательных аппаратов путем модификации пограничного слоя с помощью поверхностного диэлектрического барьерного разряда [1–7]. Электрический разряд, в том числе поверхностный барьерный разряд, также активно применяется в методах и технологиях синтеза наноматериалов [8, 9]. Кроме того, в настоящее время в качестве промышленных источников озона широко используются плазмохимические реакторы на основе барьерного разряда [10–15]. Проблема разработки экономичных способов синтеза озона остро стоит перед разработчиками и инженерами на производстве. Озон — мощный окислитель химических и других загрязняющих веществ, обладает высокой способностью уничтожать бактерии, споры, одноклеточные организмы. Малые дозы озона оказывают профилактическое и терапевтическое воздействие. Вследствие этого озон активно используется в медицине, в первую очередь в дерматологии и косметологии. Озон также применяется для дезинфекции и дезодорации озонированным воздухом герметичных камер, плодо- и овощехранилищ, складских помещений, животноводческих комплексов и ферм и т.д., для очистки природных и сточных вод, газовых выбросов (например, от оксида азота и серы).

Совершенствование генераторов озона в основном направлено на повышение эффективности синтеза озона и на увеличение ресурса работы генератора. Однако это невозможно без глубокого изучения пространственно-временной структуры барьерного разряда. Прежде всего следует отметить, что пространственно-временная структура барьерного разряда отражает механизм развития электрического пробоя в разрядном промежутке. Если этот механизм не понять, то вряд ли удастся целенаправленно воздействовать на процесс синтеза озона в генераторе. Форма и размеры канала микроаризада — существенные параметры, определяющие в конечном счете плотность вклада энергии в озонируемый газ.

Процессы в канале микроразряда. Диэлектрический барьерный разряд состоит из отдельных микроразрядов, каждый из которых длится десятки наносекунд [10, 14]. В канале микроразряда происходят реакции диссоциации молекул кислорода, которые лимитируют образование озона:



Согласно литературным данным, вторая реакция в 3 раза более вероятна, чем первая [10]. В метастабильном состоянии ^1D кислород (время жизни около 1 мин) при столкновениях исключительно активен. В то же время при атмосферном давлении в кислороде озон существует только до тех пор, пока существует канал микроразряда. Образование озона записывается как тройное столкновение



Стадийный механизм этой реакции:



Здесь M — частица, при столкновении с которой возбужденная молекула озона O_3^* передает ей энергию.

Структура отдельного канала микроразряда при барьерном разряде приведена на рис. 1. Способ получения таких изображений подробно описан в работах [11, 12]. Схема фрагмента барьерной ячейки и геометрии канала микроразряда представлена на рис. 2.

Каждый канал микроразряда (см. рис. 1) включает в себя три основные части: 1) яркое светящееся пятно вблизи металлического электрода; 2) столб микроразряда; 3) расширенная часть канала, прилегающая к диэлектрическому барьеру. В связи с этим возникает вопрос: какая часть канала микроразряда наиболее интенсивно синтезирует озон?

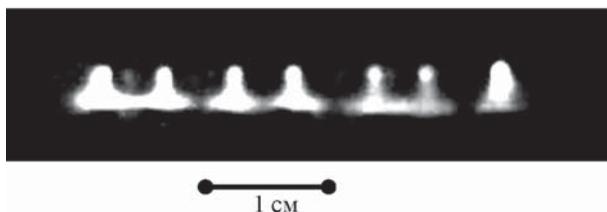


Рис. 1. Структура отдельного канала микроразряда при барьерном разряде в случае расположенного сверху металлического электрода отрицательной полярности (катод)

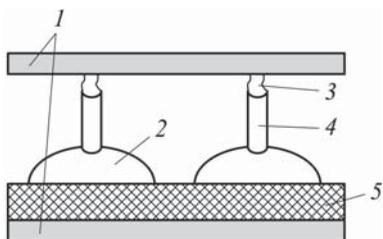


Рис. 2. Схема фрагмента барьерной разрядной ячейки и геометрия канала микроразряда:

1 — металлические электроды; 2 — приборьерная расширенная часть канала микроразряда; 3 — приэлектродная часть канала микроразряда; 4 — столб микроразряда; 5 — диэлектрик (барьер)

в барьерном разряде вблизи поверхности электрода, то вероятность столкновения молекулы озона с твердой поверхностью электрода, в результате которого снимается его возбуждение, значительно возрастает. Таким образом, по мере удаления от поверхности электрода эффективность синтеза озона существенно снижается.

