

УДК 537.5

Д.В. БЕЛОПЛОТОВ,**, М.И. ЛОМАЕВ*,**, В.Ф. ТАРАСЕНКО*,**, Д.А. СОРОКИН****ИНВЕРСИЯ ЭФФЕКТА ПОЛЯРНОСТИ В НАНОСЕКУНДНОМ ИМПУЛЬСНОМ РАЗРЯДЕ, ИНИЦИИРУЕМОМ УБЕГАЮЩИМИ ЭЛЕКТРОНАМИ¹**

Исследовано влияние полярности электрода с малым радиусом кривизны на напряжение пробоя промежутка «остриё – плоскость» длиной 13 мм высоковольтными наносекундными импульсами напряжения от генератора РАДАН–220 в режиме однократных импульсов. Промежуток заполнялся воздухом, азотом (N_2), элегазом (SF_6) и смесью SF_6 с N_2 в соотношении 40:1 при давлении 0.013–0.3 МПа. Установлено, что в условиях данного эксперимента наблюдается инверсия эффекта полярности. Напряжение пробоя при положительной полярности электрода с малым радиусом кривизны было выше, чем при отрицательной полярности. С ростом давления инверсия эффекта полярности исчезала. Инверсия эффекта полярности в данных условиях эксперимента обусловлена задержкой формирования взрывоэмиссионных центров на плоском катоде.

Ключевые слова: высоковольтный наносекундный разряд, убегающие электроны, пробой в воздухе, азоте и элегазе, высокое давление, инверсия эффекта полярности.

В последние годы особое внимание уделяется наносекундному и субнаносекундному пробую в неоднородном электрическом поле в газах атмосферного давления и выше [1–3]. Интерес к разрядам в таких условиях обусловлен тем, что за счёт предыонизации газа убегающими электронами (УЭ), генерируемыми на стадии пробоя, и рентгеновским излучением (РИ), вызванным взаимодействием УЭ с газовой средой и торможением о поверхность анода, формируется объёмный разряд [3]. В результате создаётся однородная, плотная ($n_e = 10^{14} \text{ см}^{-3}$), низкотемпературная плазма. В работе [2] было предложено называть данный режим разрядов высокого давления ОРИПЭЛ (объёмный разряд, инициируемый пучком электронов лавин). ОРИПЭЛ применяется для создания активных сред газовых лазеров [4], в которых достигаются близкая к предельной эффективность лазерной генерации, например в HF(DF)-лазере [5]. Кроме того, плазма ОРИПЭЛ интересна с точки зрения её применения для модификации, очистки поверхности различных материалов (полупроводников, диэлектриков, металлов) [6].

