

## Генерация частиц с электродов, имеющих малые радиусы кривизны, при наносекундных разрядах в газах

*В.Ф. Тарасенко\**, *Д.В. Белоплотов*, *Д.А. Сорокин*, *А.Н. Панченко*

*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия*

*\*VFT@loi.hcei.tsc.ru*

**Аннотация.** В промежутках с неоднородным электрическим полем при коротком фронте импульса напряжения достигаются высокие электрические поля ( $>1$  МВ/см), которые усиливаются за счёт накопления у катода положительных ионов и образования плазмы. На основании известных экспериментальных и теоретических исследований вакуумного разряда нами было высказано предположение о действии механизма разрушающих механических напряжений в поверхностном слое электродов при наносекундном пробое в газах. В данной работе при заполнении разрядных промежутков воздухом, азотом, аргоном и гелием атмосферного давления исследовано излучение плазмы диффузного разряда, формируемой между двумя электродами с малым радиусом кривизны. При наносекундной длительности импульса напряжения и энерговкладах  $<1$  мДж/см<sup>3</sup> зарегистрированы треки частиц, вылетающих из ярких пятен на электродах, в том числе, под прямым углом к их поверхности. Показано, что длина треков зависит от полярности электрода и, что при малых энерговкладах в воздухе треки заканчиваются более яркой областью свечения. Установлено, что наибольшую интенсивность свечения при разрядах в указанных газах имеют треки, формирующиеся в воздухе. Из этого результата, а также зарегистрированной длительности импульсов свечения треков в сотни микросекунд, следует, что усиление яркости излучения окончаний треков при распространении в воздухе определяется нагревом материала электрода при взаимодействии вылетающих частиц с кислородом.

**Ключевые слова:** диффузный разряд, промежутков остриё-остриё, треки частиц.

### 1. Введение

Известно, что в результате пробоя при образовании ярких пятен на электродах за счёт взрывной эмиссии электронов происходит эрозия поверхности электродов [1]. Для вакуумных и газонаполненных промежутков образование кратеров на поверхности катода регистрировалось во многих работах (см., например, [1–3] и ссылки в этих публикациях). В промежутках, заполненных различными газами, перед образованием искрового канала при наносекундных разрядах в области ярких пятен также наблюдаются повреждения катода, в том числе имеющие форму кратеров [4–6]. Эрозия поверхности электродов объясняется разогревом микронеоднородностей за счёт увеличения плотности тока в локальных зонах до температуры плавления и быстрым (взрывным) испарением этих микронеоднородностей [1]. В результате до образования искрового канала на поверхности электродов с отрицательной полярностью формируется облако плотной плазмы.

В работах [7, 8], посвящённых изучению механизма вакуумного пробоя при высоких напряжённости электрического поля, было установлено, что одной из причин, ограничивающих электрическую прочность вакуумной изоляции является влияние сильного электрического поля на механические свойства поверхности электродов. Расчёты, проведённые в работе [8], показали, что даже в непрогретой области, размер которой значительно превышает размер взрывоэмиссионного центра, материал катода также подвергается воздействию разрушающих механических напряжений. При этом, первичное появление катодного пятна при разряде в вакууме и образование плазмы у поверхности электрода приводит к множественным локальным разрушениям его относительно ровной поверхности, в том числе на периферии катодного пятна.

На основании экспериментальных и теоретических исследований пробоя в вакууме, описанных авторами статей [7, 8], в работах [9, 10] было высказано предположение, что

механизм, связанный с возникновением разрушающих механических напряжений, должен иметь место и при наносекундном пробое в газах между электродами с малым радиусом кривизны. Фотографирование разряда с высоким (до 1.7 мкм) пространственным разрешением в [9, 10] показало, что в межэлектродном промежутке как при искровом, так и при диффузном разрядах, появляются тонкие светящиеся треки (ТСТ) частиц, которые движутся по разнообразным траекториям. Съёмка с помощью высокочувствительной ICCD камеры позволила установить, что частицы на минимальном удалении от электродов фиксируются с задержкой более 1 мкс, а их скорость зависит от диаметра трека и составляет  $\sim 40$  м/с [9–11]. Данная скорость существенно меньше скорости разлета плазмы при взрывной эмиссии в вакууме ( $\sim 20$  км/с), а также скорости струи жидкого металла у катода ( $\sim 0.4$  км/с) [12].