В работе [16] отмечено, что выход озона в плазмохимическом генераторе сложным образом зависит от различных внешних факторов (перенапряжения, частоты напряжения, влажности газа и скорости его потока, поверхностной проводимости диэлектрического барьера, его удельной емкости). В этой же работе показано, что для каждого плазмохимического генератора озона существует оптимальный для образования озона электрический режим. Для этого необходимо подбирать такие параметры, при которых обеспечивается наибольшая длительность существования напряженности электрического поля, соответствующей наибольшей эффективности диссоциации молекул кислорода. Оптимальная напряженность электрического поля в разрядном промежутке в кислороде и в воздухе при нормальных условиях должна составлять $(1,5 \dots 2,5) \cdot 10^6$ В/м [16].

Цель настоящей работы — исследование влияния напряженности электрического поля и других физических параметров на формирование диэлектрического барьерного разряда.

Оценка параметров пространственно-временной структуры отдельных микроразрядов. Оценочные формулы для определения длительности существования и геометрических размеров приборьерной расширенной части отдельного микроразряда в разрядной ячейке, состоящей из плоского электрода с диэлектрическим покрытием, к которому примыкает расположенный перпендикулярно второй плоский

В работе [13] представлены результаты экспериментальных исследований этого вопроса, выполненные на специальной модели озонатора. Показано, что наиболее интенсивно озон синтезируется в расширенной части канала микроразряда. Одно из объяснений этого результата заключается в том, что в коронном разряде в ходе реакции (1) возникает возбужденная молекула озона. Если быстро не снять возбуждение, то происходит разложение молекулы озона. Возбуждение молекулы O_3^* снимается вследствие ее столкновения с другой частицей М в ходе реакции (2). Если озон синтезируется

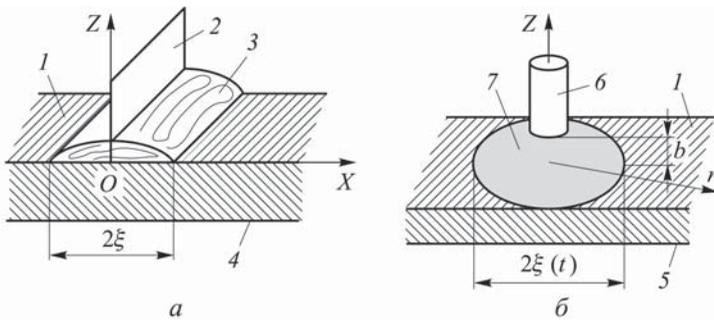


Рис. 3. Схемы взаимного расположения плоского электрода и примыкающего к нему плоского (а) и цилиндрического (б) электродов и диэлектрического барьера в модельной системе:

1 — диэлектрик; 2, 4 — электроды 1 и 2; 3 — зона разряда; 5 — плоский электрод; 6 — цилиндрический электрод; 7 — барьерный разряд

металлический электрод (рис. 3, а), были получены в работе [11]. При этом время существования отдельного микроузора определяется по формуле

$$\tau = \frac{e^2 n_e^2 \gamma^2 b^2 R^2 (1 + \alpha \delta)^2}{E_{\text{кор}}^2}, \quad (3)$$