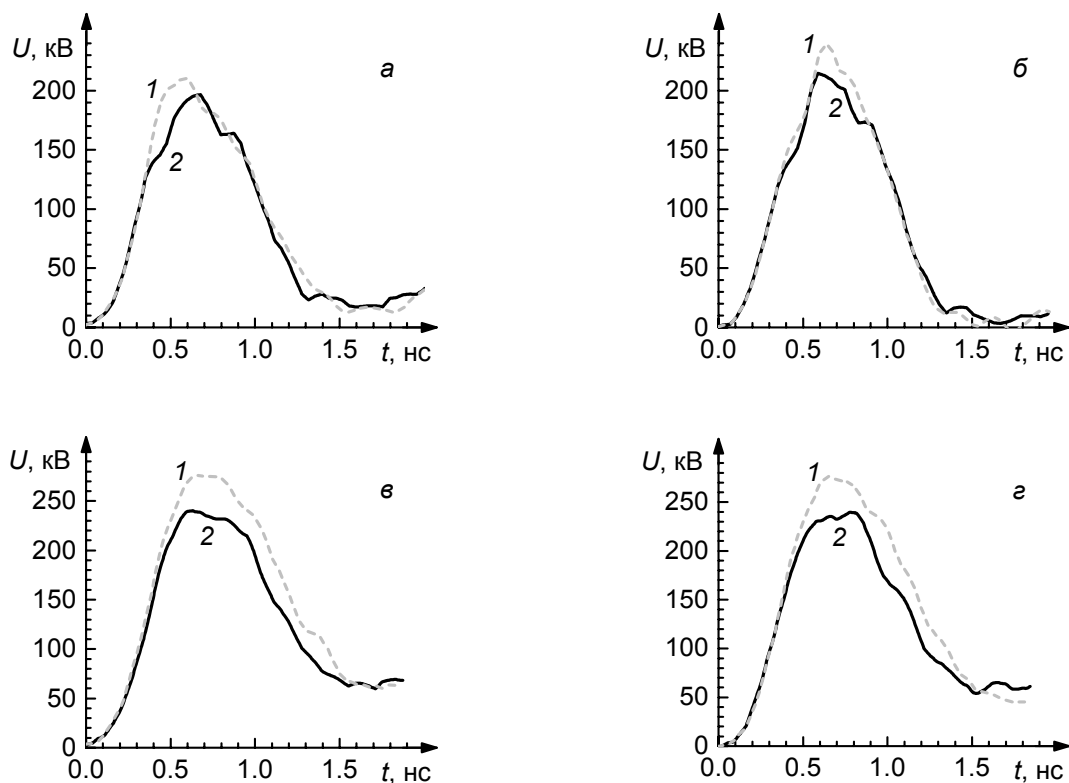
Несмотря на достигнутый прогресс в понимании процессов, приводящих к формированию однородной плазмы атмосферного давления и выше, многие из них остаются неизученными или изученными не полностью в силу их сложности и быстротечности (характерные времена 10^{-12} с). Примером может служить эффект полярности и его инверсия. При отрицательной полярности электрода с малым радиусом кривизны (острый электрод) электрическая прочность промежутка выше, чем при положительной полярности. Иными словами, напряжение пробоя при отрицательной полярности превышает напряжение пробоя при положительной полярности. В [7] отмечается увеличение напряжения пробоя до 2.5 раз. Данное явление было названо эффектом полярности. Однако в случае пробоя промежутка наносекундными импульсами напряжения в ряде условий наблюдается инверсия эффекта полярности. Напряжение пробоя при отрицательной полярности становится меньше, чем при положительной полярности. Впервые эффект наблюдался, по видимому, при пробое промежутка «остриё – плоскость» импульсами напряжения с длительностью фронта 4 нс, заполненного смесью 79 % SF_6 и 21 % N_2 [8]. Однако в чистом N_2 и смеси N_2 с небольшой добавкой SF_6 инверсия эффекта полярности не наблюдалась. Позднее инверсия эффекта полярности наблюдалась при пробое SF_6 и воздуха атмосферного давления при высоких перенапряжениях в работе [9], в которой было высказано предположение, что инверсия эффекта полярности обусловлена генерацией убегающих электронов с аномальной энергией $T > eU_{\text{max}}$ (e – заряд электрона, U_{max} – максимальное напряжение на промежутке). В [10] при исследовании высоковольтного субнаносекундного пробоя промежутка длиной 0.33–4 мм, заполненного трансформаторным маслом либо воздухом при давлении 1.38 и 2.76 МПа, наблюдался обычный эффект полярности.

Цель настоящей работы – изучить влияние полярности электрода с малым радиусом кривизны на напряжение пробоя в воздухе, азоте (N_2), элегазе (SF_6) и в смеси SF_6 с N_2 .

¹ Исследование выполнено за счёт гранта РФФИ № 15-58-53031_ГФЕН_а.

