

УДК 537.523.9

Ю. В. Маношкин, А. А. Плотников

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Резистивно-барьерный разряд в атмосфере при малых разрядных промежутках для системы электродов «игла–плоскость»

Приведены результаты экспериментальных исследований резистивно-барьерного разряда (РБР) при нормальных лабораторных условиях ($P = 1$ атм, $T = 300$ К, $H = 40\%$), в котором некоронирующий электрод покрыт слоем плохопроводящего материала (резистивным барьером) проводимости $\delta \sim 10^{-6}$ (Ом·м) $^{-1}$. Введение резистивного барьера позволяет реализовать устойчивый разряд при малых разрядных промежутках (менее 3 мм), что невозможно в обычном коронном разряде. Исследованы средние вольт-амперные, временные и пространственные характеристики РБР.

Ключевые слова: газовый разряд, резистивный барьер, система электродов «игла–плоскость».

Yu. V. Manoshkin, A. A. Plotnikov

Moscow Institute of Physics and Technology

Resistive-barrier discharge in atmosphere for short interelectrodes gaps for «needle-to-plate» system

The results of experimental investigations of the resistive barrier discharge (RBD) in normal laboratory conditions ($P = 1$ атм, $T = 300$ К, $H = 40\%$) are given. The resistive-barrier discharge is different from the standard corona discharge with similar electrodes' geometry. The noncoroning electrode is covered by a layer of low-conductive material (electrical conductivity $\delta \sim 10^{-6}$ (Ом·м) $^{-1}$). The resistive barrier helps us to form stable discharge for short inter-electrodes gaps (less than 3 mm), which is impossible in the standard corona discharge. Current voltage, temporal and spatial characteristics are investigated.

Key words: Gas discharge, resistive barrier, «needle-to-plate» system.

1. Введение

Давно известно [1], [2], что коронный разряд (КР) в атмосфере при нормальных условиях ($P = 1$ атм, $T \approx 300$ К, газ неподвижен) не может существовать при разрядных промежутках менее $g = 3 \div 4$ мм, т.к. он быстро переходит в искровой сильнотоковый режим.

Устранить такой резкий переход удалось в диэлектрическом барьерном разряде (ДБР), в котором между электродами установлены один или два слоя диэлектрика (см. обзор [3], 357 библиографических ссылок). ДБР широко используется в различных приложениях (генерация озона [4], обработка поверхностей [5], медицинские устройства [6]). В последнее 20-летие ДБР интенсивно исследуется с целью управления потоками в аэродинамике [7]–[11].

Несмотря на простоту конструкции, исследование динамики процессов в ДБР сильно осложнено невозможностью получения разряда на постоянном токе. Это обстоятельство привело к поиску замены диэлектрического (непроводящего) барьера на резистивный (слабопроводящий) барьер и появлению исследований резистивно-барьерного разряда (РБР) [12]. Постоянное питающее напряжение позволяет четко идентифицировать физические процессы, происходящие при смене полярности, и провести их детальное сравнение.

Устраняется нестационарность амплитуды напряжения и ее влияние на характеристики разряда. Облегчаются технические проблемы, связанные с разработкой источника питания. В нашей работе исследуется РБР в воздухе при нормальных условиях для конфигурации электродов игла–плоскость при разрядных промежутках $g < 3$ мм.

Проведено физическое обоснование при выборе удельной проводимости материала барьера и геометрических характеристик электродов.