где e — абсолютный заряд электрона; n_e — концентрация электронов на границе зоны разряда; b — толщина зоны, охваченной коронным разрядом, в приповерхностной области диэлектрика; R — удельное приповерхностное сопротивление диэлектрика; α — коэффициент Таунсенда; δ — ширина области, примыкающей к границе зоны разряда с внешней стороны диэлектрика на его поверхности, в которой происходит генерация новых электрических зарядов за счет столкновения ускоренных электрическим полем электронов с молекулами и атомами воздуха; $E_{\text{кор}}$ — напряженность электрического поля, при которой в газе возникает коронный разряд (для воздуха при нормальных условиях $E_{\text{кор}} \approx 3,1 \cdot 10^6$ В/м [17]). Параметр γ в формуле (3) вычисляется из соотношения

$$\frac{(U_0 - U_S) \sqrt{C}}{(1 - \exp(\gamma \sqrt{RC})) \sqrt{\pi R}} \exp(-RC\gamma^2) = (1 + \alpha \delta) e n_e b \gamma, \quad (4)$$

где U_0 — напряжение на плоском металлическом электроде, примыкающем перпендикулярно к барьеру, в момент возникновения микроузора (так как отдельный микроузор длится порядка 10 нс напряжение U_0 можно принять постоянным); U_S — напряжение на поверхности диэлектрика в начальный момент времени; C — емкость диэлектрического барьера, рассчитанная на единицу площади его поверхности, к которой примыкает плоский электрод.

В зависимости от времени t полуширина приборьерного пятна оценивается по выражению (см. рис. 3, *a*)

$$\xi(t) = x_0 + 2\gamma\sqrt{t - t_0}, \quad (5)$$

где x_0 — полутолщина плоского электрода, расположенного перпендикулярно к барьеру.

Максимальный радиус приборьерного пятна с учетом (3) и (5) вычисляется как

$$\xi_{\max} = x_0 + \frac{2en_e\gamma^2bR(1 + \alpha\delta)}{E_{\text{кор}}}. \quad (6)$$

Оценочные формулы для определения времени существования и геометрических размеров приборьерной части отдельного микроразряда в разрядной ячейке, состоящей из плоского электрода с диэлектрическим покрытием, к которому примыкает расположенный перпендикулярно к нему второй электрод с цилиндрическим поперечным сечением радиусом x_0 (рис. 3, *б*), были получены в работе [12]. При этом формулы для определения длительности отдельного микроразряда τ и величин $\xi(t)$ и ξ_{\max} совпадают с выражениями (3), (5) и (6). Параметр γ находится из равенства

$$\frac{\exp(-RC\gamma^2)}{\int_{\gamma\sqrt{RC}}^{\infty} (1/\theta) \exp(-\theta^2) d\theta} = \frac{2en_e\gamma^2bR(1 + \alpha\delta)}{U_0 - U_S}. \quad (7)$$

Проведем количественный анализ для следующих значений параметров: $U_S = 0$ В; $E_{\text{кор}} = 3,1 \cdot 10^6$ В/м; $n_e = 10^{19}$ м³; $b = 1$ мм; $r_0 = 1$ мм; $\delta = 0,1$ мм; $\alpha = 1500$ м⁻¹. Для диэлектрика из стеклотекстолита толщиной Δ величину C определяем по формуле

$$C = \frac{\varepsilon_0\varepsilon}{\Delta}.$$

Для стеклотекстолита диэлектрическая проницаемость $\varepsilon \approx 5,5$. Тогда при $\Delta = 2$ мм имеем $C \approx 2,5 \cdot 10^{-8}$ Ф·м⁻². Удельное приповерхностное сопротивление R сильно зависит от состояния поверхности диэлектрика и от свойств газа, в котором происходит электрический разряд. Примем $R = 10^5$ Ом для зоны, прилегающей к коронному разряду, что согласуется с данными, приведенными в работе [17]. Тогда при $U_0 = 10$ кВ для максимального диаметра приборьерного пятна из (4) и (5) получим $d = 2\xi_{\max} \approx 7,2$ мм. Этот результат качественно хорошо согласуется с экспериментальными результатами (см. рис. 1).