В экспериментах использовался генератор высоковольтных наносекундных импульсов напряжения РАДАН–220 [11], подобные генераторы использовались в [9, 10]. Импульсы напряжения с длительностью импульса на полувысоте порядка 2 нс и длительностью фронта порядка 0.6 нс подавались на электрод, изготовленный из фольги из нержавеющей стали толщиной 100 мкм, свёрнутой в трубку диаметром 6 мм (острый электрод). Заземлённый электрод был изготовлен из плоской алюминиевой пластины диаметром 38 мм. Расстояние между электродами составляло 13 мм. С помощью линзы в плоскости экрана с щелью (ширина щели 1 мм), расположенной перед фотодиодом PD025 (катод LNS20 компании Photek, время нарастания переходной характеристики ~ 80 пс), строилось увеличенное в 2 раза изображение плазмы разряда. Фотодиод PD025 и экран с щелью были установлены на подвижном столике, тем самым обеспечивалась регистрация излучения плазмы разряда из приэлектродных зон. Пространственное разрешение оптической системы составляло, примерно, 1 мм. Напряжение регистрировалось с помощью ёмкостного делителя напряжения. Ток разряда регистрировался с помощью токового шунта, изготовленного из чип-резисторов. Сигналы с ёмкостного делителя напряжения, токового шунта и фотодиода поступали на цифровой осциллограф DPO70604 (6 ГГц, 25 выборок за одну наносекунду). Рабочая камера заполнялась воздухом, N_2 , SF_6 и смесью SF_6 с N_2 в соотношении 40:1. Давление газов менялось от 0.013 до 0.3 МПа

В условиях данного эксперимента во всех исследуемых газах наблюдалась инверсия эффекта полярности. На рис. 1 представлены осциллограммы импульсов напряжения и тока разряда при положительной и отрицательной полярностях в воздухе, N_2 , SF_6 и смеси $40SF_6:1N_2$ атмосферного давления. Для удобства сравнения осциллограмм, значения напряжения на промежутке и тока разряда при отрицательной полярности умножены на -1 . Как видно из рис. 1, *a–z*, во всех исследуемых газах напряжение пробоя при положительной полярности острейшего электрода было выше, чем при отрицательной полярности. На осциллограммах импульса тока разряда (рис. 2, *д, е, ж, з*) начальный участок (0–0.3 нс) обусловлен протеканием тока смещения, поэтому при обеих полярностях начало тока разряда регистрируется в один и тот же момент времени. Затем, после пробоя промежутка начинает протекать ток проводимости. На осциллограммах этот момент отмечается резким нарастанием тока. При положительной полярности момент резкого нарастания тока разряда наблюдается с некоторой задержкой $\Delta t_{\text{ток}}$ относительно момента резкого нарастания тока разряда при отрицательной полярности.