Результаты, полученные в работах [9–11] вызвали большой интерес и показали необходимость продолжения исследований условий появления ТСТ с электродов. Внимание к наблюдению треков связано с отсутствием данных о регистрации ТСТ при наносекундных диффузных разрядах в неоднородном электрическом поле (см., например, [13–17]). Отметим, что при искровом разряде в ряде работ сообщалось о наблюдении разлета частиц с электродов [18], а также о получении частиц малого размера [19]. Кроме того, в работе [20] было показано, что эрозия острия наблюдается при коронном разряде во время генерации серии импульсов Тричела.

Цель данной работы – обнаружение треков частиц в условиях диффузного разряда в воздухе, азоте, аргоне и гелии, формируемого при малых энергозкладах, и изучение их характеристик.

## 2. Установка и методики измерений

Исследования проводились на установке, подобной описанной в работах [9–11]. Схематичное изображение установки показано на Рис. 1.

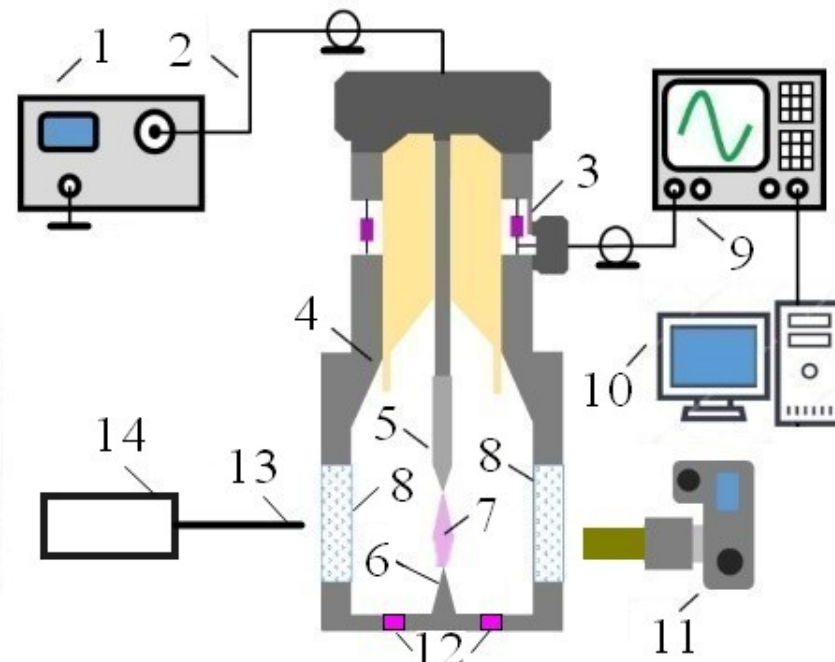


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 – импульсный генератор ГИН-10; 2 – высоковольтный кабель; 3 – шунт прямого и обратного тока; 4 – разрядная камера с передающей линией; 5 и 6 – электроды с малым радиусом кривизны; 7 – плазма разряда; 8 – кварцевые окна; 9 – осциллограф; 10 – компьютер; 11 – камера с микроскопом; 12 – шунт из SMD-резисторов; 13 – световод; 14 – спектрометр.

Импульсы напряжения от генератора 1 (см. работу [21]) по коаксиальному кабелю 2 подавались на вход передающей линии разрядной камеры 4. Импульсы имели положительную полярность, длительность на полувысоте  $\tau_{0.5} \approx 1$  нс (Рис. 2) и длительность фронта  $\tau_{0.1-0.9} \approx 0.7$  нс. Амплитуда падающей волны напряжения  $U$  в передающей линии составляла 11.6 кВ. Энергия в импульсе не превышала 1.2 мДж. В режиме холостого хода напряжение на промежутке удваивалась.

