

УДК 533.98

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-4-66-74>

Наблюдение долгоживущих плазменных образований в тороидальном воздушном вихре при нормальных условиях

А. С. Иванов¹✉

¹ Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук – филиал Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук
ул. Ак. Королева, д. 1, г. Пермь 614018, Российская Федерация

✉ e-mail: lesnichiy@icmm.ru

Резюме

Цель. Экспериментально исследовать отличие характерного времени жизни плазменных образований в неподвижном и вращающемся тороидальном объеме воздуха при нормальных окружающих условиях.

Методы. Экспериментальное исследование плазмоедов осуществлено методом видеосъемки высокоскоростной камерой с последующей кадровой обработкой записи. Генерация плазмоедов выполнялась методом механического разрыва плазменного шнура сварочной дуги в поле постоянных магнитов. Создание тороидального вращения плазменного образования в воздухе возникает при прохождении его сквозь отверстие в твердом экране. Численная оценка механических сил, действующих на ионы в воздушном вихре, выполнена по порядку величины на основе данных эксперимента.

Результаты. Созданы две различные по конструкции лабораторные установки для наблюдения плазменных образований в воздухе при нормальных внешних условиях. Время жизни таких «долгоживущих» плазмоедов в воздухе равно примерно двум миллисекундам, что существенно превышает время жизни плазмоеобразующей сварочной дуги в свободном состоянии при тех же условиях. Увеличение времени жизни плазмоеда рассматривается и объясняется в рамках механических представлений о пространственном разделении тяжелых и легких ионов внутри плазмы под действием сил инерции в результате вращательного движения воздуха. Предложенная механическая модель является заведомо упрощенной и не учитывает диффузионные, рекомбинационные и прочие сопутствующие явления, так как основное и единственное отличие наблюдаемых «долгоживущих» и «обычных» плазмоедов заключается в характере механического движения среды.

Заключение. Созданы и описаны две экспериментальные установки, позволяющие получать и наблюдать поведение плазменных образований с характерным временем жизни порядка двух миллисекунд. Результаты наблюдений косвенно подтверждают простую механическую гипотезу о связи времени жизни свободного плазменного образования с вращательным движением газа внутри него.

Ключевые слова: плазмоеды; тороидальный вихрь; воздух.

Финансирование: Работа выполнена в рамках госбюджетной темы № АААА-А20-120020690030-5.

Конфликт интересов: Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Иванов А. С. Наблюдение долгоживущих плазменных образований в тороидальном воздушном вихре при нормальных условиях // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2023. Т. 13, № 4. С. 66–74. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-4-66-74>.

Поступила в редакцию 27.09.2023

Подписана в печать 20.11.2023

Опубликована 25.12.2023

Observation of Long-Lived Plasma Formations in a Toroidal air Vortex under Normal Conditions

Aleksey S. Ivanov¹✉

¹ Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of Russian Academy of Sciences
1 Koroleva Str., Perm 614018, Russian Federation

✉ e-mail: lesnichiy@icmm.ru

Abstract

Purpose. Experimentally investigate the difference between the characteristic lifetime of plasma formations in a stationary and rotating toroidal air volume under normal ambient conditions.

Methods. Experimental study of plasmoids was carried out by videotaping with a high-speed camera with subsequent frame-by-frame processing of the recording. Generation of plasmoids was performed by mechanical rupture of the plasma cord of the welding arc in the field of permanent magnets. The creation of toroidal rotation of the plasma formation in air occurs when it passes through a hole in a solid screen. Numerical estimation of mechanical forces acting on ions in the air vortex is performed by order of magnitude using experimental data.

