

DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-2-03

ДИАГНОСТИКА СТРУКТУРЫ ПЛАЗМЫ МЕТОДОМ ФОКУСИРОВКИ ИЗОБРАЖЕНИЯ**О. Ю. Семенов^{1,a}, Т. В. Гавриленко^{1,2,b}**¹ Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация² Сургутский филиал Федерального государственного учреждения «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», г. Сургут, Российская Федерация^a ous.tutor.phinma@mail.ru, ^b taras.gavrilenko@gmail.com

Аннотация: предложен оптический метод изучения структуры короткоживущих, нестационарных и неустойчивых образований низкотемпературной плазмы, использующий ее рефракционные свойства. На основе имеющихся наблюдательных данных об оптических свойствах шаровой молнии и решения интегрального уравнения Абеля получены возможные радиальные распределения показателя преломления, концентрации заряженных частиц и температуры. Правильность предлагаемого подхода проверена в исследовании рефракции света при прохождении через сферический фронт пропановоздушного пламени. Методом цифровой фотометрии проведены сравнительные расчеты температурных полей в пламени, шаровой молнии и «однокомпонентном плазмоиде».

Ключевые слова: оптический метод, плазма, квазинейтральность, шаровая молния, сферическая линза, пропановоздушное пламя, уравнение Абеля, плазмоид.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН (выполнение фундаментальных научных исследований ГП 47) по теме № 0580-2021-0007 «Развитие методов математического моделирования распределенных систем и соответствующих методов вычисления».

Для цитирования: Семенов О. Ю., Гавриленко Т. В. Диагностика структуры плазмы методом фокусировки изображения. *Успехи кибернетики*. 2023;4(2):18–23. DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-2-03.

Поступила в редакцию: 29.05.2023.*В окончательном варианте:* 09.06.2023.**IMAGE FOCUSING METHOD FOR PLASMA STRUCTURE ANALYSIS****Semenov O. Yu.^{1,a}, Gavrilenko T. V.^{1,2,b}**¹ Surgut State University, Surgut, Russian Federation² Surgut Branch of Federal State Institute “Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences”, Surgut, Russian Federation^a ous.tutor.phinma@mail.ru, ^b taras.gavrilenko@gmail.com

Abstract: this study proposes an optical method for studying the structure of short-lived, non-stationary low-temperature plasmoids using the refractive properties of the plasma. We obtained possible radial distributions of the refractive index, concentration of charged particles, and temperature from the available observations of the ball lightning optical properties and the solution of the Abel integral equation. We verified the proposed method by measuring the refraction of light passing through the spherical front of a propane-air flame. The temperature fields in the flame, ball lightning, and “one-component plasmoid” were compared with digital photometry.

Keywords: optical method, plasma, quasi-neutrality, ball lightning, spherical lens, propane-air flame, Abel equation, plasmoid.

Acknowledgements: this study is a part of the government contract 47 GP with the Scientific Research Institute for System Analysis, Russian Academy of Sciences, project No. 0580-2021-0007 Advancing Distribution System Simulation and Computation Methods.

Cite this article: Semenov O. Yu., Gavrilenko T. V. Image Focusing Method for Plasma Structure Analysis. *Russian Journal of Cybernetics*. 2023;4(2):18–23. DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-2-03.

Original article submitted: 29.05.2023.*Revision submitted:* 09.06.2023.

Экспериментальное измерение физических параметров явлений, сопровождающих формирование плазменных структур, остается недоступным из-за невозможности их воспроизведения, малого времени существования и других причин. Это является причиной того, что природа этих явлений в течение долгого времени остается непонятой [1–3]. К явлениям подобного рода относятся искровые, коронные разряды, шаровая молния и др.



Рис. 1. Поверхность «стационарной» шаровой молнии [3]

Такие физические характеристики, как распределения показателя преломления, концентрации заряженных частиц и термодинамической температуры среды, могут быть получены из многочисленных и достоверных наблюдательных данных (рис. 1). Известно, например, что шаровая молния «выжигает» отпечатки изображений окружающих предметов на поверхностях близлежащих тел. На основании известных размеров изображений, диаметра шаровой молнии и расстояний между шаровой молнией и поверхностью, на которой строится изображение, можно предположить следующее.