2. Выбор параметров резистивного барьера и геометрии электродной системы

Основным критерием при выборе материала резистивного барьера является уменьшенное время релаксации носителей по сравнению с временем пролета наиболее медленного носителя заряда в разряде (иона). Для оценки можно принять скорость иона ≈ 100 м/с, т.к. максимальное рабочее напряжение при малых разрядных промежутках не превышает 5÷6 кВ. Соответствующая напряженность электрического поля – порядка 10^6 В/м. Литературные данные по подвижностям ионов в воздухе имеют большой разброс, и их среднее значение можно принять порядка 10^{-4} м² · (Вт · с)⁻¹. Соответствующие времена пролета для зазоров 1 ÷ 3 мм будут $\approx 10^{-5}$ с. Время релаксации носителей в барьере, связанное с проводимостью, можно оценить по формуле

$$\tau = \varepsilon_0 / \delta,$$

где $\varepsilon_0 = 8,8 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, δ – удельная проводимость материала барьера. В таком случае требуемая проводимость должна быть порядка 10^{-6} См ((Ом · м)⁻¹). Керамические материалы с такой проводимостью и хорошими теплофизическими и механическими параметрами не используются в современной электронике. Мы использовали некоторые марки высокочастотных ферритов, обладающих подходящей удельной проводимостью. Однако этот параметр не является определяющим для производителей магнитных материалов, поэтому имеет большой технологический разброс. Это обстоятельство требует проведения индивидуального контроля проводимости при различных энергетических режимах. Эксперименты показали, что проводимость таких материалов изменяется нелинейно в зависимости от плотности протекающего тока. Возможно это связано с объемными тепловыми эффектами.

Важным фактором является подбор геометрии коронирующего и некоронирующего электродов. В общем случае при атмосферном давлении в воздухе коронный разряд формируется в виде отдельных шнуров (англ. Filament), возникающих в случайных точках и в различные моменты времени. Это обстоятельство осложняет проведение сравнения многочисленных экспериментов и адекватного теоретического анализа. Для обеспечения одношнурового режима в геометрии электродов игла–плоскость необходимо выполнять определенные соотношения между геометрическими масштабами: энергетической длиной пробега электрона (l_0), диаметром кончика иглы (r_0), разрядным промежутком (g) и характерной длиной прилипания электрона к молекуле (a) (в случае электроотрицательных газов). Резистивный барьер выполняется в виде плоской пластины толщиной в несколько мм, покрывающей некоронирующий металлический электрод. Рабочая поверхность барьера шлифуется и очищается перед каждым экспериментом.

Энергетическая длина пробега (ионизационная длина) l_0 соответствует интервалу, на котором электрон набирает энергию, достаточную для ионизации молекулы газа ($U_i \approx 15$ эВ). Эту длину можно оценить на основе соотношения, полученного в [13]:

$$l_0 = \frac{l}{\alpha} = \frac{10^{-7}}{2 \cdot 10^{-3}} = 50 \text{ мкм},$$

где l – длина свободного пробега электрона, а α – коэффициент потери энергии при столкновениях с молекулами азота. Величина l_0 определяет характерный масштаб области

ионизации, который отмечался только в некоторых экспериментальных работах [14], [15]. Оптимальным по плотности тока будет коронирующий электрод с $r_0 = l_0$ [16]. Для обеспечения устойчивого одношнурового режима требуется устранить возможность одновременного появления нескольких токовых шнуров на игле (рис. 1), чему соответствует малость параметра r_0/g ($\lesssim 0.1$). Выполнение этого условия позволяет работать при разрядных промежутках $g = 1 \div 3$ мм.