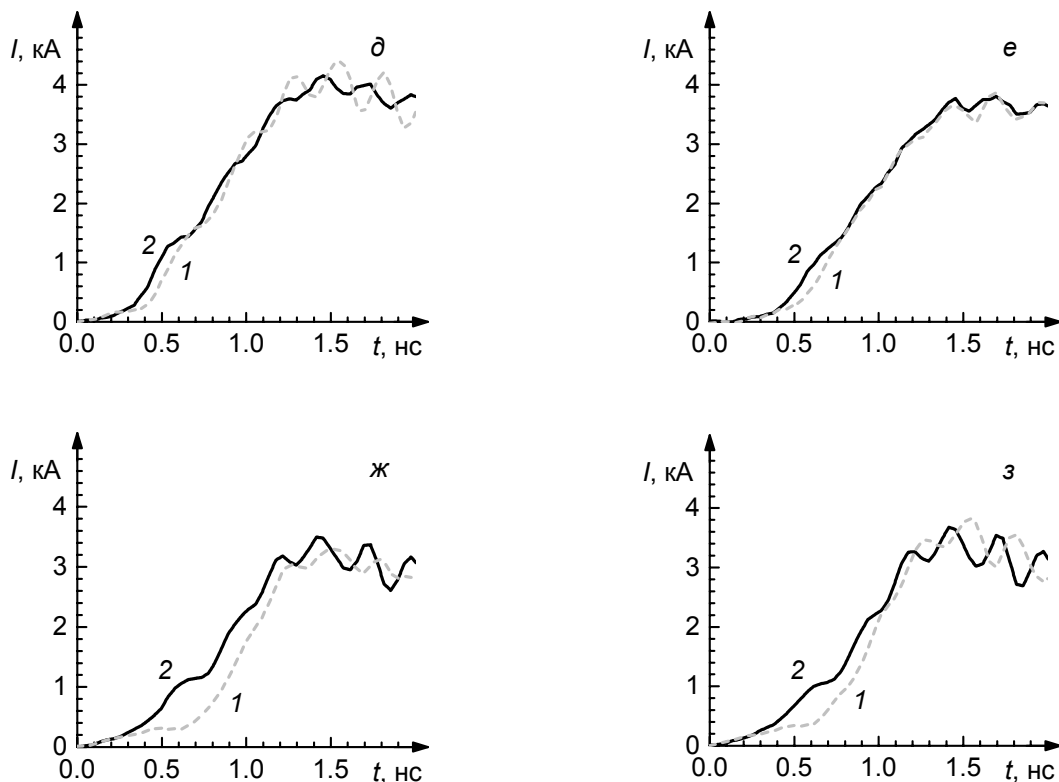


Рис. 1. Осциллограммы импульсов напряжения (*а, б, в, з*) и тока разряда (*д, е, ж, з*) при положительной (кр. 1) и отрицательной (кр. 2) полярностях в воздухе (*а, д*), N_2 (*б, е*), SF_6 (*в, ж*) и смеси SF_6 с N_2 (40:1) атмосферного давления. Значения напряжения и тока разряда при отрицательной полярности умножены на -1 для удобства сравнения

С ростом давления P отличие между амплитудами напряжения ΔU_{\pm} при положительной и отрицательной полярностях уменьшалось (рис. 2), а задержка $\Delta t_{ток}$ сокращалась и при давлении газов выше 0.2 МПа исчезала. Стоит отметить, что амплитуда импульса напряжения на выходе генератора не зависела от его полярности.

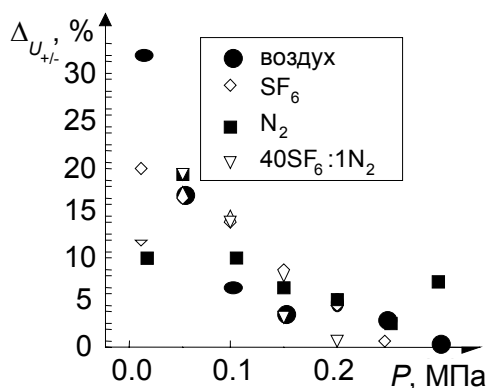


Рис. 2. Отличие между амплитудами напряжения при положительной и отрицательной полярностях в зависимости от давления газов

На первый взгляд, наблюдаемую инверсию эффекта полярности и задержку $\Delta t_{ток}$ можно объяснить тем, что при положительной полярности процессы ионизации стартуют с большим временным запаздыванием относительно момента подачи импульса напряжения на промежуток, чем при отрицательной полярности. Проверить данное предположение можно следующим образом. Как известно, процесс ионизации молекул и атомов газа сопровождается их возбуждением. Следовательно, информация о запаздывании процессов ионизации может быть получена из данных о вре-

менном ходе интенсивности излучения плазмы разряда вблизи острейного электрода на начальной стадии её формирования. В эксперименте было показано, что вне зависимости от полярности острейного электрода излучение вблизи него возникает в одно и то же время. Однако после пробоя промежутка быстрое нарастание интенсивности излучения при положительной полярности наблюдалось с задержкой $\Delta t_{\text{изл}}$ относительно быстрого нарастания интенсивности излучения, наблюдаемого при отрицательной полярности (аналогично осциллограммам тока разряда (рис. 2, *д, е, ж, з*)). Задержка $\Delta t_{\text{изл}}$ так же, как и $\Delta t_{\text{ток}}$, уменьшалась с ростом давления и исчезала при давлении выше 0.2 МПа.

