

УДК 537.527.9
EDN: ITCGBS

PACS: 52.80.Tn



Исследование влияния частоты вращения диэлектрического диска в ячейке диэлектрического барьерного разряда на активную мощность, потребляемую разрядом в воздухе при атмосферном давлении

В. В. Андреев, Л. А. Васильева, А. Н. Матюнин, А. В. Андреев

Экспериментально исследовано при атмосферном давлении в воздухе влияние угловой скорости вращения диэлектрика в ячейке диэлектрического барьерного разряда (ДБР) на потребляемую активную мощность. Установлена существенная зависимость потребляемой активной мощности ячейкой ДБР от частоты вращения диэлектрического диска. Исследования проводились при напряжении отрицательной полярности на высоковольтном электроде, поскольку ранее было установлено, что при отрицательной полярности озон синтезируется интенсивнее.

Ключевые слова: диэлектрический барьерный разряд, вращающийся диэлектрический барьер, низкотемпературная плазма.

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-3-31-37

Введение

Эффективность и производительность синтеза озона в низкотемпературной плазме, генерируемой в ячейке диэлектрического барьерного разряда (ДБР), зависят от множества факторов, определяющих механизм развития пространственно-временной структуры микроразрядных процессов [1–5]. К таким факто-

рам относятся: пространственно-временная конфигурация электрического поля, геометрическая конфигурация высоковольтных электродов, сопротивление электродов, частота импульсов напряжения высоковольтного источника питания; состав газа и его давление, температура в разрядной ячейке, свойства диэлектрика, а также другие. Кроме того, микроразряды и плазмохимические процессы, протекающие в ячейке ДБР, часто оказывают сильное разрушающее воздействие на диэлектрик [6]. Например, в плазмохимических генераторах озона, действие которых основано на ДБР, синтезируемый озон, являющийся сильным окислителем, и микроразряды, которые развиваются в воздушном зазоре разрядной ячейки, как правило, в направлении поверхностных неоднородностей диэлектрического барьера, в результате одновременных совместных воздействий приводят к быстрому разрушению диэлектрика.

Одним из возможных решений проблемы увеличения долговечности диэлектрика является применение ячеек ДБР с вращающимся диэлектриком [7–9]. Характерной осо-

Андреев Всеволод Владимирович, доцент, к.ф.-м.н.

E-mail: andreev_vsevolod@mail.ru

Васильева Людмила Анатольевна, старший преподаватель.

E-mail: ask_lyuda@mail.ru

Матюнин Алексей Николаевич, доцент, к.т.н.

E-mail: matyunin86@mail.ru

Андреев Александр Всеволодович, студент.

E-mail: zemlyagj@gmail.com

ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И. Н. Ульянова».

Россия, 428015, г. Чебоксары, Московский пр., 15.

Статья поступила в редакцию 27.11.2023

После доработки 12.03.2024

Принята к публикации 04.04.2024

Шифр научной специальности: 1.3.9

© Андреев В. В., Васильева Л. А., Матюнин А. Н., Андреев А. В., 2024

бенностью ДБР в ячейке с вращающимся диэлектриком является то, что он, в отличие от систем ДБР без подвижных частей, возникает и развивается при подаче на металлические электроды высоковольтного напряжения постоянного либо изменяющегося во времени однополярного тока. В этом случае в ячейке ДБР достигается пространственно-временная локализация микроразрядов. Следовательно, микроразряды можно снимать на обычный фотоаппарат [7–9], что позволяет исследовать геометрические размеры отдельных каналов микроразряда. Кроме того, такая конструкция ячейки ДБР с подвижным диэлектриком позволяет сравнительно легко реализовать физические модели для исследования микроразрядных процессов в условиях относительных движений электродных систем, либо в условиях движущегося газового потока.