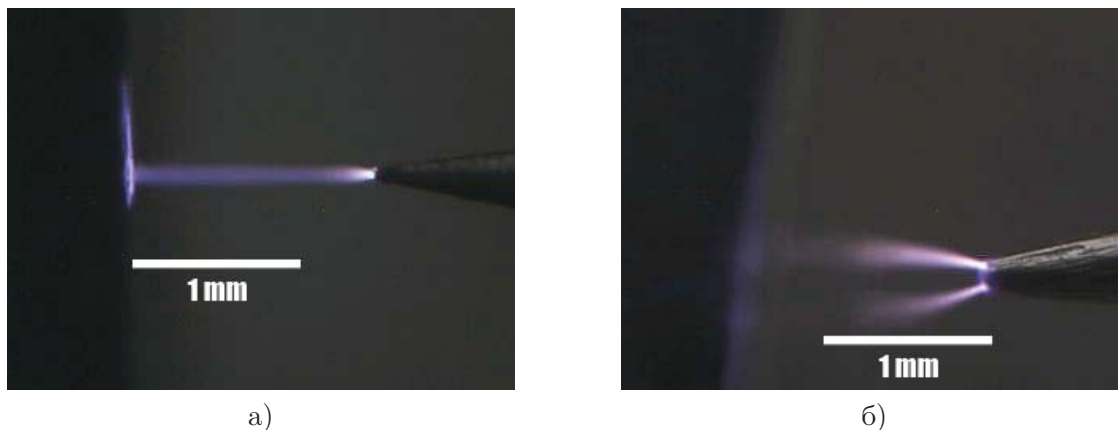


Рис. 1. Влияние размера кончика иглы в положительном РБР: а – стационарная структура на тонкой игле, б – нестационарная структура на толстой игле

3. Описание установки

На рис. 2 представлена схема экспериментальной установки. В качестве источника высокого напряжения использовался высоковольтный источник ВС-23 с максимальным напряжением 10 кВ, максимальным током 5 мА и стабильностью напряжения 0,1%. Делитель напряжения имеет коэффициент 1000:1. Микроамперметр типа М244 многопредельный, осциллограф в виде приставки к ПК Picoscope с полосой пропускания 10 МГц на измерительном сопротивлении 44 кОм. Пространственные характеристики разряда исследуются с помощью цифровой насадки на микроскоп ДСМ35. Фокусное расстояние объектива микроскопа – 15 мм. Длина разрядного промежутка регулируется за счет перемещения иглы, установленной на линейный координатник с ценой деления 10 мкм. В схему подключено балластное сопротивление 7.5 МОм. Используются иглы из нержавеющей стали с диаметром закругления кончика 80 мкм.

4. Экспериментальные результаты

Типичная ВАХ РБР в зоне со стабильными и средним характеристиками приведена на рис. 3 (здесь и далее обозначение g соответствует длине разрядного промежутка). При коронирующем аноде (положительный РБР) вольт-амперная характеристика смещена в сторону большего питающего напряжения по сравнению с отрицательным РБР, что обусловлено различиями в процессе ионизации и другим поведением носителей заряда. Закономерности аналогичны таковым в коронном разряде – процессы, происходящие около коронирующего электрода, практически идентичны.

4.1. Влияние полярности

В случае отрицательной короны (рис. 4а) затравочные электроны отталкиваются сильным электрическим полем от иглы. При достаточной напряженности электрического поля энергия электронов становится достаточной для ионизации. Положительные ионы, падая на катод, могут выбивать дополнительные электроны путем вторичной эмиссии.