Results. Two different in design laboratory installations for observation of plasma formations in air under normal external conditions have been created. The lifetime of such "long-lived" plasmoids in air is equal to about two milliseconds, which significantly exceeds the lifetime of a plasma-forming welding arc in the free state under the same conditions. The increase in plasmoid lifetime is considered and explained within the framework of mechanical ideas about spatial separation of heavy and light ions inside the plasma under the action of inertia forces as a result of rotational motion of air. The proposed mechanical model of the phenomenon is obviously simplified and does not take into account diffusion, recombination and other related phenomena, since the main and only difference between the observed "long-lived" and "ordinary" plasmoids lies in the nature of the mechanical motion of the medium.

Conclusion: Two experimental setups allowing to generate and observe the behavior of plasma formations with a characteristic lifetime of the order of two milliseconds are created and described. The results of observations indirectly confirm a simple mechanical hypothesis about the connection between the lifetime of a free plasma formation and the rotational motion of the gas inside it.

Keywords: plasmoids; toroidal vortex; air.

Financing: The work was carried out within the framework of the state budget topic No. AAAA-A20-120020690030-5.

Conflict of interest: The author declare no apparent or potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Ivanov A. S. Observation of Long-Lived Plasma Formations in a Toroidal Air Vortex under Normal Conditions. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies.* 2023; 13(4): 66–74. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-4-66-74>

Received 27.09.2023

Accepted 20.11.2023

Published 25.12.2023

Введение

Экспериментальное изучение плазмидов осложнено их малым временем жизни и спецификой экспериментальной аппаратуры. Известно несколько способов их получения в лабораторных условиях. Первый способ заключается в испарении металлов электрическим током (взрыв проволоки) [1–3], что применяется в ряде

прикладных задач: при синтезе нанодисперсного металлического порошка [4]; моделировании взрывных волн в газах и жидкостях [5]; в конструкциях пиропатронов и пироболтов [1]. Этот метод также применялся для исследования шаровой молнии [6; 7], однако такая плазма содержит ионы испаренного металла и лишь отдаленно напоминает природное явление по экспериментально измеренному спек-

тру излучения [8]. При этом взрыв проводочки [1] обязывает использовать специально подготовленные помещения и средства защиты. Второй способ использовался при проверке гипотезы о поддержании горения плазмы (восполнение числа рекомбинирующих ионов) за счет подводимого к ней коротковолнового радиоизлучения [9]. Третий способ заключается в получении плазмоедов электрическим разрядом в газах [10; 11]. По мнению авторов [10], длительное время жизни плазмоедов (порядка 0,5 с) можно обеспечить за счет гидратации ионов.

Цель настоящей работы – экспериментальное исследование характерного времени жизни плазменных образований в неподвижном и вращающемся тороидальном объёме воздуха при нормальных окружающих условиях. Идея исследования состояла в том, что положительно и отрицательно заряженные ионы плазмы значительно отличаются по массе и подвижности, поэтому вращательное движение плазмоеда должно приводить к неоднородному пространственному распределению ионов, а следовательно, к увеличению времени их рекомбинации. Из этого качественного рассуждения следует прогноз, что у плазмоеда с внутренним вращением время жизни должно быть больше, чем у неподвижного. Качественный анализ известных экспериментальных работ позволяет интерпретировать их результаты в пользу этого предположения. Так, в [7] сравнивается взрыв проводочки, свернутой в спираль, образующей поверхность тора, со взрывом «пробной» несвернутой проводочки. Плазмоед, получаемый из свернутой проводочки, в момент взрыва приобретает сильное внутреннее вращение, и время его жизни существенно превышает время жизни пробного плазмоеда без вращения. С другой стороны, в [12] описаны долгоживущие гидратированные плазмоеды, ионы которых связаны с молекулами водяного пара. По

оценкам [13], кластеры из молекул воды замедляют рекомбинацию ионов: с каждым ионом оказывается связанной некоторая присоединенная масса нескольких молекул воды. Эти рассуждения тоже косвенно подтверждают сделанное предположение.