В последнее время ведутся активные исследования ДБР в системах с подвижными диэлектриком или высоковольтным электродом [10–12]. В работе [10] исследовано пространственно-временное распределение микроразрядов в ячейке ДБР, содержащей вращающиеся электроды. Проанализировано влияние скорости вращения электрода на однородность разряда. В частности, установлено, что при числе оборотов более 3000 об/мин каналы микроразряда практически не изменяются даже при повышении приложенного напряжения и частоты. В работе [11] исследована динамика пространственно-временной эволюции поверхностного пятна заряда в зависимости от скорости движения воздушного потока в ячейке наносекундного импульсного ДБР. Нелинейные характеристики микроразрядных процессов в ДБР при наличии воздушных потоков исследованы в работе [12].

Следует отметить, несмотря на то, что ячейки ДБР с подвижными электродами или с подвижным диэлектрическим барьером обладают весьма интересными и неординарными характеристиками, в настоящее время относительно немного публикаций с исследованиями в этой области. В данной работе исследовано в воздушной среде при атмосферном давлении влияние угловой скорости вращения диэлектрика в ячейке ДБР на потребляемую активную мощность при отрицательной полярности

высоковольтного электрода, между которым и диэлектрическим барьером имеется воздушный газоразрядный промежуток.

Экспериментальная установка

Электрическая схема подключения ячейки ДБР с вращающимся диэлектриком для проведения экспериментов представлена на рисунке 1.

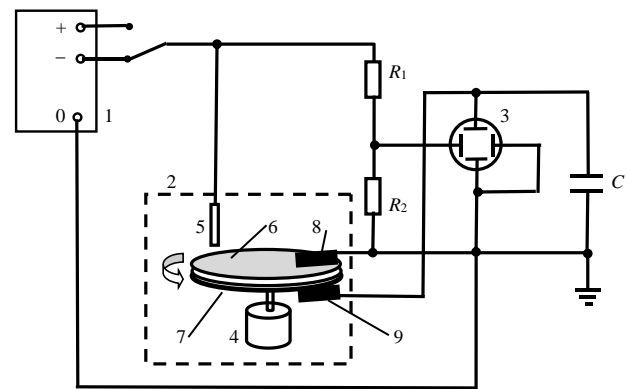


Рис. 1. Электрическая схема установки: 1 – высоковольтный источник однополярного напряжения; 2 – ячейка ДБР; 3 – осциллограф; 4 – электромотор; 5 и 7 – высоковольтные электроды; 6 – вращающийся диэлектрик; 8 и 9 – скользящие металлические электроды

Эксперимент проводился в воздухе при атмосферном давлении. Номиналы резисторов и конденсатора равны: $R_1 = 150 \text{ МОм}$, $R_2 = 16,5 \text{ кОм}$, $C = 0,1 \text{ мкФ}$. Диск-диэлектрик 6 вырезан из фольгированного с одной стороны стеклотекстолита толщиной 1 мм и имеет радиус 5,5 см. Слой фольги имеет чуть меньший радиус 4,5 см и служит одним из электродов 7 разрядной ячейки. Диэлектрик приводится во вращательное движение электромотором 4, число оборотов которого регулируется от 0 до 3500 об/мин. Влажность воздуха равнялась 53 %. Зазор между высоковольтным электродом 5 с цилиндрическим поперечным сечением радиуса 1,25 мм и диэлектрическим барьером 6 регулируется. Электрод 5 может перемещаться также в радиальном направлении. В экспериментах расстояние от центра диэлектрического диска до центра электрода 5 равнялось 3 см. Электрический контакт фольги 7 с проводником, служащим для подсоедин-

нения ячейки ДБР к осциллографу 3 и конденсатору C , осуществляется с помощью скользящего контакта 9. При микроразрядных процессах в ячейке ДБР электрические заряды накапливаются на поверхности диэлектрика 6. В результате они создают электрическое поле, которое препятствует дальнейшему возникновению микроразрядов. Через скользящий электрод 8 эти заряды стекают с поверхности диэлектрика в заземление.