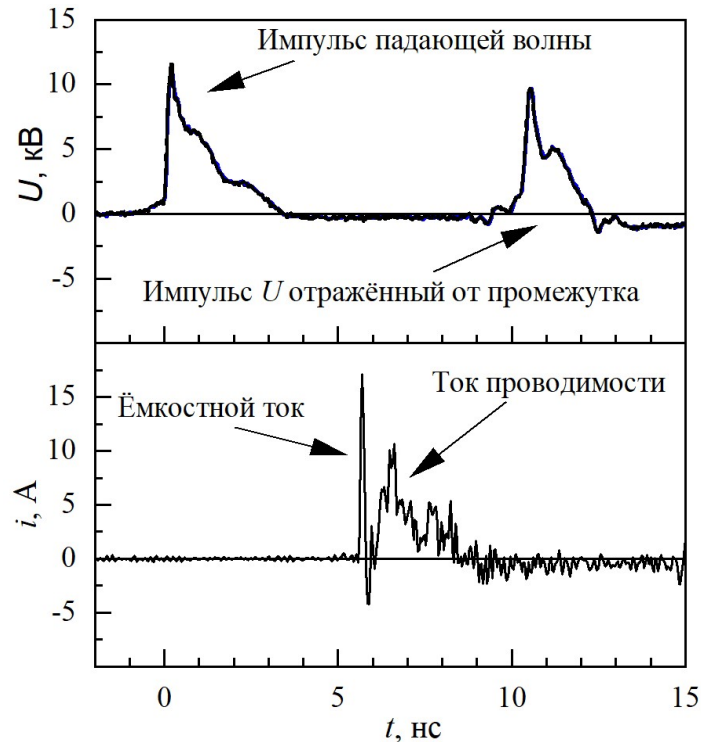


Рис. 2. Осциллограммы импульсов падающей и отражённой волны напряжения  $U$ , а также тока  $i$  через промежуток.

Волновое сопротивление передающей линии с встроенным шунтом обратного тока 3 составляло 75 Ом. Сопротивление шунта составляло 8.7 мОм. Он позволял регистрировать падающую на промежуток и отражённую от него волны напряжения, а также импульсы напряжения, отражённые от генератора. Ток через промежуток измерялся токовым шунтом 12, собранным из тонкоплёночных SMD-резисторов (Vishay Intertechnology) и вмонтированным в заземлённый электрод. Сопротивление данного шунта составляло 30 мОм. Излучательные характеристики наносекундного разряда регистрировались из области между электродами 5 и 6, изготовленных из отрезков швейных игл с диаметром у основания 0.75 мм. Длина игл равнялась  $\approx 5.5$  мм, а радиусы скругления  $\approx 35$  мкм. В связи с малой энергией в импульсе напряжения генератора ГИИ-10 форма окончаний электродов существенно не изменялась от импульса к импульсу. Межэлектродный зазор равнялся 4 мм. Ввиду отсутствия согласования импедансов газоразрядной нагрузки, генератора и передающей линии, импульсы напряжения испытывали отражения от промежутка и от генератора. В результате импульсы напряжения, отражённые от генератора, возвращались на промежуток каждые 22 нс с противоположной полярностью. Подробно подобные режимы описаны в работах [9–11]. Однако основная часть энергии вкладывалась в плазму разряда 7 во время прихода на промежуток первого импульса напряжения от генератора.

Сигналы с шунтов записывались осциллографом 9 Tektronix MSO64B (8 ГГц, частота

дискретизации 20 выборок/нс). Для съёмки интегральных фотографий свечения плазмы разряда использовался зеркальный фотоаппарат 11 Canon EOS 2000D (число пикселей 24.7 Мп, размер матрицы  $22.3 \times 14.9$  мм<sup>2</sup>, размер пикселя 3.72 мкм), оснащенный длиннофокусным микроскопом K2 DistaMax (Infinity Photo-Optical Company) с объективом CF-3. Микроскоп в данной конфигурации обеспечивал увеличение 3.56 с предельным разрешением 1.7 мкм. Длительность экспозиции фотоаппарата обычно составляла 0.5 с, а чувствительность 40000 ISO. Для регистрации спектров излучения применялся спектрометр HR2000+ES (OceanOptics, Inc.) 14 со световодом 13 (диапазон 200–1150 нм; величина аппаратной функции  $\approx 0.9$  нм) с известной спектральной чувствительностью. Разрядная камера 4 имела два боковых окна 8 из КУ-1. Фотографирование разряда и измерение спектров излучения проводились в отсутствие внешнего освещения.

Газоразрядная камера откачивалась форвакуумным насосом и заполнялась атмосферным воздухом с относительной влажностью 23%, или азотом, или аргоном, или гелием. Исследования проводились при давлении газа в разрядной камере  $\approx 760$  Торр.