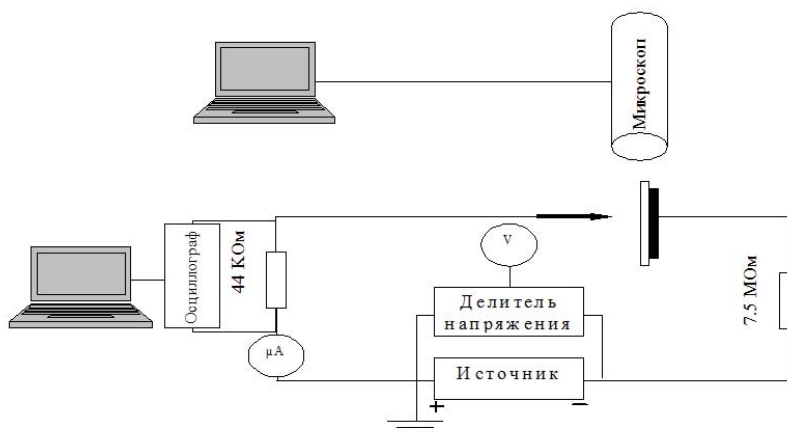


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

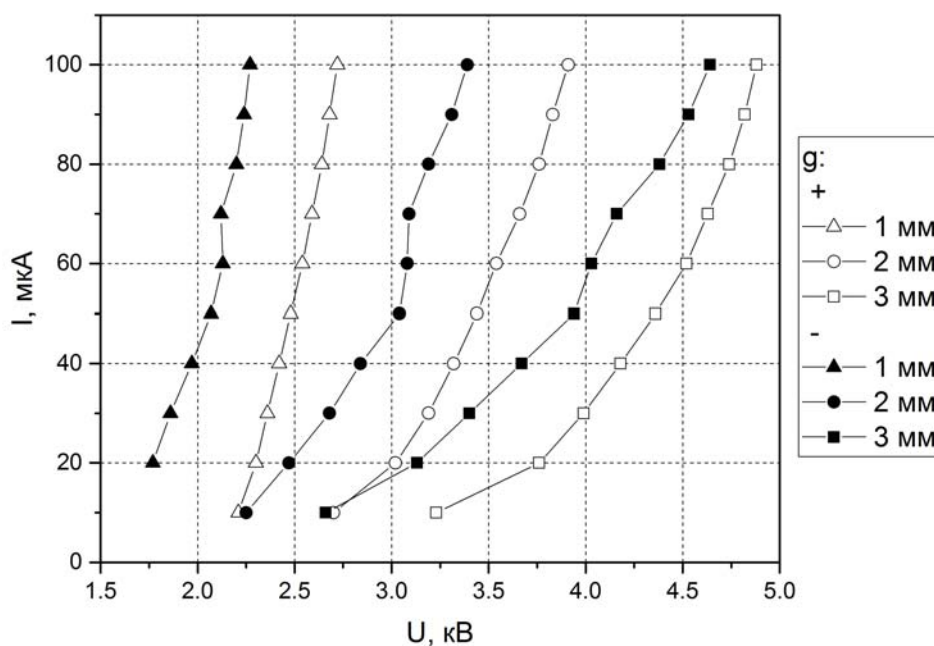


Рис. 3. ВАХ разряда

При положительной короне (рис. 4б) затравочные электроны, находящиеся слишком близко к игле, уже не могут участвовать в ионизации, т.к. попадают на анод, не успев передать свою энергию нейтральным частицам. Электронные лавины вызываются затравочными электронами, находящимися на достаточном расстоянии от иглы, а следовательно, и в меньшем поле. Это приводит к увеличению напряжения пробоя в сравнении с отрицательным разрядом. Заштрихованная область на рисунке показывает начальный участок токового шнура в обоих случаях, однако следует иметь в виду, что токовый шнур в отрицательном РБР на начальном участке практически не виден (см. фото, рис. 5б).

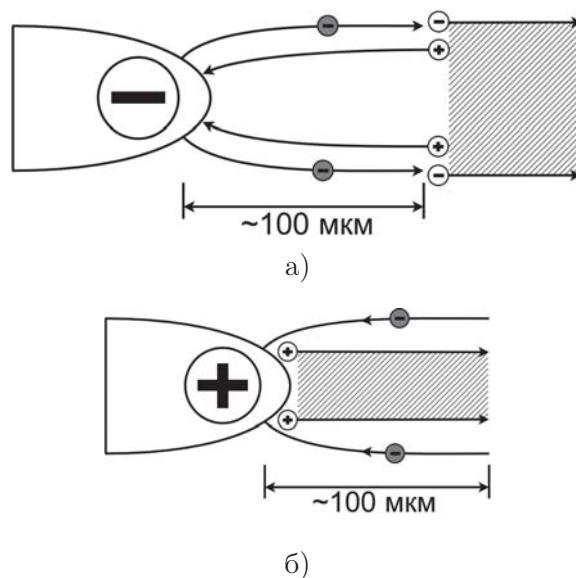


Рис. 4. Поведение частиц около кончика иглы: а – отрицательный разряд, б – положительный разряд