Отметим, что в спектре излучения плазмы разряда в азоте и в азотосодержащих смесях доминирует излучение второй положительной системы азота, которая эффективно возбуждается при высоких электрических полях ($E/P = 150\text{--}200$ В/(см·Торр)), реализующихся в условиях данного эксперимента. Таким образом, вторая положительная система азота начинает излучать ещё на стадии пробоя.

Из описанных выше фактов можно предположить, что задержки $\Delta t_{\text{ток}}$ и $\Delta t_{\text{изл}}$ свидетельствуют о том, что процесс ионизации при положительной полярности идёт с меньшими темпами, чем при отрицательной полярности. Однако в работах [12, 13] было показано, что пробой промежутка «острий-плоскость» при повышенных давлениях N_2 и смеси $40\text{SF}_6:1\text{N}_2$ высоковольтными наносекундными импульсами напряжения реализуется в виде волны ионизации, распространяющейся от потенциального острейного электрода к заземлённому плоскому электроду, причём скорость волны ионизации при положительной полярности острейного электрода выше, чем при отрицательной полярности. Следовательно, задержки $\Delta t_{\text{ток}}$ и $\Delta t_{\text{изл}}$ обусловлены тем, что при положительной полярности острейного электрода (острийный анод) затруднена и/или запаздывает эмиссия электронов с плоского электрода (катода), обеспечивающая протекание килоамперных токов (рис. 2, *д, е, ж, з*). В данных условиях эксперимента, обеспечить необходимую плотность тока может лишь взрывная эмиссия электронов [14]. При отрицательной полярности острейного электрода (острийный катод) протекание килоамперных токов обеспечивается за счёт взрывной эмиссии электронов с острейного катода. Взрывоэмиссионные центры (яркие пятна) на острейном катоде за счёт усиления электрического поля появляются ещё на стадии пробоя, следовательно, нет причин, препятствующих протеканию килоамперных токов. В случае острейного анода взрывоэмиссионные центры на плоском катоде формируются, вероятно, в неоптимальных условиях, поскольку электрическое поле вблизи его поверхности мало (примерно в 40 раз меньше, чем вблизи острейного электрода [15]) и плотность тока автоэлектронной эмиссии мала. После того как волна ионизации пересекла промежуток, плотность тока вблизи микроострий на плоском катоде увеличивается и спустя некоторое время образуются взрывоэмиссионные центры. Следовательно, до тех пор, пока на плоском катоде не сформируются взрывоэмиссионные центры и в промежутке не начнёт протекать заметный ток, напряжение на промежутке будет расти и превысит амплитудное значение напряжения в случае отрицательной полярности острейного электрода.

По мере роста давления газа поперечные размеры ОРИПЭЛ сокращаются. Разряд стягивается в узкие диффузные каналы, при этом амплитуда тока разряда сохраняется, следовательно, увеличивается плотность тока, сосредоточенного в диффузных каналах. Время запаздывания формирования взрывоэмиссионных центров t_3 связано с плотностью тока j соотношением $j^2 t_3 = A$ [14], где A – константа, зависящая от материала электрода. Следовательно, с ростом плотности тока j время запаздывания формирования взрывоэмиссионных центров t_3 уменьшается. Видимо, по этой причине инверсия эффекта полярности исчезает с ростом давления.