Материалы и методы

Лабораторные исследования выполнены на двух установках. В первой установке свободные плазмоеды создавались искровым разрядом внутри стеклянной кюветы с отверстием в крышке (рис. 1, а, б). Диаметр кюветы 20 мм, её высота 17 мм, а диаметр отверстия 1,5 мм. Через боковые стенки кюветы вводились медные электроды А, К диаметром 1 мм, снаружи вводы изолировались шеллаком [14]. Межэлектродное расстояние подбиралось опытным путем и составляло примерно 0,8 мм. К электродам подключался генератор Кокрофта – Уолтона номиналом 1,3 кВ. Электрический заряд, протекавший по искровому промежутку, не превышал 6,5 мКл. Кювета заполнялась дистиллированной водой ниже уровня электродов. Подогрев камеры снизу пламенем спиртовки приводил к кипению воды и искровому разряду в межэлектродном пространстве. Часть ионизированного воздуха выбрасывалась наружу в виде плазмоеда аналогично тому, как появляется дымовое кольцо в известном демонстрационном опыте о распространении одиночных воздушных вихрей [15, с. 252]. Наблюдение искрового разряда и тороидального плазмоеда, вылетающего из отверстия камеры, проводилось с помощью видеокамеры.

Во второй установке источником плазмы была электрическая дуга, зажжённая между стальными электродами А и К диаметром 3 мм (рис. 1, с). Для получения свободных плазмоедов производился отрыв части плазменного шнура силой Ампера, действующей со

стороны постоянного магнита NS. Ориентация магнитного поля и направление тока в электродах выбирались так, чтобы после отрыва от плазменного шнура плазмоид двигался по направлению к круглому отверстию D в металлическом экране M. При прохождении плазмоида сквозь отверстие в нем создавалось тороидальное вращение. Экран был изготовлен из алюминиевого листа толщиной 1 мм, диаметр отверстия (2 мм) подбирался опытным путем. На рисунке 2 даны кадры плазменной дуги в

установке без экрана, снятые на низкоскоростную камеру YCH 03 High resolution (25 кадров в секунду). На рисунке 2, А показан момент поджигания электрической дуги при соприкосновении электродов. При разведении электродов плазменный шнур, по которому протекает электрический ток, отклоняется силой Ампера в направлении векторного произведения элемента тока на индукцию магнитного поля (рис. 2, В). Смена полярности приводит к изменению направления силы Ампера (рис. 2, С).

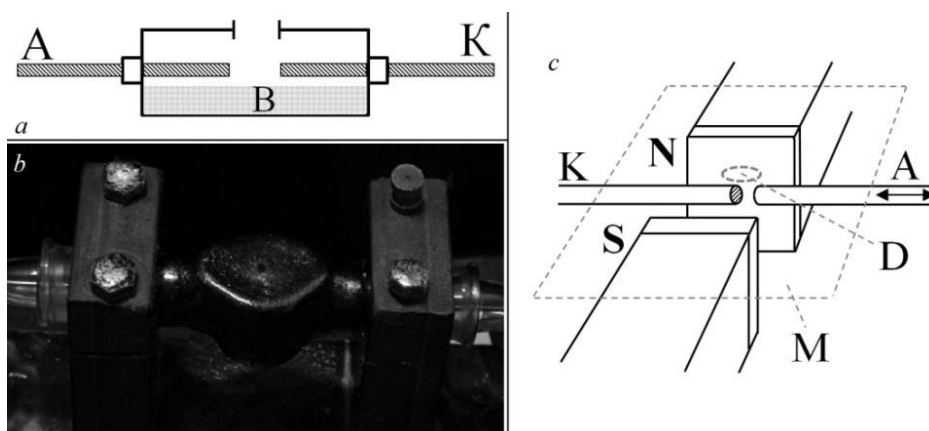


Рис. 1. Схематичное изображение (а) и внешний вид (b) кюветы первой установки с электродами А, К и слоем воды В. Вторая установка (с) с неподвижным и подвижным электродами К и А соответственно в поле постоянных магнитов NS (пунктиром обозначен экран М с отверстием D)