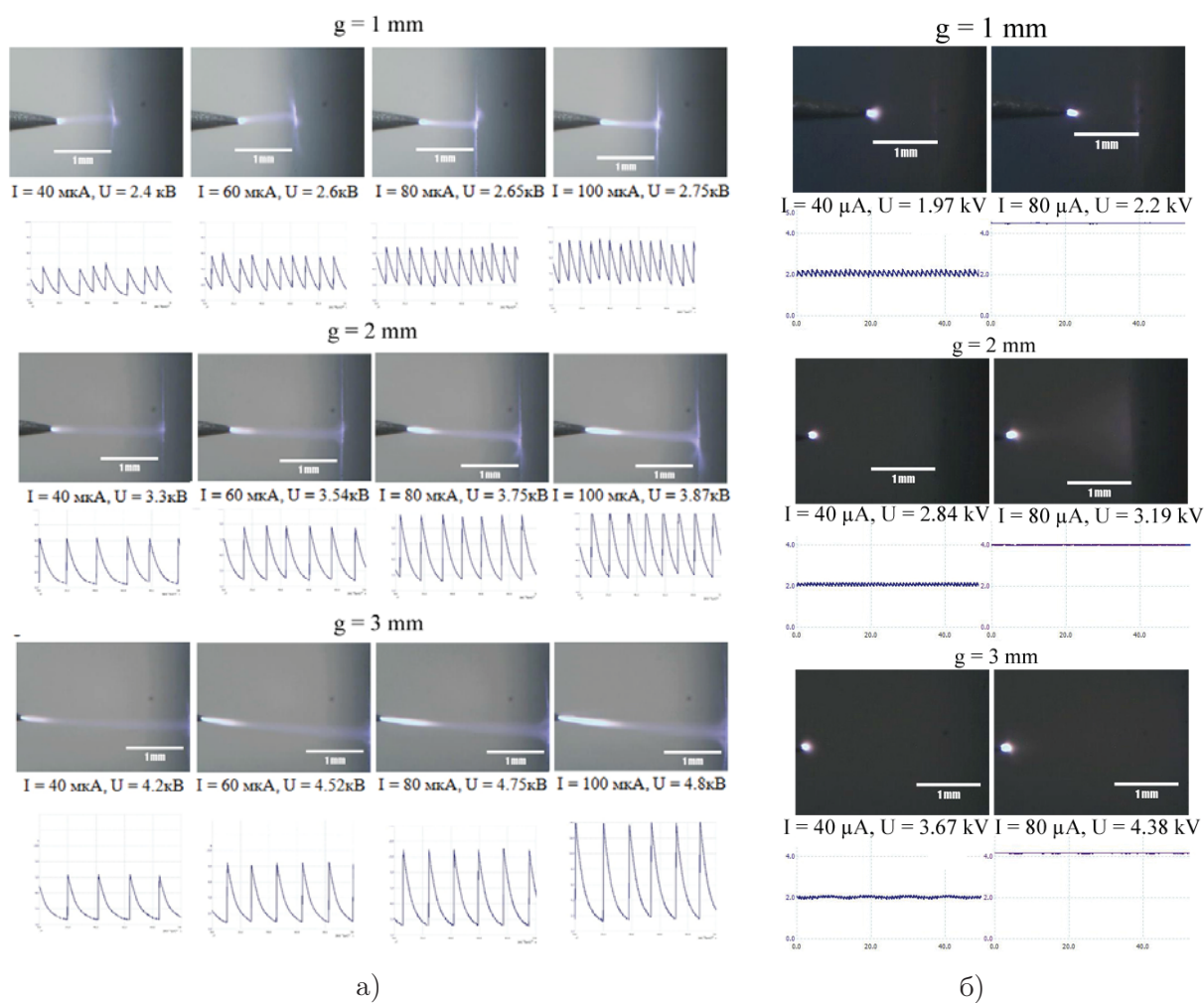


Рис. 5. Пространственные и временные характеристики: а – положительный РБР, б – отрицательный РБР