Разрядная ячейка из параллельных плоских электродов, расположенных на поверхности диэлектрика. Рассмотрим поверхностный барьерный разряд, возникающий в разрядной ячейке, представленной на рис. 4, *a*. Здесь r_0 — ширина электрода; a — расстояние

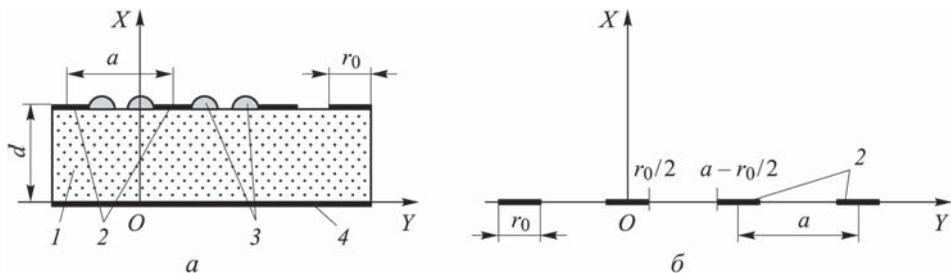


Рис. 4. Схема разрядной ячейки поверхностного барьерного разряда (а) и схема однородной бесконечной сетки из заряженных бесконечно длинных плоских металлических электродов шириной r_0 (б) (ось Z направлена к наблюдателю): 1 — диэлектрик; 2 — ряд параллельных плоских металлических электродов; 3 — зоны разряда; 4 — сплошной электрод

между центрами соседних плоских электродов. Параллельные плоские электроды расположены на поверхности диэлектрика толщиной d . На противоположной поверхности диэлектрика находится сплошной электрод.

В работе [18] получены аналитические формулы для вычисления параметров электрического поля, создаваемого бесконечной сеткой, которая составлена из бесконечно длинных заряженных металлических плоских электродов шириной r_0 (рис. 4, б). Эти электроды расположены параллельно оси Z на одинаковых расстояниях друг от друга вдоль оси Y . Периодическое распределение потенциала на плоскости YOZ на одном периоде задается формулой

$$\varphi(y) = \begin{cases} 0 & \text{при } r_0/2 < y < a - r_0/2; \\ U_0 & \text{при } 0 \leq y \leq r_0/2 \quad a - r_0/2 \leq y < a, \end{cases}$$

где U_0 — потенциал электрода относительно заземления.

Для расчета электрического поля, создаваемого подобной сеткой, в работе [18] была использована идея, изложенная в работе [19], суть которой заключается в следующем. Вдали от сетки по оси X электрическое поле практически однородно, как при равномерном распределении заряда на плоскости YOZ . При приближении к сетке электрическое поле становится неоднородным. Однако плоские металлические электроды расположены периодически, в связи с чем можно предположить, что по оси Y поле также изменяется периодически. Любая периодическая функция разлагается в ряд Фурье. Поэтому для системы электродов, представленной на рис. 4, б, решение можно искать в следующем виде:

$$\phi_n(x, y) = F_n(x) \cos \frac{2\pi n y}{a}, \quad n = 0, 1, \dots$$

В работе [18] были получены формулы для вычисления потенциала, а также компонент электрического поля $E_x(x, y)$ и $E_y(x, y)$,

создаваемых электродами (см. рис. 4, б). Результирующая напряженность электрического поля составляет

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}. \quad (8)$$

В разрядной ячейке (см. рис. 4, а) распределения потенциала и электрического поля представляют собой суперпозицию соответственных потенциалов и электрических полей, создаваемых параллельными плоскими электродами и плоским электродом, расположенным на противоположной поверхности диэлектрика. Следует отметить, что формулы, приведенные в работе [18], получены для бесконечного ряда повторяющихся плоских электродов, при этом их можно использовать для расчета параметров разрядной ячейки конечных размеров. Если на поверхности диэлектрика расположено много параллельных плоских электродов, то для такой разрядной ячейки распределения потенциала и электрического поля могут быть определены с достаточно хорошей точностью по формулам, рассмотренным в работе [18].