В работе [10] инверсия эффекта полярности не наблюдалась, вероятно, по причине использования коротких промежутков (0.33–4 мм против 13 мм в нашей работе) и более высоких давлений (1.38 и 2.76 МПа против 0.013–0.3 МПа в нашей работе), в результате чего напряжённость электрического поля и плотность тока разряда были выше, что способствовало формированию взрывоэмиссионных центров на плоском катоде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Paskan D. Repetitive Nanosecond Glow Discharge in Atmospheric Pressure Air. – Stanford: Stanford University, 2004.
2. Тарасенко В.Ф., Орловский В.М., Шунайлов С.А. // Изв. вузов. Физика. – 2003. – Т. 45. – № 3. – С. 94–95.

3. Runaway Electrons Preionized Diffuse Discharges / ed. V. F. Tarasenko. – New York: Nova Science Publishers, Inc., 2014. – 598 p.
4. Панченко А.Н., Панченко Н.А., Ломаев М.И. и др. // Оптика атмосферы и океана. – 2013. – Т. 26. – № 10. – С. 857–860.
5. Ломаев М.И., Панченко А.Н., Панченко Н.А. // Оптика атмосферы и океана. – 2014. – Т. 27. – № 4. – С. 341–345.
6. Vaksht E.N., Burachenko A.G., Kostyrya I.D., et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2009. – V. 42. – P. 185201.
7. Raizer Yu.P. // Gas Discharge Physics. – Berlin; Heidelberg; Germany: Springer Verlag, 1991.
8. Поталицын Ю.Ф. // Импульсный разряд в диэлектриках / под ред. Г.А. Месяца. – Новосибирск: Наука, 1985. – 167 с.
9. Бабич Л.П., Лойко Т.В. // Доклады Академии наук. – 2005. – Т. 50. – № 5. – С. 321–324.
10. Mankowski J., Dickens J., Kristiansen M. // IEEE Trans. on Plasma Science. – 1998. – V. 26. – P. 874–881.
11. Загулов Ф.Я., Котов А.С., Шпак В.Г. // ПТЭ. – 1978. – № 6. – С. 5–18.
12. Белоплотов Д.В., Ломаев М.И., Сорокин Д.А. и др. // Оптика атмосферы и океана. – 2014. – Т. 27. – № 4. – С. 316–320.
13. Lomaev M.I., Beloplotov D.V., Tarasenko V.F., et al. // IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2015 [в печати].
14. Bugaev S.P., Litvinov E.A., Mesyats G.A., et al. // Sov. Phys. Usp. – 1975. – V. 18. – P. 51–61.
15. Beloplotov D.V., Lomaev M.I., Sorokin D.A., et al. // Development and Applications of Oceanic Engineering. – 2014. – V. 3. – P. 39–45.

*Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия

Поступила в редакцию 03.08.15.

**Национальный исследовательский Томский государственный университет,

г. Томск, Россия

E-mail: rff.qep.bdim@gmail.com

Белоплотов Дмитрий Викторович, мл. науч. сотр., аспирант;
 Ломаев Михаил Иванович, д.ф.-м.н., ст. науч. сотр.;
 Тарасенко Виктор Федотович, д.ф.-м.н., профессор, зав. лабораторией;
 Сорокин Дмитрий Алексеевич, мл. науч. сотр.

*D.V. BELOPLOTOV***, M.I. LOMAEV***, V.F. TARASENKO***, D.A. SOROKIN**

INVERSION OF THE POLARITY EFFECT IN A NANOSECOND PULSE DISCHARGE INITIATED BY RUNAWAY ELECTRONS

Polarity influence of an electrode with a small radius of curvature on a breakdown voltage of “point-plane” discharge gap with length of 13 mm by high-voltage nanosecond voltage pulses produced by RADAN-220 in single pulse mode was investigated. The discharge gap was filled with air, nitrogen (N₂), sulfurhexafluoride (SF₆) and mixture of 975SF₆:25N₂ at pressure of 0.013-0.3 MPa. Under these experimental conditions, the inverted polarity effect was observed. The breakdown voltage at positive polarity was higher than that at negative one. It was established that the inverted polarity effect comes to naught with increasing of gases pressure. It is suggested that the inverted polarity effect is related to the impeded formation of the explosive emission center on the flat electrode (cathode) due to low electric field strength near the one. Disappearance of the inverted polarity effect with increasing of gases pressure is due to reduction of cross-section of discharge that leads to increasing of a discharge current density at comparable amplitude of discharge current. Increasing of current density reduces the formation time of the explosive emission centers on the flat electrode (cathode).