На рис. 5а приведены фотографии разрядов с соответствующими временными характеристиками тока (не в масштабе) при положительном РБР. Временные характеристики

сняты с измерительного сопротивления 44 кОм. Заметен импульсный характер разряда. Появившиеся в зоне ионизации заряды ослабляют электрическое поле электродов и блокируют ионизацию до ухода на достаточное расстояние. Этим объясняется появление задержек между импульсами тока. При этом резкий передний фронт соответствует попаданию электронов на иглу. Положительные ионы имеют значительно меньшую подвижность, а также замедляются при ослаблении напряженности поля по мере удаления от иглы. Этим обуславливается плавное затухание заднего фронта импульса.

На рис. 5б приведены фотографии разрядов с соответствующими временными характеристиками тока (не в масштабе) при отрицательном РБР. Вид временных характеристик можно объяснить так же, как и в случае положительного разряда, однако следует иметь в виду, что электроны обладают большей подвижностью, что приводит к уменьшению амплитуды импульсов и увеличению частоты их следования.

Стоит отметить, что при пролете расстояния порядка нескольких мм электроны начинают прилипать к нейтральным частицам воздуха с образованием отрицательных ионов – электронная проводимость сменяется ионной. В нашем случае этот эффект и вызываемые им явления незначительны ввиду малости разрядного промежутка.

Средняя глубина модуляции, т.е. отношение амплитуды импульсов к постоянной составляющей в положительном РБР, близка к 2, а в отрицательном – $0,1 \div 0,2$.

На рис. 6 изображена зависимость частоты следования импульсов от силы тока, регистрируемой амперметром, при положительном РБР для различных разрядных промежутков. Для зависимостей приведена линейная аппроксимация. При напряжениях, немного больших напряжения пробоя, появление импульсов процесса ионизации является менее регулярным, что приводит к нестабильной зависимости при малых значениях тока.

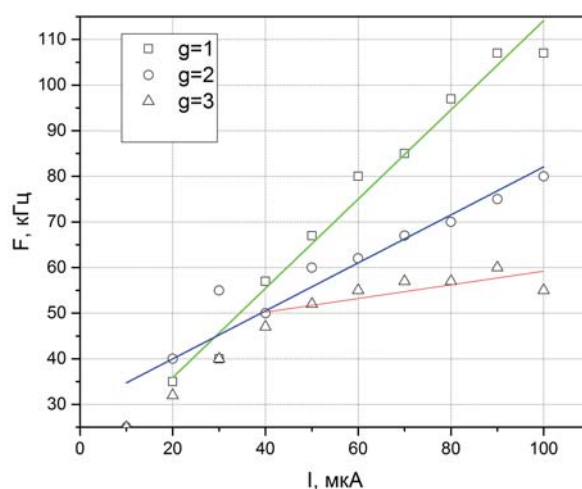


Рис. 6. Зависимость частоты следования импульсов от тока, снимаемого амперметром, в положительном РБР

4.2. Пространственные характеристики

Исследование пространственных характеристик заряда проводилось оптическими методами с использованием цифрового микроскопа. Судя по спектральным характеристикам [17], [18], свечение в разряде вызывают частицы азота, возбужденные столкновениями с разогнанными полем носителями тока. Таким образом, по интенсивности свечения можно оценивать концентрацию и энергию носителей тока в различных местах.

При сравнении фотографий положительного и отрицательного разрядов заметна различная форма свечения. В положительном случае частицы движутся узким «шнуром»,

тогда как в отрицательном они разлетаются на значительно большие углы. Это вызвано тем, что подвижность электронов много больше подвижности ионов, и при том же потенциале отталкивания они получают большую поперечную скорость. Так же объясняется и большая интенсивность свечения токового шнура в положительном разряде – концентрация заряженных частиц в нем выше, чем в отрицательном случае.