Выражение (8) позволяет определить условия возникновения и развития поверхностного барьерного разряда. Так, коронный разряд вблизи электрода возникает, если напряженность электрического поля равна некоторому характерному для этой среды значению $E_{\text{кор}}$ или превышает его. Следовательно, на поверхности диэлектрика вблизи электродов сетки (см. рис. 4, а) коронный разряд в воздухе при атмосферном давлении возникает при выполнении условия

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} \geq E_{\text{кор}}.$$

Зависимости компонент напряженности электрического поля и его модуля от координаты y приведены на рис. 5. Эти зависимости построены в результате расчета по формулам, полученным в работе [18], с учетом следующих параметров: $E_{\text{кор}} = 3,1 \cdot 10^6$ В/м; $r_0 = 0,483$ мм; $a = 0,8$ мм; $d = 1$ мм; $\varepsilon = 5$; $U_0 = -600$ В. Вычисления выполнены для случая, когда плоский сплошной электрод заземлен. Поверхностная плотность электрического заряда σ_1 в формулах для расчета напряженности электрического поля оценивалась так [18]:

$$\sigma_1 = \frac{2\varepsilon_0\varepsilon U_0}{d}.$$

На рис. 5 вертикальные штриховые линии показывают левые и правые границы металлических плоских электродов сетки. Первая слева обозначает правую границу одного из электродов (положение $y = r_0/2$, см. рис. 4, б), горизонтальные сплошные линии — уровень критического значения напряженности электрического поля $E_{\text{кор}}$. В тех областях, где напряженность электрического поля превышает

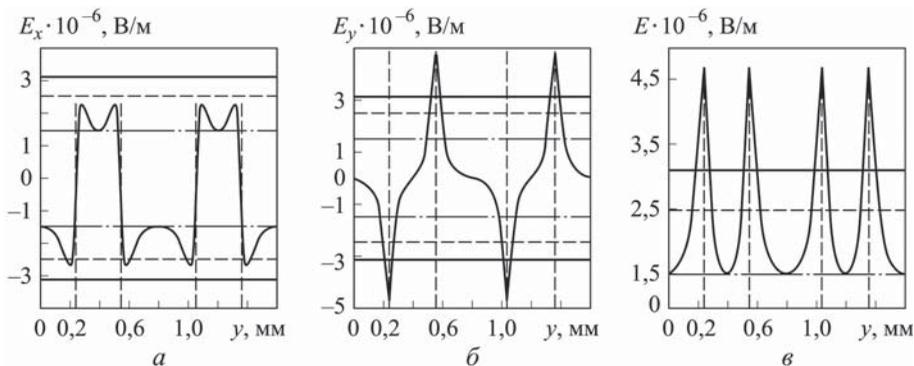


Рис. 5. Зависимости компонент E_x (а) и E_y (б) напряженности электрического поля и модуля вектора напряженности электрического поля E (в) от координаты y

значение $E_{кор}$, формируется поверхностный диэлектрический барьерный разряд. При этом происходит изменение конфигурации электрического поля сетки. В то же время размеры зоны поверхностного барьерного разряда вблизи плоских электродов на поверхности диэлектрика при определенных параметрах разрядной ячейки могут быть достаточно малы по сравнению с расстоянием между границами соседних полос-электродов, т.е. по сравнению с разностью $a - r_0$. Такой случай может иметь место в реальных плазмохимических реакторах, в которых создан оптимальный электрический режим. Горизонтальные штриховые линии (см. рис. 5) обозначают нижнюю ($E_1 = 1,5 \cdot 10^6$ В/м) и верхнюю ($E_2 = 2,5 \cdot 10^6$ В/м) границы напряженности электрического поля, соответствующей наибольшей эффективности диссоциации молекул кислорода в воздухе при нормальных условиях [16].