Шаровая молния является «линзой» с фокусным расстоянием, превышающим ее диаметр. Под влиянием электрического поля шаровой молнии и наэлектризованных частиц пыли в воздухе отражательная способность поверхности тела и плотность поглощаемого ею потока теплового излучения перераспределяется в зависимости от освещенности отдельных участков.

Идея метода заключается в том, что сферическая линза может иметь фокусное расстояние, превышающее ее диаметр только в случае, если показатель преломления света в плазме изменяется в радиальном направлении. Известно, что при прохождении через оптическую неоднородность световой луч претерпевает угловое отклонение, пропорциональное градиенту показателя преломления в направлении, перпендикулярном направлению распространения света [4–8].

В случае осевой симметрии угловое отклонение луча $\varepsilon(r)$ является функцией радиуса оптической неоднородности и определяется интегральным уравнением Абеля:

$$\varepsilon(r) = \frac{2}{n_0} \int_{r=r_i}^R \left(\frac{\partial n}{\partial r} \right) \frac{r_i}{\sqrt{r^2 - r_i^2}} dr, \quad (1)$$

где r и R — текущий и максимальный радиус, а r_i — координата края оптической неоднородности, находящегося на линии наблюдения изображения, $\frac{\partial n}{\partial r}$ — радиальный градиент показателя преломления,

n_0 — показатель преломления света в окружающем воздухе. В случае фокусировки параллельных лучей в точке, находящейся на расстоянии F от центра шара, уравнение (1) может быть записано в виде:

$$\operatorname{arctg} \frac{r_i}{F} = \frac{2}{n_0} \int_{r=r_i}^R \left(\frac{\partial n}{\partial r} \right) \frac{r_i}{\sqrt{r^2 - r_i^2}} dr. \quad (2)$$

Решение интегрального уравнения (2) позволяет найти радиальное распределение показателя преломления света. Для нахождения распределения концентрации заряженных частиц в плазме n_q можно воспользоваться связью показателя преломления света n и диэлектрической проницаемостью среды: $\varepsilon: n = \sqrt{\varepsilon}$. Поскольку $\varepsilon = 1 + \frac{n_q l}{\varepsilon_0 E}$, то

$$n_q(r) = \pm \frac{n^2(r) - 1}{C}. \quad (3)$$

Знак правой части выражения (3) определяется знаком заряда. E и ε_0 — напряженность электростатического поля и диэлектрическая проницаемость плазмы, l — плечо полярной молекулы-диполя, $n_q(r)$ — концентрация заряженных частиц, $C = \frac{l}{\varepsilon_0 E}$. Вычисление постоянной C было произведено в предположении, что напряженность электростатического поля в плазме по порядку величины равна $\frac{kT}{ql}$, где k и T — постоянная Больцмана и абсолютная температура, q — заряд частицы [9–12].

Численное решение уравнения (2) осуществляли методом Шардина [4]. Значения радиуса шаровой плазмы R принимали равным в пределах от $5 \cdot 10^{-2}$ м до $1,2 \cdot 10^{-1}$ м. Величину фокусного расстояния шаровой линзы F выбирали такой, чтобы плоскость изображения была вблизи фокальной. Тогда выделяемая плазмой тепловая энергия не слишком рассеивается. Соответствующие радиусу шаровой плазмы значения F изменяли от $2R$ до $3R$. Типичные результаты численного решения системы уравнений (2)–(3) представлены на рис. 2–4.