Fig. 1. Schematic representation (a) and view (b) of the cuvette of the first setup with electrodes A, K and water layer B. Second setup (c) with fixed and mobile electrodes K and A, respectively, in the field of permanent magnets NS (The dotted line indicates a screen M with a hole D)

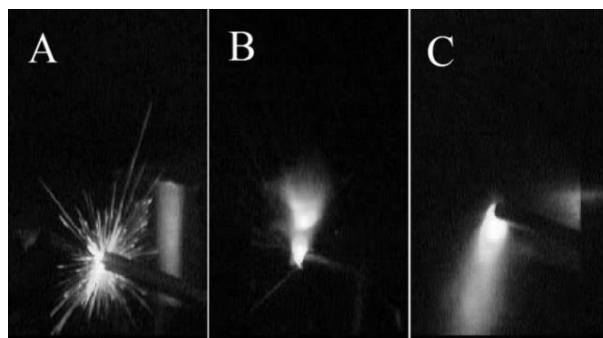


Рис. 2. Плазменный шнур в зазоре постоянного магнита: А – поджиг электрической дуги; В, С – сила Ампера отклоняет плазмоид вверх и вниз при смене полюсов магнита или направления сварочного тока

Fig. 2. Plasma cord in the gap of a permanent magnet: A – ignition of electric arc; B, C - Ampere force deflects the plasmoid up and down when changing magnet poles or welding current direction

В качестве источника тока I использовался сварочный аппарат инверторного типа Fubag IN-130, ток I поддерживался около 70 А. Увеличение I вызывало сварку электродов, а снижение I уменьшало силу Ампера и характерный диаметр получающихся плазмOIDов. Контакт электродов для розжига плазменного шнура осуществлялся вручную, а их разъединение выполнялось электроприводом (50 Вт). Магнитное поле создавалось SmCo-магнитами, соединёнными в магнитную цепь ярмом из магнитомягкой стали. Индукция поля в воздушном зазоре измерялась прибором РШ1-10 и по порядку величины равнялась 0,2 Тл. Видеосъёмка осуществлялась несколькими камерами, в том числе Fujifilm Finepix HS10 со скоростью 1000 кадров в секунду с разрешением 224x64 пикселя.

Результаты и их обсуждение

На рисунке 3 показаны кадры, снятые на первой установке, где запечатлён момент электрического пробоя (видна кипящая вода) и появление плазмOIDа, поднявшегося над кюветой примерно на 0,5 мм. Для определения формы плазмOIDов съёмка велась сверху и сбоку (рис. 3, i-iv). ПлазмOIDы имели форму диска, однако их малый размер, низкая разрешающая способность камеры и засветка кадра в момент искрового пробоя не позволили определить форму точнее. Отметим, что плазмOID продолжал светиться и после того, как в кювете вспышка уже погасла, т. е. его время жизни больше, чем длительность породившей его искры. Возможности первой установки ограничивались яркостью плазмOIDов: ускорение съёмки уменьшает экспозицию кадров и слабое свечение не регистрируется, а применение светочувствительных камер [16] невозможно из-за засветки матрицы исходной искрой.

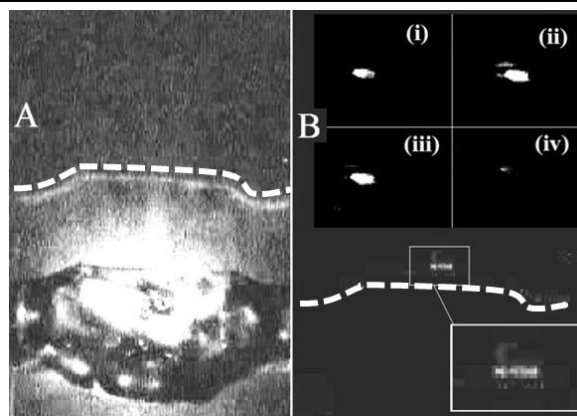


Рис. 3. Искра в кювете (А) создаёт плазмOID (В, снизу). Штриховая линия дублирует верхний контур кюветы с отверстием. Фото нескольких плазмOIDов (i), (ii), (iii), (iv) при ракурсе съёмки, как на рисунке 1, b