Зависимость доли площади ΔS верхней поверхности диэлектрика в разрядной ячейке, соответствующей интервалу оптимальных значений $(1,5 \dots 2,5) \cdot 10^6$ В/м напряженности электрического поля, от расстояния a между центрами соседних плоских электродов для различных значений напряжения (см. рис. 4, а) приведена на рис. 6. При этом все остальные параметры остались такими же, как и при построении зависимостей, представленных на рис. 5. Кривые, приведенные на

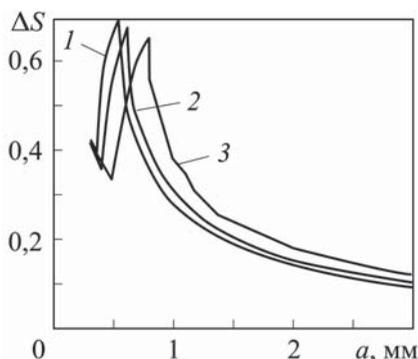


Рис. 6. Зависимость доли площади ΔS верхней поверхности диэлектрика от расстояния a в разрядной ячейке при $U_0 = -450$ (1), -500 (2) и -600 В (3)

рис. 6, проходят через максимум, который смещается вправо по мере увеличения абсолютного напряжения. При этом максимум с увеличением напряжения снижается.

Заключение. Полученные теоретические результаты (3)–(7) хорошо согласуются с экспериментальными данными, приведенными в различных литературных источниках [10, 14], в том числе и с результатами экспериментов, представленными в данной работе (см. рис. 1). Формулы (3)–(7) также могут применяться для оценки размеров зоны поверхностного диэлектрического барьерного разряда вблизи границ плоских электродов в разрядной ячейке, (см. рис. 4, а).

Результаты, приведенные на рис. 6, свидетельствуют о том, что для осуществления конкретных плазмохимических процессов с меньшими энергетическими затратами важно учитывать геометрию электродов в разрядной ячейке. Таким образом, эти результаты могут быть использованы при разработке новых плазмохимических реакторов для установления оптимальных режимов их работы для увеличения выхода целевого продукта при одновременном снижении энергопотребления установки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шибков В.М., Александров А.Ф., Ершов А.П. и др. Свободнолокализованный сверхвысокочастотный разряд в сверхзвуковом потоке газа // Физика плазмы. 2005. Т. 31. № 9. С. 857–864.
2. Шибков В.М., Александров А.Ф., Ершов А.П. и др. Воспламенение сверхзвукового потока углеводородного топлива с помощью сверхвысокочастотных разрядов // Вестник Московского университета. Сер. 3. Физика. Астрономия. 2004. № 5. С. 67–69.
3. Artana G., D'Adamo J., Leger L. et al. Flow control with electrohydrodynamic actuators // AIAA Paper 2001–0351, Reno, Nevada, 2001.
4. Leonov S., Gromov V., Kuriachy A., Yarantsev D. Mechanisms of flow control by near-surface electric discharge generation // AIAA Paper 2005–0780, Reno, Nevada, 2005.
5. Corke T.C., Post M.L. Overview of plasma flow control: concepts, optimization and applications // AIAA Paper 2005–0563, Reno, Nevada, 2005.
6. Hall K.D., Jumper E.J., Corke T.C., McLaughlin T.E. Potential flow model of a plasma actuator as a lift enhancement device // AIAA Paper 2005–0783, Reno, Nevada, 2005.
7. Курячий А.П., Русьянов Д.А., Скворцов В.В., Чернышев С.Л. Моделирование системы электрогазодинамических исполнительных элементов // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2011. № 5. С. 108–119.
8. Невар Е.А., Савастенко Н.А., Брюзер В., Лопатик Д.А., Мэй Ф., Буцень А.В., Тарасенко Н.В., Бураков В.С. Плазменные синтез и обработка наноразмерных частиц халькопирита // Журнал прикладной спектроскопии. 2010. Т. 77. № 1. С. 136–141.
9. Бураков В.С., Тарасенко Н.В., Буцень А.В., Неделько М.И., Невар Е.А. Лазерно-плазменные методы получения и магнитные свойства нанопорошков силицидов гадолиния // Проблемы физики, математики и техники. 2011. № 2 (7). С. 22–25.
10. Лушин В.В., Попович М.П., Ткаченко С.Н. Физическая химия озона. М.: Изд-во МГУ, 1998. 480 с.