Другим влиянием полярности является изменение размеров области яркого свечения при росте напряжения в положительном РБР. В отрицательном РБР эта область практически не меняет своих размеров, в положительном же – вытягивается в сторону контактного электрода.

Отметим, что наши эксперименты проводились при токах менее 100 мкА. При больших величинах тока разряд, как видно из ВАХ, теряет устойчивость и может перейти в другую форму – тлеющий и затем искровой разряд. Этот процесс требует отдельного изучения.

5. Заключение

В работе были проведены исследования характеристик резистивного барьерного разряда, показана его стабильность в разрядных промежутках от 1 до 3 мм. ВАХ ведут себя похожим образом с коронным разрядом, с уменьшением требуемого напряжения до уровня менее 5 кВ вследствие меньшей длины разрядного промежутка.

Временные характеристики нестационарные и регулярные, определяются в основном временем пролета между электродами носителей заряда.

Литература

1. *Канцов Н.А.* Электрические явления в газах и вакууме. М.: Гостехиздат, 1950. С. 636–641.
2. *Мук Д., Крэгс Д.* Электрический пробой в газах. М.: Изд-во ИЛ, 1960. С. 605.
3. *Brandenburg R.* Dielectric barrier discharges: progress on plasma sources and on the understanding of regimes and single filaments // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2017. V. 26, N 5, 053001.
4. *Kogelschatz U.* Dielectric-barrier discharges: their history, discharge physics, and industrial applications // *Plasma Chem Plasma Process.* 2003. V. 23, I. 1. P. 1–46.
5. *Belmonte T., Arnoult G., Henrion G., Gries T.* Nanoscience with non-equilibrium plasmas at atmospheric pressure // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2011. V. 44, N 36. 363001.
6. *Graves D.* Low temperature plasma biomedicine: A tutorial review // *Physics of Plasmas.* 2014. V. 21, 080901.
7. *Roth J.R., Sherman D.M. and Wikinson S.P.* Electrohydrodynamic flow control with a glow discharge surface plasma // *AIAA J.* 2000. V. 28, N 7, P. 1166–72.
8. *Bletzinger P., Ganguly B.N., Van Wie D., Garscadden A.* Plasmas in high speed aerodynamics // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2005. V. 38, N 4, P. R33–R57.
9. *Corke T.C., Post M.L., Orlov D.M.* Single dielectric barrier discharge plasma enhanced aerodynamics: physics, modeling and applications // *Exp Fluids.* 2009. V. 46, I. 1. P. 1–26.
10. *Benard N., Moreau E.* Electrical and mechanical characteristics of surface AC dielectric barrier discharge plasma actuators applied to airflow control // *Exp Fluids.* 2014. V. 55, I. 11. 1846.
11. *Kotsonis M.* Diagnostics for characterization of plasma actuators // *Meas Sci Technol.* 2015. V. 26, N 9. 092001.
12. *Laroussi M. Alexeff I.* The resistive barrier discharge (RBD) // *Plasma Science IEEE Transactions on.* 2001. V. 30, I. 1. P 158–159.

13. *Базелян Э.М., Райзер Ю.П.* Искровой разряд. М.: Изд-во МФТИ. 1997.
14. *Iza F., Kim G.J., Lee S.M., Lee J.K., Walsh J.L., Zhang Y.T., Kong M.G.* Microplasmas: Sources, Particle Kinetics, and Biomedical Applications // *Plasma Process Polym.* 2008. V. 5, I. 4. P 322–344.
15. *Fridman A., Chirokov A., Gutsol A.* Non-thermal atmospheric pressure discharges // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2005. V. 38, N 2. P R1–R24.
16. *Lama W., Gallo C.* Systematic study of the electrical characteristics of the «Trichel» current pulses from negative needle-to-plate coronas // *J. Appl. Phys.* 1974. V. 45, I. 1. P 103–113.
17. *Ono R.* Optical diagnostics of reactive species in atmospheric-pressure nonthermal plasma // *J. Phys. D: Appl. Phys.* — 2016. — V. 49, N. 8, 083001.
18. *Bruggeman P.J., Sadeghi N., Schram D.C., Linss V.* Gas temperature determination from rotational lines in non-equilibrium plasmas: a review // *Plasma Sources Sci Technol.* 2014. V. 23, N 2. 023001.