Характеристики ДБР в ячейках с вращающимся барьером сильно зависят от полярности подаваемого на электрод 5 постоянного напряжения [8, 9, 13]. Так, например, в воздухе производительность по озону подобных разрядных ячеек гораздо выше при подаче на электрод 5 постоянного высокого напряжения отрицательной полярности, чем при положительной полярности. В связи с этим в данной работе исследованы процессы при отрицательной полярности электрода 5. Электрическая схема на рисунке 1 предназначена для получения параллелограмма активных потерь Менли [14]. Различные аспекты вычисления потребляемой активной мощности ДБР рассмотрены также в работах [15, 16]. В использованном в наших исследованиях источнике питания на вход подавалось переменное синусоидальное напряжение с частотой 50 Гц и действующим значением 220 В, которое после преобразования в трансформаторе выпрямлялось в однополупериодном выпрямителе без сглаживающих конденсаторов. В результате на электроды ячейки ДБР подавалось однополярное однополупериодное высокое напряжение синусоидальной формы. Это делалось для получения параллелограмма Менли.

Результаты эксперимента и анализ

Ввиду того, что генераторы низкотемпературной плазмы, принцип действия которых основан на ДБР, широко применяются в самых разных областях (синтез озона, биомедицина, разложение загрязняющих веществ, преобразование энергии, модификация поверхностей материалов, технологии плазменного травления и др.), возникает необходимость исследовать способы оптимизации

работы разрядной ячейки с точки зрения минимизации активной потребляемой мощности при наибольшей эффективности конкретного плазменного или плазмохимического процесса. ДБР в ячейке с вращающимся диэлектриком, как отмечено выше, обладает свойствами, которые не наблюдаются в разрядных ячейках с неподвижным диэлектриком. Проанализируем влияние в воздушной среде при атмосферном давлении угловой скорости вращения диска-диэлектрика на потребляемую ячейкой ДБР активную мощность. На рисунке 2 представлены фотографии ДБР. На рисунке 2*а* угловая скорость диска-диэлектрика из стеклотекстолита 3000 об/мин. На высоковольтном электроде 5 действующее значение отрицательного однополупериодного напряжения равно -5 кВ в случае рисунка 2*а*, 2*б*, 2*в*, 2*г*, а в случае рисунка 2*д*, 2*е* и 2*ж* – -3,5 кВ. Видно, что происходит пространственная локализация каналов отдельных микроразрядов, что позволяет фотографировать ДБР на обычный фотоаппарат несмотря на то, что каждый отдельный микроразряд длится несколько десятков наносекунд. Сформированный пространственно-локализованный канал микроразрядов отклоняется против направления вращения диэлектрика. С ростом угловой скорости увеличивается интенсивность свечения ДБР. При увеличении абсолютной величины действующего значения напряжения на электроде 5 возрастает поперечный размер приборьерного пятна канала ДБР вблизи поверхности диэлектрика, а также повышается угол отклонения канала. Следует отметить, что пространственная геометрия отдельного канала ДБР исследована ранее, в частности, в работах [7–9]. Промежуток времени между отдельными микроразрядами в канале ДБР согласно работе [17] определяется по формуле

$$\tau = d / (\omega r). \quad (1)$$

Здесь ω – угловая скорость диска-диэлектрика; d – диаметр приборьерного пятна пространственно-локализованного канала ДБР; r – расстояние от центра диска-диэлектрика до центра приборьерного пятна канала ДБР. Таким образом, с увеличением произведения ωr уменьшается интервал времени

между последовательными импульсами микроразрядов и, следовательно, повышается число микроразрядов в канале в единицу времени. Следствием этого является более яркое свечение канала ДБР на рисунках 3, 4 при увеличении ω . В то же время величина d сама является функцией параметров, характеризующих ДБР. Поэтому в экспериментах нет

прямой зависимости в соответствии с формулой (1) между величинами d и τ . Как следует из экспериментальных данных, представленных на рисунках 3 и 4, с ростом абсолютной величины действующего значения отрицательного напряжения на электроде 5 повышаются как интенсивность свечения канала, так и диаметр его приборьерной части d .