11. Андреев В.В., Васильева Л.А., Кравченко Г.А., Пичугин Ю.П., Филиппов В.Г. Результаты исследования структуры барьерного разряда // *Нелинейный мир*. 2009. Т. 7. № 11. С. 811–819.
12. Андреев В.В., Васильева Л.А., Матюнин А.Н., Пичугин Ю.П. Исследование структуры барьерного разряда вблизи электрода с цилиндрическим поперечным сечением // *Прикладная физика*. 2011. № 1. С. 52–57.
13. Пичугин Ю.П. Актуальность и эффективность многобарьерных озонаторов // *Материалы 25-го Всероссийского семинара “Озон и другие экологически чистые окислители. Наука и технологии”*, 2003. С. 36–47.
14. Самойлович В.Г., Гибалов В.И., Козлов К.В. Физическая химия барьерного разряда. М.: Изд-во МГУ, 1989. 176 с.
15. Cieplak T., Yamabe C., Olchowik J.M., Ozonek J. Analysis of the process of ozone generation and micro-channel intensity distribution by the discharge analysis method // *Materials Science Poland*. 2006. Vol. 24. No 4. P. 1087–1093.
16. Соколова М.В. Оптимизация образования озона в электрическом разряде // *Известия АН СССР. Энергетика и транспорт*. 1983. № 6. С. 99–107.
17. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. 592 с.
18. Андреев В.В., Васильева Л.А. Исследование поверхностного барьерного разряда, создаваемого электродами в виде ряда параллельных полос // *Прикладная физика*. 2012. № 6. С. 116–122.
19. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике: Электричество и магнетизм. Т. 5. М.: Мир. 1977. 304 с.

REFERENCES

- [1] Shibkov V.M., Aleksandrov A.F., Ershov A.P., Timofeev I.B., Chernikov V.A., Shibkova L.V. Freely localized microwave discharge in a supersonic gas flow. *Plasma Phys. Rep.*, 2005, vol. 31, no. 9, pp. 795–801.
- [2] Shibkov V.M., Aleksandrov A.F., Ershov A.P., Karachev A.A., Konstantinovskiy R.S., Timofeev I.B., Chernikov V.A., Shibkova L.V. Inflammation of the supersonic flow of hydrocarbon fuels using microwave discharges. *Moscow Univ. Bull., Ser. 3, Phys. Astron.*, 2004, no. 5, pp. 67–69.
- [3] Artana G., D’Adamo J., Leger L. Flow control with electrohydrodynamic actuators. *AIAA Paper*, 2001, no. 2001-0351, Reno, Nevada.
- [4] Leonov S., Gromov V., Kuriachy A., Yarantsev D. Mechanisms of flow control by near-surface electric discharge generation. *AIAA Paper*, 2005, no. 2005-0780, Reno, Nevada.
- [5] Corke T.C., Post M.L. Overview of plasma flow control: concepts, optimization and applications. *AIAA Paper*, 2005, no. 2005-0563, Reno, Nevada.
- [6] Hall K.D., Jumper E.J., Corke T.C., McLaughlin T.E. Potential. Flow model of a plasma actuator as a lift enhancement device. *AIAA Paper*, 2005, no. 2005-0783, Reno, Nevada.
- [7] Kuryachii A.P., Rus’yanov D.A., Skvortsov V.V., Chernyshev S.L. Modeling the system of electrogasdynamic final-control elements. *Fluid Dyn.*, 2011, vol. 46, no. 5, pp. 764–774. doi: 10.1134/S0015462811050103.
- [8] Nevar E.A., Savastenko N.A., Bryuzer V., Lopatik D.A., May F., Butsen A.V., Tarasenko N.V., Burakov V.S. Plasma synthesis and treatment of nanosized chalcopyrite particles. *J. Appl. Spectrosc.*, 2010, vol. 77, no. 1, pp. 126–131. doi: 10.1007/s10812-010-9303-y.
- [9] Burakov V.S., Tarasenko N.V., Butsen A.V., Nedelko M.I., Nevar A.A. Laser and plasma methods of fabrication and magnetic properties of gadolinium silicide nanopowders. *Probl. Fiz. Mat. Tekh.* [Probl. Phys. Math. Technol.], 2011, no. 2 (7), pp. 22–25 (in Russ.).