Keywords: *high-voltage discharge, nanosecond discharge, discharge in air, nitrogen, sulfurhexafluoride, discharge at elevated pressure, runaway electrons, polarity effect.*

REFERENCES

1. Packan D. *Repetitive Nanosecond Glow Discharge in Atmospheric Pressure Air*. Stanford, Stanford University, 2014, 164 p.
2. Tarasenko V. F., Orlovskii V. M., Shunailov S. A. (2003). Forming of an electron beam and a volume discharge in air at atmospheric pressure. *Russian Physics Journal*, 46(3), 325–327.
3. Tarasenko V.F. (ed.). *Runaway Electrons Preionized Diffuse Discharges*. New York, Nova Science Publishers, Inc., 2014.
4. Panchenko A.N., Panchenko N.A., Lomaev M.I., Tarasenko V.F. (2013). UV, visible, and IR lasers pumped by the diffuse discharge formed by run-away electrons. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 26(10), 857–860. [in Russian]
5. Lomaev M.I., Panchenko A.N., Panchenko N.A. (2013). Spectral parameters of non-chain HF(DF) laser radiation pumped by volume discharge. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 27(4), 341–345. [in Russian]
6. Baksht E.H., Burachenko A.G., Kostyrya I.D., Lomaev M.I., Rybka D.V., Shulepov M.A. and Tarasenko V.F. (2009). Runaway-electron-preionized diffuse discharge at atmospheric pressure and its application. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 42, 185201.
7. Raizer Yu.P. *Gas Discharge Physics*. Berlin, Heidelberg, Germany, Springer Verlag, 1991.
8. Mesyats G.A. (ed.). *Pulse Discharges in Insulators*. Novosibirsk: Nauka Publishers, 1985. [in Russian]
9. Babich L.P., Loiko T.V. (2005). Peculiarities of Electrical Breakdown in Dense Electronegative Gases at High Overvoltages. *Doklady Physics*, 50(5), 241–244. [in Russian]
10. Mankowski J., Dickens J., Kristiansen M. (1998). High voltage subnanosecond dielectric breakdown. *IEEE Tr. on Plasma Science*, 26, 874–881.
11. Zagulov F. Ya., Kotov A. S., Shpak V. G., Yurike Ya., Yalandin M. I. (1998). Radan – Compact Repetitively Pulsed High-Current Electron Accelerator. *Prib. Tekh. Eksper.*, 4, 146–149. [in Russian]
12. Beloplotov D.V., Lomaev M.I., Sorokin D.A. Tarasenko V.F. (2014). Initial Stage of Breakdown of a Point–Plane Gap Filled with HighPressure Nitrogen and SF₆. *Atmospheric and oceanic optics*, 27(4), 324–328. [in Russian]
13. Lomaev M.I., Beloplotov D.V., Tarasenko V.F., Sorokin D.A. (2015). Breakdown Features of a High-Voltage Nanosecond Discharge Initiated with Runaway Electrons at Subnanosecond Voltage Pulse Rise Time. *IEEE Tr. on Dielectrics and Electrical Insulation* [Accepted].
14. Bugaev S.P., Litvinov E.A., Mesyats G.A. (1975). Explosion Electron Emission. *Sov. Phys. Usp.*, 18, 51–61.
15. Beloplotov D.V., Lomaev M.I., Sorokin D.A. Tarasenko V.F. (2014). Diffuse and spark discharges at high overvoltages in high pressure air, nitrogen and SF₆. *Development and Applications of Oceanic Engineering Physics*, 3, 39–45.