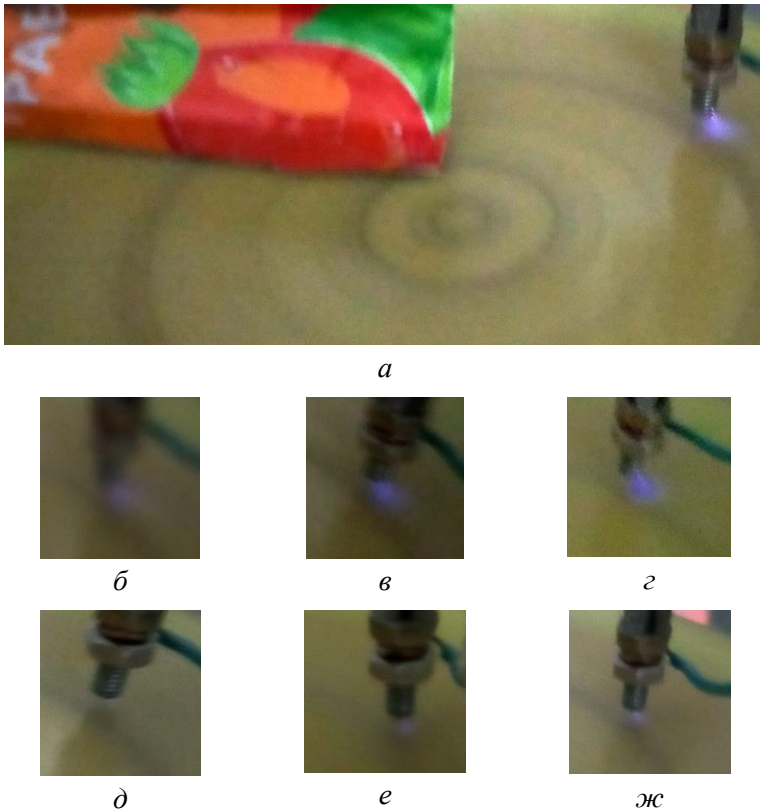


Рис. 2. ДБР в воздушном промежутке при атмосферном давлении в ячейке с вращающимся диском-диэлектриком: а – справа ДБР, слева заземлённый скользящий электрод в виде тонкой алюминиевой полоски с цветным рисунком на ее верхней поверхности, обозначенный номером 8 на рис. 1. Частота вращения диэлектрического барьера: 1500 об/мин (б, д), 2500 об/мин (в, е), 3500 об/мин (з, ж). Диск вращается против часовой стрелки

На рисунке 3 представлены параллелограммы Менли при действующих значениях напряжения -3,5 и -5 кВ и частоте вращения диска-диэлектрика 3000 об/мин. Видно, что площадь параллелограмма на рисунке 3а существенно выше, чем на рисунке 3б. Следовательно, в первом случае потребляемая ДБР активная мощность также выше. На рисунке 4 представлены зависимости потребляемой активной мощности от частоты оборотов диска-диэлектрика в ячейке ДБР. Потребляемая активная мощность вычислялась следующим образом: сначала определялась площадь па-

раллелограмма; затем найденная площадь умножалась на величину

$$UC / (0,02(1 + R_2 / R_1)).$$

В результате получается мощность в ваттах (или в производных величинах). Здесь U – абсолютная величина действующего значения напряжения на высоковольтных электродах. В знаменателе величина 0,02 является периодом однополярного однополупериодного синусоидального напряжения на электродах ячейки.