References

1. *Kaptsov N. A.* Electric phenomenas in gases and vacuum. M.: Gostechizdat, 1950. P. 636–641. (in Russian).
2. *Mick J., Krags J.* Electric breakdown in gases. M.: Foreign literature publishing, 1960. P. 605. (in Russian).
3. *Brandenburg R.* Dielectric barrier discharges: progress on plasma sources and on the understanding of regimes and single filaments. *Plasma Sources Sci. Technol.* 2017. V. 26, N 5, 053001.
4. *Kogelschatz U.* Dielectric-barrier discharges: their history, discharge physics, and industrial applications. *Plasma Chem Plasma Process.* 2003. V. 23, I. 1. P. 1–46.
5. *Belmonte T., Arnoult G., Henrion G., Gries T.* Nanoscience with non-equilibrium plasmas at atmospheric pressure. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2011. V. 44, N 36. 363001.
6. *Graves D.* Low temperature plasma biomedicine: A tutorial review. *Physics of Plasmas.* 2014. V. 21, 080901.
7. *Roth J.R., Sherman D.M. and Wikinson S.P.* Electrohydrodynamic flow control with a glow discharge surface plasma. *AIAA J.* 2000. V. 28, N 7, P. 1166–72.
8. *Bletzinger P., Ganguly B.N., Van Wie D., Garscadden A.* Plasmas in high speed aerodynamics. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2005. V. 38, N 4, P. R33–R57.
9. *Corke T.C., Post M.L., Orlov D.M.* Single dielectric barrier discharge plasma enhanced aerodynamics: physics, modeling and applications. *Exp Fluids.* 2009. V. 46, I. 1. P. 1–26.
10. *Benard N., Moreau E.* Electrical and mechanical characteristics of surface AC dielectric barrier discharge plasma actuators applied to airflow control. *Exp Fluids.* 2014. V. 55, I. 11. 1846.
11. *Kotsonis M.* Diagnostics for characterization of plasma actuators. *Meas Sci Technol.* 2015. V. 26, N 9. 092001.
12. *Laroussi M. Alexeff I.* The resistive barrier discharge (RBD). *Plasma Science IEEE Transactions on.* 2001. V. 30, I. 1. P 158–159.
13. *Базелян Э.М., Райзер Ю.П.* Искровой разряд. М.: Изд-во МФТИ. 1997.
14. *Iza F., Kim G.J., Lee S.M., Lee J.K., Walsh J.L., Zhang Y.T., Kong M.G.* Microplasmas: Sources, Particle Kinetics, and Biomedical Applications. *Plasma Process Polym.* 2008. V. 5, I. 4. P 322–344.

15. *Fridman A., Chirokov A., Gutsol A.* Non-thermal atmospheric pressure discharges. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2005. V. 38, N 2. P R1–R24.
16. *Lama W., Gallo C.* Systematic study of the electrical characteristics of the «Trichel» current pulses from negative needle-to-plate coronas. *J. Appl. Phys.* 1974. V. 45, I. 1. P 103–113.
17. *Ono R.* Optical diagnostics of reactive species in atmospheric-pressure nonthermal plasma. *J. Phys. D: Appl. Phys.* — 2016. — V. 49, N. 8, 083001.
18. *Bruggeman P.J., Sadeghi N., Schram D.C., Linss V.* Gas temperature determination from rotational lines in non-equilibrium plasmas: a review. *Plasma Sources Sci Technol.* 2014. V. 23, N 2. 023001.

Поступила в редакцию 11.05.2017