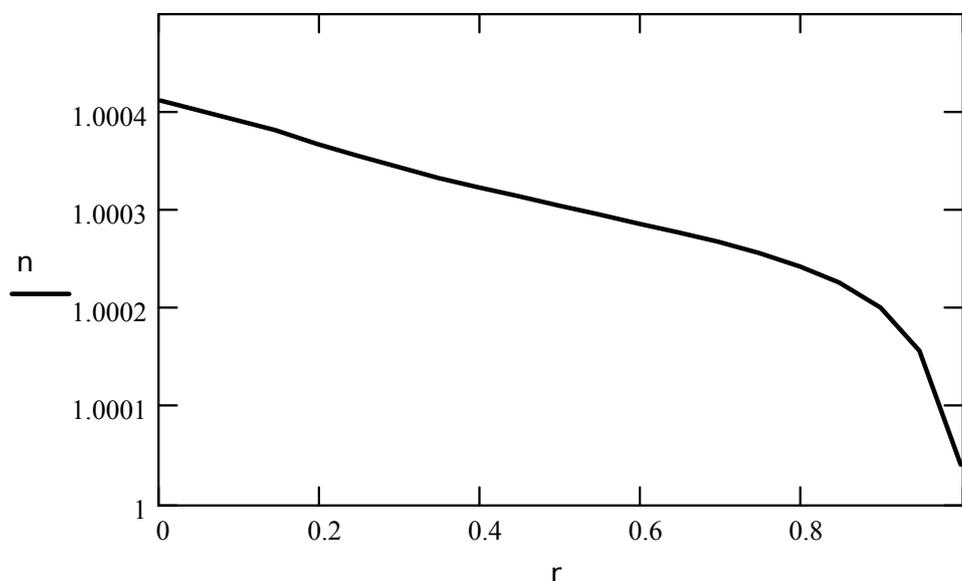


Рис. 2. Радиальное распределение показателя преломления света в шаровой молнии (сплошная линия)

Радиальное расстояние на оси абсцисс на всех графиках отложено в безразмерных единицах. Из рис. 2 видно, что показатель преломления света, как и следует из физических соображений, максимален в центре шара. Его почти линейное уменьшение при увеличении радиуса в центральной части шара объясняется парааксиальностью приосевых лучей [9, 13, 14].

Уменьшение концентрации отрицательно заряженных частиц, как следует из рис. 3, объясняется нелинейным уменьшением показателя преломления на границе шаровой поверхности. Квазинейтральность плазмы обеспечивается радиальным увеличением концентрации положительно заряженных частиц. Следствием квазинейтральности является устойчивость плазменного образования в виде шара [15–18].

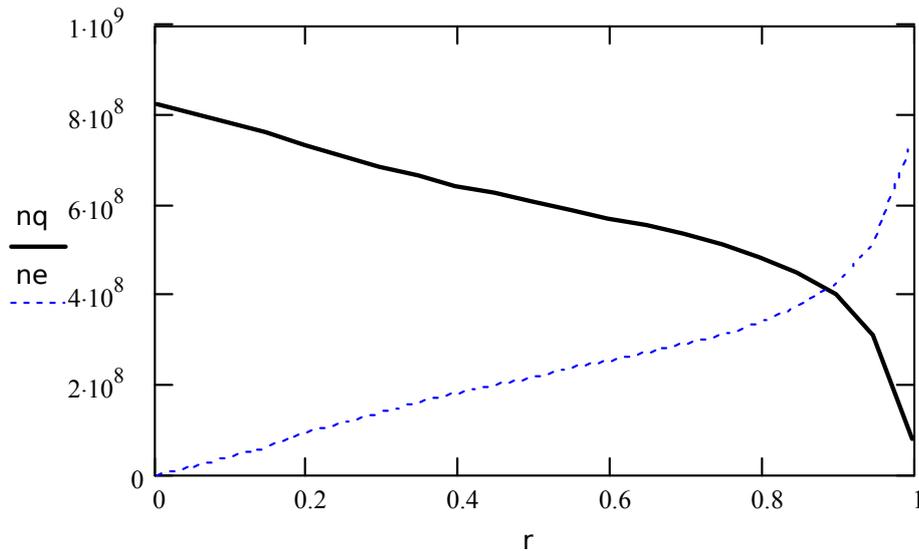


Рис. 3. Радиальное распределение концентрации электронов (сплошная линия) и положительных ионов (прерывистая линия) в шаровой молнии

Рассчитанные абсолютные значения концентрации заряженных частиц не превышают $8,2 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3}$ и гораздо меньше плотности молекул газа при нормальных условиях $2,7 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Согласно [19–22] плазму в шаровой молнии в этом случае можно считать слабоионизованной.