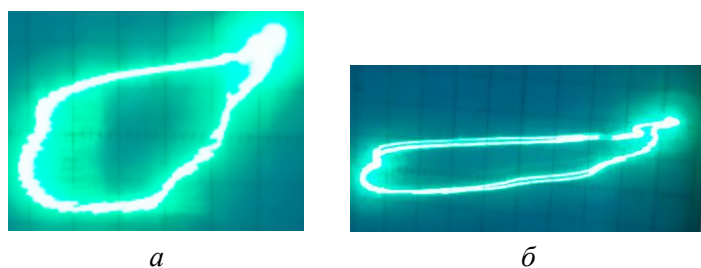


Рис. 3. Фигуры Менли при числе оборотов диэлектрического диска 3000 об/мин. Действующие значения напряжения -5 кВ (а) и -3,5 кВ (б). Масштаб по вертикали 100 мВ/деление (а) и 50 мВ/деление (б), по горизонтали – 50 мВ/деление (а) и 20 мВ/деление (б)

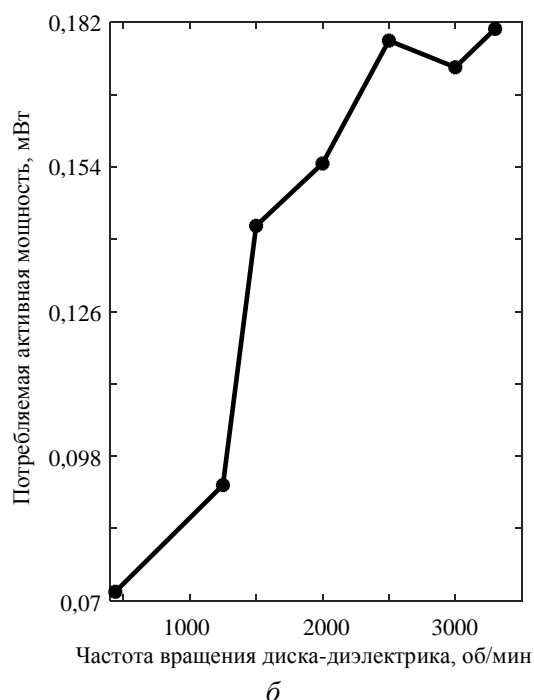
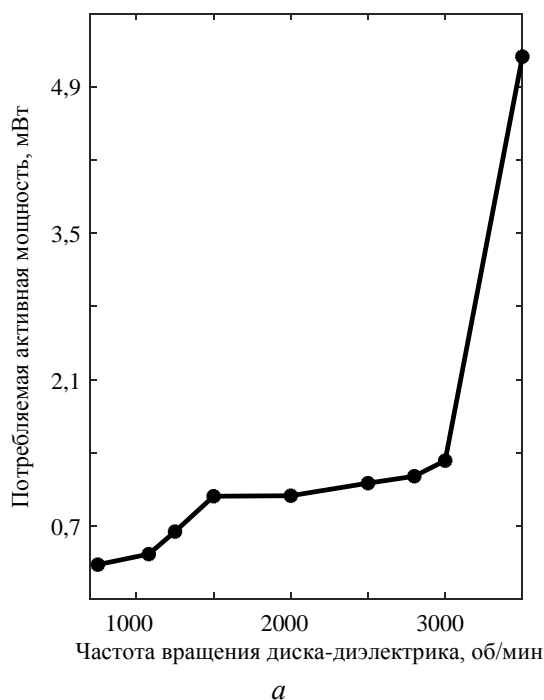


Рис. 4. Зависимость потребляемой активной мощности ячейкой ДБР от частоты вращения диэлектрического барьера при действующих значениях напряжения на высоковольтном электроде -5 кВ (а) и -3,5 кВ (б)

Зависимости на рисунке 4 снижаются до нуля с уменьшением угловой скорости диэлектрического диска. На рисунке 4а в области частот вращения диска-диэлектрика от 1500 об/мин до 3000 об/мин имеется почти горизонтальное плато, на котором мощность активных потерь слабо меняется в окрестности 1,5 мВт. Аналогичное плато на рисунке 4б начинается при частотах вращения от 2500 об/мин. Для полученных экспериментальных данных, таким образом, плато с уменьшением действующего значения напряжения на электродах смещается в область больших угловых скоростей.