- [10] Lunin V.V., Popovich M.P., Tkachenko S.N. Fizicheskaya khimiya ozona [Physical chemistry of ozone]. Moscow, MGU Publ., 1998. 480 p.
- [11] Andreev V.V., Vasil'eva L.A., Kravchenko G.A., Pichugin Yu.P., Filippov V.G. The results of studies of the barrier discharge structure. *Nelineynyy Mir* [Nonlinear World], 2009, vol. 7, no. 11, pp. 811–819 (in Russ.).
- [12] Andreev V.V., Vasilyeva L.A., Matyunin A.N., Pichugin Yu.P. Investigation of the barrier discharge structure near the electrode with a cylindrical cross section. *Plasma Phys. Rep.*, 2011, vol. 37, no. 13, pp. 1190–1195. doi: 10.1134/S1063780X11090017.
- [13] Pichugin Yu.P. The relevance and effectiveness of multi-barrier ozone generators. *Mater. 25 Vseross. Semin. "Ozon i drugie ekologicheskii chistye okisliteli. Nauka i tekhnologii"* [Proc. 25th All-Russ. Semin. "Ozone and other environmentally friendly oxidizers. Science and technology"], 2003. pp. 36–47 (in Russ.).
- [14] Samoylovich V.G., Gibalov V.I., Kozlov K.V. Fizicheskaya khimiya bar'ernogo razryada [Physical chemistry of the barrier discharge]. Moscow, MGU Publ., 1989. 176 p.
- [15] Cieplak T., Yamabe C., Olchowik J.M., Ozonек J. Analysis of the process of ozone generation and micro-channel intensity distribution by the discharge analysis method. *Mater. Sci.-Poland*, 2006, vol. 24, no. 4, pp. 1087–1093.
- [16] Sokolova M.V. Optimization of the formation of ozone in an electric discharge. *Izv. Akad. Nauk SSSR, Otd. Tekh. Nauk, Energ. Avtom.* [Bull. Acad. Sci. USSR, Tech. Sci. Sec., Power Eng. Autom.], 1983, no. 6, pp. 99–107 (in Russ.).
- [17] Rayzer Yu.P. Fizika gazovogo razryada [Physics of gas discharge]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 592 p.
- [18] Andreev V.V., Vasil'eva L.A. Investigation of the surface barrier discharge generated by the electrodes in the form of a series of parallel metal strips. *Prikl. Fiz.* [Appl. Phys.], 2012, no. 6, pp. 116–122 (in Russ.).
- [19] Feynman R.P., Leighton R.B., Sands M. The Feynman lectures on physics. Vol. 2. Addison-Wesley, 1964. 534 p. (Russ. ed.: Feynman R., Leyton R., Sands M. Feynmanovskie lektzii po fizike: Elektrichestvo i magnetizm. T. 5. Moscow, Mir Publ., 1977. 304 p.).

Статья поступила в редакцию 14.05.2013

Всеволод Владимирович Андреев — канд. физ.-мат. наук, заведующий кафедрой “Телекоммуникационные системы и технологии” Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова. Автор около 390 научных работ в области физики низкотемпературной плазмы, барьерного диэлектрического разряда, реакционно-диффузионных процессов в пористых катализаторах, физики поверхности, математического моделирования процессов и явлений в физико-химических, технических и социально-экономических системах.

Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, Российская Федерация, 428015, Чебоксары, Московский пр., д. 15.

V.V. Andreev — Cand. Sci. (Phys.-Math.), head of “Telecommunication Systems and Technologies” department of the Ul'yanov Chuvash State University, Cheboksary, Russian Federation. Author of about 390 publications in the field of low-temperature plasma physics, barrier dielectric discharge, reaction-diffusion processes in porous catalysts, physics of surfaces, mathematical simulation of processes and phenomena in physicochemical, technical, and socioeconomical systems.

Ul'yanov Chuvash State University, Moskovskii pr., 15, Cheboksary, 428015 Russian Federation.