По результатам расчета распределения показателя преломления на основании закона Гладстона–Дейла [4–6] и уравнения состояния идеального газа рассчитывали радиальное распределение термодинамической температуры $T(r)$ плазмы по формуле:

$$T(r) = T_0 \frac{n_0 - n(r)}{n(r)}. \tag{4}$$

Здесь $T_0 = 293 \text{ К}$ — температура окружающего воздуха. Введение электронной температуры оказывается неоправданным, поскольку частота столкновений электронов друг с другом существенно меньше частоты передачи энергии от электрона к атому газа: $\nu_{ee} \ll \nu_{ea}$ [5]. Последнее условие дает выражение [5]: $n_e \ll n_a \cdot \frac{m}{M} \frac{\sigma T_e^2}{e^4 \ln \Lambda}$, где $\frac{m}{M}$ — отношение массы электрона к массе атома, $\ln \Lambda$ — кулоновский логарифм, σ — сечение упругого столкновения электрона с атомом, T_e — электронная температура, e — заряд электрона, n_e и n_a — концентрации электронов и атомов. Поскольку $\frac{m}{M} \ll 1$ и $\ln \Lambda = \left(\frac{T_e^2}{n_e e^6}\right)^{1/2} \ll 1$, а $\frac{\sigma T_e^2}{e^4 \ln \Lambda} \approx 1$, то условие $\nu_{ee} \ll \nu_{ea}$ выполняется.

Результаты расчёта распределения температуры представлены на рис. 4. Температура в центре шара низкая и принимает отрицательные значения (по шкале Цельсия). В тонком внешнем сферическом слое толщиной, меньшей $0,1 R$, температура повышается до 2000 К и более. Учитывая параметры физических механизмов переноса тепла, можно предположить, что понижение температуры в центре шара обусловлено потерей тепла вследствие интенсивного излучения на внешней границе. Следует отметить, что температура на поверхности шаровой плазмы возрастает обратно пропорционально ее диаметру. При $R = 6 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ температура не превышает 850 К . Полученные результаты соответствуют известным представлениям о тепловом излучении шаровой молнии.

Результаты расчётов показателя преломления света дублировали экспериментальными измерениями угловых отклонений лучей лазера при прохождении через сферический фронт пропановоздушного пламени. Расчёт распределений температуры в сферическом фронте пламени, «однокомпонентном плазмоиде» и шаровой молнии проводили, используя метод цифровой фотометрии [23–25]. Цифровые фотографии шаровой молнии, «плазмоида» представлены на рис. 5.

Зависимости, представленные на рис. 2–4, свидетельствуют о возможности применения предлагаемого метода для описания структуры плазменных образований по их известным оптическим свойствам [13, 26–29].

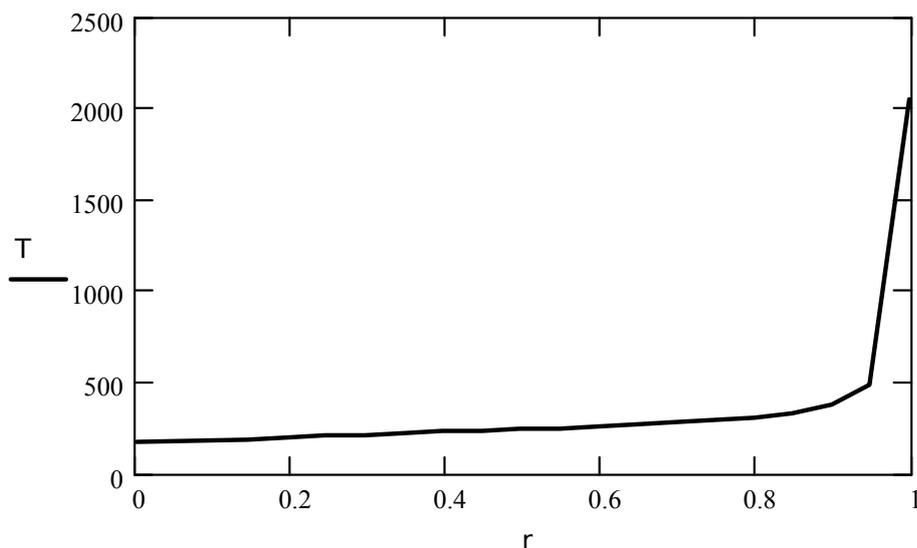


Рис. 4. Радиальное распределение температур в шаровой молнии (сплошная линия)