Fig. 3. Spark in the cuvette (A) generates plasmoid (B). The dashed line duplicates the top contour of the cuvette with the hole. Images of different plasmoids (i), (ii), (iii), (iv). Camera was placed as in case of Figure 1, b

Опыты на второй установке представлены на рисунке 4. На кадрах (А) верхней и (А, В, С) нижней раскадровки видно отверстие, освещенное разрядом под экраном. На кадрах (В, С, D) верхней и (D) нижней раскадровок видна плазма, проходящая через отверстие экрана. На кадрах (Е) наблюдается оторвавшийся плазмOID. Кадры (F) позволяют определить время жизни плазмOIDа (<2 мс), что следует из скорости видеосъёмки. Формирование плазмOIDа показано на рисунках 4, 5: плазма, прошедшая через отверстие экрана, расширяется и тормозится (рис. 4, D, E).

Это формирует квазисферический плазмOID с тороидальным вращением. Отметим, что плазмOIDы с внутренним вращением существуют и дольше плазменного шнура, породившего их, и дольше всей остальной невращающейся окружающей плазмы. Это видно на рисунке 4: под экраном, где зажигается дуга (рис. 4, D) виден яркий свет, а на рисунке 4, E его нет, т. к. ионы плазмы

успели рекомбинировать, в то время как плазмоид продолжает излучать свет. Плазма без вращательного движения выгорает быстрее, что подтверждает рисунок 5, А: рекомбинация ионов замедлена в наружном слое, где тяжёлые и

лёгкие ионы максимально отличаются по концентрации из-за центробежной силы. Так, сферический слой плазмоида (рис. 5, А) продолжает светиться даже тогда, когда его внутренний объём уже погас.

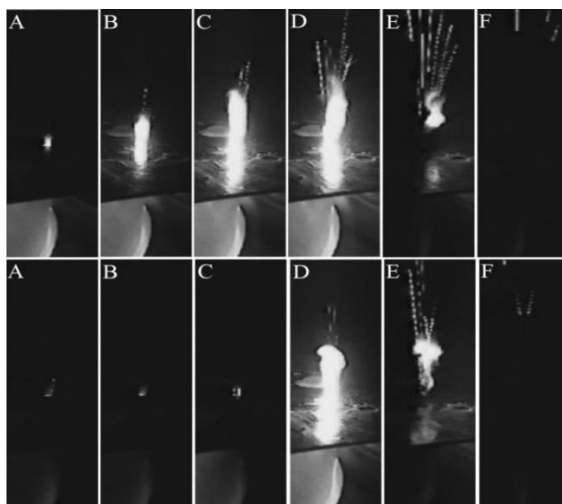


Рис. 4. Свободные плазмоиды, образованные из плазменного шнура, прошедшие через отверстие в экране (два опыта)

Fig. 4. Free plasmoids formed from the plasma cord that passed through the hole in the screen (two cases)

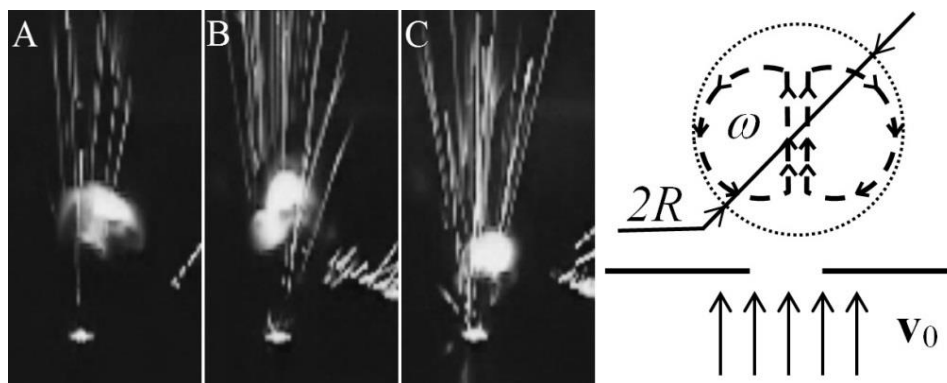


Рис. 5. Фото трёх (А, В, С) квазисферических плазмоидов (справа – схема образования плазмоида с тороидальным вращением)