### 3. Результаты измерений и их обсуждение

Исследования свечения плазмы разряда в воздухе и азоте, а также в аргоне и гелии, были проведены при малых энерговкладах, которые определялись короткой длительностью импульса напряжения ( $\approx 1$  нс на полувысоте) и его амплитудой ( $\approx 11.6$  кВ в падающей волне). Эти энерговклады были в 5 раз ниже, чем используемые ранее в работах [9–11]. При давлении 760 Торр пробой промежутка обычно наблюдался при напряжении на промежутке близком к максимальному. В таком режиме на осциллограмме тока через промежуток во время нарастания импульса напряжения стабильно регистрировался пик ёмкостного тока, который превышал по амплитуде ток проводимости, Рис. 2. Энергия, вкладываемая в газ в первом импульсе напряжения от генератора, в воздухе составляла около 0.5 мДж и незначительно ( $\approx 10\%$ ) изменялась от импульса к импульсу.

Как известно, до пробоя газонаполненного промежутка реализуется режим холостого хода, а при развитии ионизационных процессов в газе сопротивление разрядной плазмы уменьшается. При формировании диффузного разряда и оптимальном напряжении на промежутке на некоторое время может реализоваться согласованный режим, при котором сопротивление плазмы в промежутке равно сопротивлению передающей линии генератора. Однако при наносекундной длительности импульса напряжения, процесс согласованного ввода энергии обычно занимает только часть длительности импульса напряжения. По этим причинам достичь полного согласования сопротивления разрядной плазмы и генератора ГИН-10 невозможно. На Рис. 2 для давления атмосферного воздуха 760 Торр приведены осциллограммы импульсов напряжения и тока между электродами 5 и 6, который состоял из ёмкостного тока и тока проводимости.

Фотографии промежутка и свечения разрядной плазмы в воздухе и азоте в условиях появления треков приведены на рис. 3.

Режим разряда с формированием диффузного разряда и ТСТ в воздухе показан на Рис.3а. У обоих электродов видны яркие светящиеся треки, причём ТСТ с наибольшей длиной регистрировались у заземлённого электрода, который при приходе на промежуток первого импульса напряжения имел отрицательную полярность. Особенностью в воздухе при малых энерговкладах в газ являлась максимальная интенсивность свечения треков у их окончания. При высоких энерговкладах, см. работы [9–11], большинство треков имели примерно одинаковую яркость свечения по их длине.

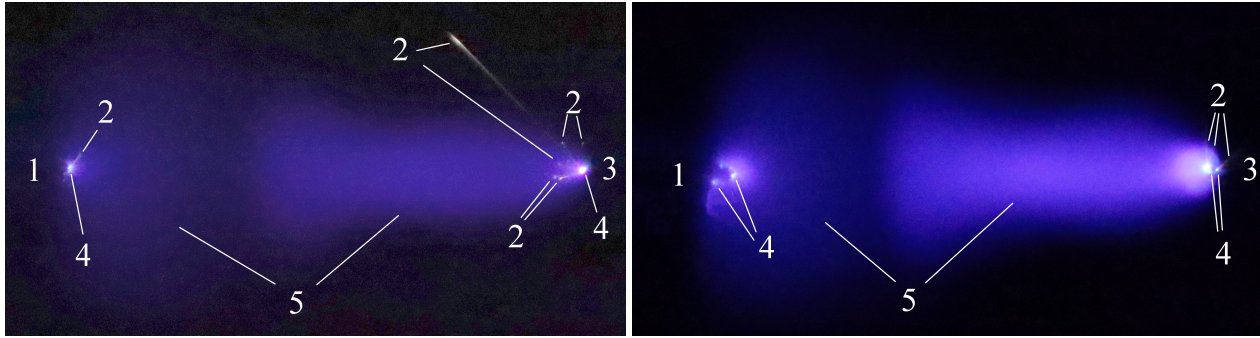


Рис. 3. Фотографии свечения разряда в воздухе (а) и азоте (б), полученные за один импульс напряжения от генератора ГИН-10. 1 – высоковольтный электрод; 2 – тонкие светящиеся треки частиц с электродов; 3 – заземлённый электрод; 4 – яркие пятна на электродах; 5 – свечение диффузного разряда.

При разряде в азоте (Рис. 3б), а также в гелии, в отличие от разряда в воздухе, интенсивность излучения треков была максимальна у ярких пятен на электродах и медленно уменьшалась при удалении от них. При этом, ТСТ в азоте имели бóльшую яркость свечения, чем в гелии, но меньшую, чем в воздухе. В аргоне с генератором ГИН-10 и при межэлектродном зазоре 4 мм зарегистрировать треки частиц не удалось, хотя они наблюдались при более высоких энерговкладах, а также при уменьшении давления в работе [9].