Заключение

Проведённые как ранее [7–9], так и в данной работе исследования показывают, что ДБР, осуществляемый в ячейке с вращаю-

щимся диэлектриком, обладает рядом заслуживающих внимание особенностей. Установлено, что потребляемая ячейкой ДБР активная мощность существенным образом зависит как от частоты вращения диска-диэлектрика, так и от приложенного к электродам высоковольтного напряжения. Канал микроразряда под высоковольтным электродом отклоняется против направления вращения диска. В дальнейшем планируется проведение эксперимента с целью определения зависимости количества синтезированного озона от частоты вращения диска-диэлектрика для разных напряжений, приложенных к электродам, а также при различных электрофизических и геометрических параметрах разрядной ячейки.

Необходимо отметить, что оптимизация ДБР с точки зрения снижения мощности активных потерь при как можно более высокой эффективности / производительности плаз-

менного или плазмохимического процесса требует проведения отдельных исследований для каждого конкретном случае. Например, во многих случаях электрическое поле имеет нижнюю и верхнюю границы напряжённости, в которых процесс протекает наиболее эффективно. Таким образом, требуется согласовать между собой разнообразные физико-химические, электрофизические, энергетические, технико-экономические и другие факторы, определяющие и характеризующие процесс в ячейке ДБР.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соколова М. В. / Известия Академии Наук СССР. Энергетика и транспорт. 1983. № 6. С. 99–107.
2. Андреев В. В., Васильева Л. А. / Прикладная физика. 2012. № 6. С. 116–122.
3. Андреев В. В., Матюнин А. Н., Пичугин Ю. П. / Прикладная физика. 2014. № 3. С. 39–42.
4. Лунин В. В., Попович М. П., Ткаченко С. Н. Физическая химия озона. – М.: Изд-во МГУ, 1998.
5. Самойлович В. Г., Гибалов В. И., Козлов К. В. Физическая химия барьерного разряда. – М.: Изд-во МГУ, 1989.
6. Andreev V. V., Kravchenko G. A., Pichugin Yu. P. / IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 862. P. 062086.
7. Андреев В. В., Васильева Л. А., Кравченко Г. А., Пичугин Ю. П., Филиппов В. Г. / Нелинейный мир. 2009. Т. 7. № 11. С. 811–819.
8. Андреев В. В., Пичугин Ю. П., Телегин В. Г., Телегин Г. Г. / Физика плазмы. 2011. Т. 37. № 12. С. 1130–1135.
9. Андреев В. В., Пичугин Ю. П. / Физика плазмы. 2014. Т. 40. № 6. С. 563–570.
10. Dahai Yu, Qizheng Ye, Fuli Yang, Xiongwei Zeng, Lili Zhao, Dan Tan / Plasma Processes and Polymers. 2013. Vol. 10. № 10. P. 880–887.
11. Xiao Wang, Hui-Jie Yan, Yu-Ying Wang, Si-qi Yu, Ting Li, Jian Song / J. Phys. D: Appl. Phys. 2023. Vol. 56. № 10. P. 105201.
12. Miao Tang, Jingfeng Tang, Desheng Zhou, Daren Yu. / Plasma Sci. Technol. 2021. Vol. 23. № 6. P. 064005.
13. Андреев В. В., Пичугин Ю. П. / Прикладная физика. 2017. № 3. С. 47–51.
14. Manley T. C. / Trans. of the electrochemical society. 1943. Vol. 84. P. 83–96.
15. Лазукин А. В., Кривов С. А. / Электричество. 2016. № 2. С. 4–11.
16. Пашин М. М., Лысов Н. Ю. / Электричество. 2011. № 12. С. 21а–26.
17. Андреев В. В., Пичугин Ю. П., Телегин В. Г., Телегин Г. Г. / Приборы и техника эксперимента. 2013. Т. 56. № 3. С. 58–60.