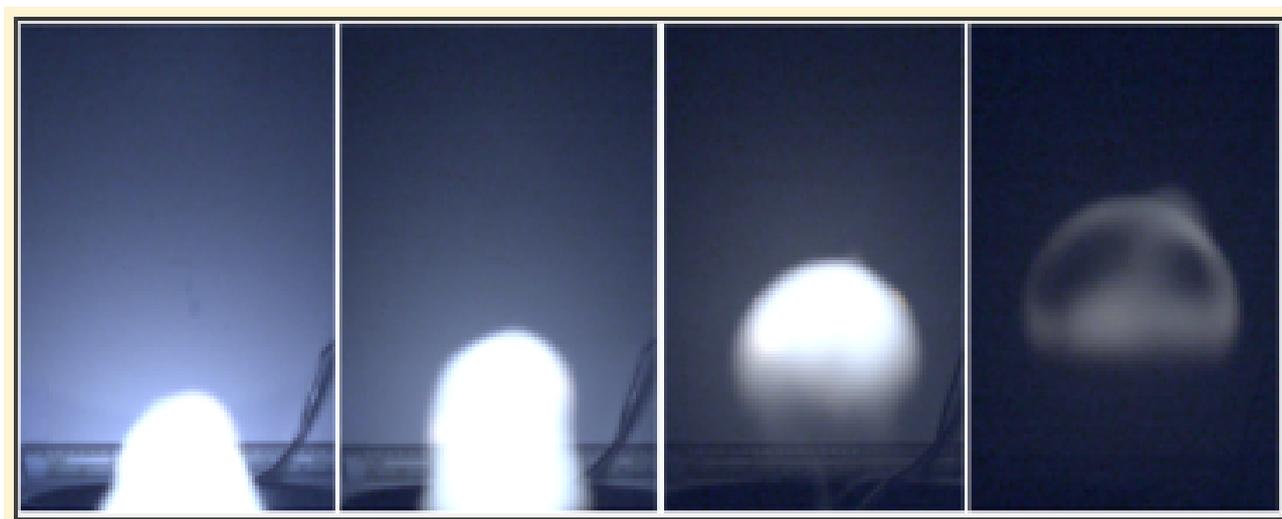


Рис. 5. Фотографии шаровой молнии [26]

В данной работе предлагается физическая идея использования способности оптической неоднородности строить изображения окружающих предметов для расчета физических параметров внутри оптической неоднородности, идея проиллюстрирована на примере шаровой молнии. Достоверность метода проверена путем экспериментальных измерений угловых отклонений световых лучей в сферическом пламени. В области сравнимых по величине температур угловые отклонения одинаковы, расчёты температур подтверждаются измерениями независимым методом — методом цифровой фотометрии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Капица П. Л. О природе шаровой молнии. *ДАН СССР*. 1955;101(2):245–248.
2. Стаханов И. П. *О физической природе шаровой молнии*. М.: Энергоатомиздат; 1985. 209 с.
3. Шабанов Г. Д., Жеребцов О. М. Электрический разряд в воздушное полупространство. *Оптический журнал*. 2004;71(1):6–8.
4. Аbruков С. А. *Теневые и интерференционные методы исследования оптических неоднородностей*. Казань: Изд-во. Каз. гос. ун-та; 1962. 83 с.
5. Смирнов Б. М. *Проблема шаровой молнии*. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит.; 1988. 208 с.