В эмиссионных спектрах свечения, полученных при диффузном разряде в воздухе и азоте, как и следовало ожидать (см. работы [6, 9]), доминировали полосы второй (2+) положительной систем молекулярного азота, что обусловлено высокой напряжённостью электрического поля при пробое за счёт субнаносекундной длительности фронта импульса напряжения. Спектральная плотность энергии излучения основных полос 2+ системы азота была на порядки больше, чем у полос первой положительной (1+) системы. Спектры излучения ярких пятен на электродах и треков зарегистрировать в этих условиях не удалось. Трудности регистрации спектров излучения треков можно объяснить их тепловой природой, соответственно, большой шириной спектров излучения ТСТ. Излучение треков, которое происходит при разлёте частиц с электродов, также может определять высокая температура ярких пятен на электродах. Эти пятна, как известно, образуются за счёт взрывной эмиссии электронов [1]. Из полученных данных следует, что оба процесса имеют место. В азоте (Рис. 3б) и гелии яркость треков при удалении уменьшалась, а в воздухе она была максимальной у окончания треков (Рис. 3а). Кроме того, частицы электродов могут нагреваться при столкновениях с молекулами и атомами газа, однако этот процесс менее эффективен.

Проведённые исследования поддерживают гипотезу, выдвинутую в работах [9, 10]. Наблюдаемые треки – это следы горячих частиц металла, вылетающих с поверхности электродов в области её контакта с плотной плазмой. Первоначально плазма создаётся при разогреве и тепловом взрыве микронеоднородностей за счет увеличения плотности тока в этих местах. Созданная плазма усиливает электрическое поле на поверхности электродов. С использованием малых энерговкладов было установлено, что треки имеют большую длину при их инициировании с электрода имеющего отрицательную полярность. Хотя в данных экспериментах наибольшая напряжённость электрического поля достигалась на высоковольтном электроде при приходе первого импульса от генератора. Заземлённый электрод был окружён стенками разрядной камеры, которые ослабляли электрическое поле у острия б (см. Рис. 1). Однако треки в основном генерировались с этого электрода и распространялись на большие расстояния.

#### 4. Заключение

Проведены исследования процесса формирования тонких светящихся треков в промежутке с электродами, имеющими малый радиус кривизны, при диффузном разряде в воздухе, азоте, аргоне, гелии и малых энергокладах. Установлено, что ТСТ формируются, преимущественно, с электрода отрицательной полярности и их длина при уменьшении энергокладов в плазму разряда становится короче. Показано, что наибольшую яркость в воздухе имеют окончания треков, что можно объяснить их дополнительным разогревом при окислении частиц, которые стартуют с электродов. В азоте и гелии интенсивность излучения треков максимальна у ярких пятен на электродах и уменьшается с удалением от них, что свидетельствует об уменьшении температуры частиц, образующих треки, при их удалении от электродов.

#### Благодарности

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИСЭ СО РАН, проект № FWRM-2021-0014.