PACS: 52.80.Tn

Study of the influence of a dielectric disk rotation speed on active power consumed by the dielectric barrier discharge cell in air at atmospheric pressure

V. V. Andreev, L. A. Vasilyeva, A. N. Matyunin and A. V. Andreev

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

Received 27.11.2023; revised 12.03.2024; accepted 04.04.2024

At atmospheric pressure in the air effect of angular velocity of a dielectric rotation on the active power consumed by the dielectric barrier discharge (DBD) cell is studied experimentally. DBD, carried out in the cell with a rotating dielectric, has a number of noteworthy features. For example, in contrast to DBD systems that do not contain moving parts, in the case under study, DBD occurs at DC high voltage on the discharge cell electrodes. DBD also develops if the voltage that changes over time is applied to the electrodes, provided that the polarity of each electrode remains unchanged. Significant dependence of the active power consumed by the DBD cell on the dielectric disk rotation speed is investigated. The studies were carried out

at a voltage of negative polarity on the high-voltage electrode, since it was previously established that at negative polarity ozone is synthesized more intensely.

Keywords: dielectric barrier discharge, rotating dielectric barrier, low-temperature plasma.

REFERENCES

1. Sokolova M. V., *Izv. Akad. Nauk. Energetika*, № 6, 99–107 (1983) [in Russian].
2. Andreev V. V. and Vasilyeva L. A., *Plasma Physics Reports* **39** (13), 1108–1113 (2013).
3. Andreev V. V., Matunin A. N. and Pichugin Yu. P., *Applied Physics*, № 3, 9–42 (2014) [in Russian].
4. Lunin V. V., Popovich M. P. and Tkachenko S. N., *Physical Chemistry of Ozone*, Moscow, MGU, 1998 [in Russian].
5. Samoilovich V. G., Gibalov V. I. and Kozlov K. V., *Physical Chemistry of the Barrier Discharge*, Moscow, MGU, 1989 [in Russian].
6. Andreev V. V., Kravchenko G. A. and Pichugin Yu. P., *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* **862**, 062086 (2020).
7. Andreev V. V., Vasil'eva L. A., Kravchenko G. A., Pichugin Yu. P. and Filippov V. G., *Nelineinyi Mir* **7** (11), 811–819 (2009) [in Russian].
8. Andreev V. V., Pichugin Yu. P., Telegin V. G. and Telegin G. G., *Plasma Physics Reports* **37** (12), 1053–1057 (2011).
9. Andreev V. V. and Pichugin Yu. P., *Plasma Physics Reports* **40** (6), 481–487 (2014).
10. Dahai Yu, Qizheng Ye, Fuli Yang, Xiongwei Zeng, Lili Zhao and Dan Tan, *Plasma Processes and Polymers* **10** (10), 880–887 (2013).
11. Xiao Wang, Hui-Jie Yan, Yu-Ying Wang, Si-qi Yu, Ting Li and Jian Song, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **56** (10), 105201 (2023).
12. Miao Tang, Jingfeng Tang, Desheng Zhou and Daren Yu, *Plasma Sci. Technol.* **23** (6), 064005 (2021).
13. Andreev V. V. and Pichugin Yu. P., *Applied Physics*, № 3, 47–51 (2017) [in Russian].
14. Manley T. C., *Trans. of the electrochemical society* **84**, 83–96 (1943).
15. Lazukin A. V. and Krivov S. A., *Elektrichestvo (Electricity)*, № 2, 4–11 (2016) [in Russian].
16. Pashin M. M. and Lysov N. Yu., *Elektrichestvo (Electricity)*, № 12, 21a–26 (2011) [in Russian].
17. Andreev V. V., Pichugin Yu. P., Telegin V. G. and Telegin G. G., *Instruments and Experimental Techniques* **56** (3), 299–301 (2013).