6. Ратис Ю. Л. *Шаровая молния как макроскопическое квантовое явление*. Самара: Изд-во СНЦ РАН; 2004. 132 с.
7. Торчигин В. П., Торчигин А. В. Шаровая молния как концентрат света. *Химия и жизнь*. 2003;1:47–49.
8. Семенов О. Ю. Визуализация фронта пламени в узком плоском канале. *XII Международная научная конференция «Интеллект и наука»*: Сб. науч. тр. Железногорск, 2012. С. 173–174.
9. Shabanov G. D., Sokolovsky V. Yu. Macroscopic Separation of Charges in a Pulsed Electric Discharge. *Plasma Physics Reports*. 2005;31(6):512.
10. Шабанов Г. Д. Оптические свойства долгоживущих плазменных светящихся образований. *Письма в ЖТФ*. 2002;28(4):81–86.
11. Егоров А. И., Степанов С. И. Долгоживущие плазмиды — аналоги шаровой молнии, возникающие во влажном воздухе. *ЖТФ*. 2002;72(12):102–104.
12. Егоров А. И., Степанов С. И., Шабанов Г. Д. Демонстрация шаровой молнии в лаборатории. *УФН*. 2004;174(1):107–109.
13. Alekseev M. M., Smirnova I. V., Semenov O. Y., Samsonov V. P. Modeling Edge Flame Propagation in a Stratified Fuel Gas-Air Mixture. *Technical Physics Letters*. 2012;38(11):1010–1012.
14. Шибков В. М., Александров А. Ф., Кузовников А. А. *Свободно локализованный СВЧ-разряд в воздухе* / Под ред. Р. Ф. Авраменко, В. Л. Бычкова, А. И. Климова, О. А. Синкевича. М.: Химия; 1994.
15. Смирнов Б. М. *Физика слабоионизованного газа*. М.: Наука; 1978. 416 с.
16. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений*. 2-е изд., доп. М.: Наука; 1966. 688 с.
17. Semenov O. Yu., Dyomko A. I. Liquid and Gas Optical Flowmeter Model Development. *AIP Conference Proceedings*. 2019;2141(1):050010-1-050010-10. DOI: 10.1063/1.5122153.
18. Donoso J., Trueba J. L., Rañada A. F. The Riddle of Ball Lightning: A Review. *The Scientific World Journal*. 2006;6:254–278. DOI: 10.1100/tsw.2006.48.
19. Doe R. K. Ball Lightning: An Elusive Force of Nature. *Forces of Nature and Cultural Responses*. 2012:7–26. DOI: 10.1007/978-94-007-5000-5_2.
20. Alexeev M. M., Semenov O. Yu., Yakush S. E. Experimental Study on Cellular Premixed Propane Flames in a Narrow Gap Between Parallel plates. *Combustion Science and Technology*. 2019;191(7):1256–1275.
21. Dubowsky S. E., Friday D. M., Peters K. C., Zhao Z., Perry R. H., McCall B. J. Mass Spectrometry of Atmospheric-Pressure Ball Plasmoids. *International Journal of Mass Spectrometry*. 2015;376:39–45. DOI: 10.1016/j.ijms.2014.11.011.
22. Alanakyan Y. R., Bulankin D. A., Pevgov V. G., Smirnov L. V., Tsvetkov A. A. About the Nature of Bead Lightning and Laboratory “Plasmoids”. *Doklady Physics*. 2020;65(1):1–4. DOI: 10.1134/s1028335820010036.
23. Самсонов В. П., Алексеев А. М. Метод цифровой фотометрии в исследовании структуры вихревого пламени. *Письма в ЖТФ*. 2007;33(11):34–39.
24. Yakush S. E., Borisov V. E., Alexeev M. M., Semenov O. Yu. Experimental and Numerical Study of Premixed Flame Propagation in Narrow Gaps. *9th International Seminar on Flame Structure. 9 ISFS Book of Abstracts*. 2017. С. 92. Режим доступа: http://www.kinetics.nsc.ru/kcp/9ISFS/9ISFS_Book_of_abstracts.pdf
25. Shmatov M. L., Stephan K. D. Advances in Ball Lightning Research. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2019:105115. DOI: 10.1016/j.jastp.2019.105115.
26. Friday D. M., Broughton P. B., Lee T. A., Schutz G. A., Betz J. N., Lindsay C. M. Further Insight into the Nature of Ball-Lightning-Like Atmospheric Pressure Plasmoids. *The Journal of Physical Chemistry A*. 2013;117(39):9931–9940. DOI: 10.1021/jp400001y.
27. Bychkov V. L., Nikitin A. I., Dijkhuis G. C. Ball Lightning Investigations. *Physics of Earth and Space Environments*. 2010:201–373. DOI: 10.1007/978-90-481-3212-6_6.
28. Bulgakov A. A., Yefimov B. P., Kuleshov A. N., Khorunzhiy M. O. Experimental Investigation into Spherical Plasma Formations. *Telecommun. Radio Eng.* 2005;64:833–839.
29. Wurden C. J. v., Wurden G. A. Free-Floating Atmospheric Pressure Ball Plasmas. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2011;39(11):2078–2079.