#### 5. Список литературы

- [1] G.A. Mesyats, *Explosive Electron Emission*. Ekaterinburg: URO-Press, 1998.
- [2] I. Beilis, *Plasma and Spot Phenomena in Electrical Arcs*. Switzerland: Springer Nature, 2020.
- [3] A.J. Korsbäck, F. Djurabekova, W. Wuensch, Statistics of vacuum electrical breakdown clustering and the induction of follow-up breakdowns, *AIP Advances*, vol. **12**, 115317, 2022, doi: 10.1063/5.0111677
- [4] Yu. D. Korolev, V.A. Kuzmin, G.A. Mesyats, Nanosecond gas discharge in an inhomogeneous field with explosive processes on electrodes, *Technical Physics*, vol. **50**, 699, 1980.
- [5] K.I. Almazova, A.N. Belonogov, V.V. Borovkov, Z.R.Khalikova, G.B. Ragimkhanov, D.V. Tereshonok, A.A.Trenkin, Investigation of plasma properties in the phase of the radial expansion of a spark channel in the ‘pin-to-plate’ geometry, *Plasma Sources Science and Technology*, vol. **30**, 095020, 2021, doi: 10.1088/1361-6595/aba8cc
- [6] M. Lomaev, V. Tarasenko, M. Shulepov, D. Beloplotov, D. Sorokin, Nano-and microparticles of carbon as a tool for determining the uniformity of a diffuse discharge exposure, *Surfaces*, **6**, 40. 2023, doi: 10.3390/surfaces6010004
- [7] E.V. Nefedtsev, S.A. Onischenko, and A.V. Batrakov, Sites of initiation of explosive-emission processes on the surface of single-crystal and coarse-grained polycrystalline copper, *Russian Physics Journal*, vol. **62**, 1130, 2019, doi: 10.1007/s11182-019-01827-4
- [8] E.V. Nefedtsev, S.A. Onischenko, Modification of the cathode material around the explosive electron emission centers in the spark stage of vacuum breakdown, *Technical Physics Letters*, **11**, 69, 2022, doi: 10.21883/TPL.2022.11.54895.19307
- [9] V.F. Tarasenko, D.V. Beloplotov, A.N. Panchenko, D.A. Sorokin, Thin luminous tracks of particles released from electrodes with a small radius of curvature in pulsed nanosecond discharges in air and argon, *Surfaces*, vol. **6**, 214, 2023, doi: 10.3390/surfaces6020014
- [10] V.F. Tarasenko, D.V. Beloplotov, A.N. Panchenko, M.I. Lomaev, D.A. Sorokin, Thin luminous tracks during a nanosecond discharge in a nonuniform electric field, *Advances in Applied Physics*, vol. **11**, 312, 2023, doi: 10.51368/2307-4469-2023-11-4-312-319
- [11] V.F. Tarasenko, D.V. Beloplotov, A.N. Panchenko, D.A. Sorokin, Formation of diffuse and spark discharges between two needle electrodes with the scattering of particles, *Plasma Science and Technology*, vol. **26**, 094003, 2024, doi: 10.1088/2058-6272/ad34aa

- 
- [12] G.A. Mesyats, *Cathode Phenomena in a Vacuum Discharge: the Breakdown, the Spark, and the Arc*. Moscow: Nauka, 2000.
- [13] P. Tardiveau, N. Moreau, S. Bentaleb, C. Postel, S. Pasquiers, Diffuse mode and diffuse-to-filamentary transition in a high pressure nanosecond scale corona discharge under high voltage, *Journal Physics D: Applied Physics*, vol. **42**, 175202, 2009, doi: 10.1088/0022-3727/42/17/175202
- [14] D.Z. Pai, D.A. Lacoste, and C.O. Laux, Nanosecond repetitively pulsed discharges in air at atmospheric pressure – the spark regime, *Plasma Sources Science and Technology*, vol. **19**, 065015, 2010, doi: 10.1088/0963-0252/19/6/065015
- [15] A. Starikovskiy, Fast ionization wave development in atmospheric-pressure air, *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. **39**, 2602, 2011, doi: 10.1109/TPS.2011.2160738
- [16] Y. Xin, Q. Wang, J. Sun, B. Sun, Plasma in aqueous methanol: Influence of plasma initiation mechanism on hydrogen production, *Applied Energy*, vol. **325**, 119892, 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.11989
- [17] B. Zhang, Y. Zhu, X. Zhang, N. Popov, T. Orrière, D.Z. Pai, and S.M. Starikovskaia, Streamer-to-filament transition in pulsed nanosecond atmospheric pressure discharge: 2D numerical modeling, *Plasma Sources Science and Technology*, vol. **32**, 115014, 2023, doi: 10.1088/1361-6595/ad085c
- [18] C. Roth, G.A. Ferron, E. Karg, B. Lentner, G. Schumann, S. Takenaka, J. Heyder, Generation of Ultrafine Particles by Spark Discharging, *Aerosol Science and Technology*, vol. **38**, 228, 2004, doi: 10.1080/02786820490247632
- [19] N.S. Tabrizi, M. Ullmann, V.A. Vons, U. Lafont, A. Schmidt-Ott, Generation of nanoparticles by spark discharge, *Journal of Nanoparticle Research*, vol. **11**, 315, 2009, doi: 10.1007/s11051-008-9407-y
- [20] E.I. Asinovskii, A.A. Petrov, and I.S. Samoylov, Frequency response characteristics of trichel pulses and the behavior of the cathode spot in a negative corona discharge, *JETP Letters*, vol. **86**, 302, 2007, doi: 10.1134/S0021364007170043
- [21] V.M. Efanov, M.V. Efanov, A.V. Komashko, A.V. Kriklenko, P.M. Yarin, S.V. Zazoulin. *Ultra-wideband, short pulse electromagnetics 9*. New York: Springer-Verlag, 2010.