Fig. 5. Images of three (A, B, C) quasi-spherical plasmoids (on the right there is a formation scheme for a plasmoid with toroidal rotation)

Качественно опишем наблюдения в рамках простой механической модели вращающегося плазмоида (см. рис. 5, справа) с тем уточнением, что эта модель не учитывает важнейшие диффузионные, рекомбинационные и прочие сопутствующие явления. Выбор модели аргументируется тем, что единственным

отличием наблюдаемых «долгоживущих» и «обычных» плазмоидов является характер их механического движения, тогда как остальные процессы в них остаются одинаковыми. Для численной оценки воспользуемся известными параметрами плазмы искрового разряда в газах при нормальных условиях [17; 18]:

относительная магнитная проницаемость порядка 1, радиус Дебая Rd порядка 0,1 мм, числовая плотность n_e ионов порядка 10^{16} м^{-3} . Столь малая концентрация (в сравнении со значением 10^{24} для молекул воздуха при н.у.) позволяет рассматривать плазмоиды как воздушные вихри с небольшой примесью рекомбинирующих ионов. Газовые вихри в форме тора образуются благодаря торможению газа на краях отверстия экрана – периферийная часть струи замедляется относительно ее центральной части. Эта модель совпадает с современными представлениями о наличии тороидных течений газа и плазмы в свободных плазмоидах [19; 20]. Вращение газа приводит к центрифугированию ионов и формированию у них неоднородного радиального распределения. Так как массы ионов отличаются на несколько порядков, их пространственное перераспределение по концентрации становится неодинаковым, что замедляет рекомбинацию и увеличивает время жизни плазмоида.

Для оценки предположим, что плазма до экрана двигалась поступательно и равномерно со скоростью v_0 , а после прохождения экрана замедлилась и начала вращаться с угловой скоростью w (см. рис. 5, справа). После экрана плазмоид имеет форму тора с внешним диаметром $2R$ и угловой скоростью вращения $w = v_0/R$. Сопоставляя кадры С, D на рисунке 4, оценим скорость: 25 м/с. Аналогично, сравнивая следующую пару кадров D, E, отметим резкое замедление плазмоида до

скорости порядка 3 м/с, что оправдывает сказанные предположения. По кадрам оценивается радиус плазмоида $R = 10$ мм, тогда w имеет порядок 10^4 рад/с. Быстрое вращение плазмоида позволяет говорить о конкуренции между центробежной силой и силой электрического притяжения между электроном и однократно ионизированным ионом плазмы. Оценим отношение центробежной F_r и кулоновской F_c сил для тяжелого иона (F_c вычислена для электрона и иона на расстоянии Rd):

$$\frac{F_r}{F_c} = \frac{2\pi\epsilon_0 m_i w^2 R_d^2 R}{q_e^2} \approx 0,5, \quad (1)$$

где ϵ_0 – диэлектрическая постоянная вакуума; m_i , q_e – масса иона (для оценки взята масса молекулы азота) и заряд электрона соответственно. Значит, сила инерции имеет тот же порядок величины, что и сила электростатического притяжения, что подкрепляет основную гипотезу.

Выводы

Созданы и описаны два вида лабораторных установок, позволяющих получать свободные плазмоиды со временем жизни порядка 2 мс (определено по раскадровке скоростной видеосъемки). Результаты наблюдений и простая числовая оценка (1) подтверждают гипотезу о связи времени жизни свободного плазмоида с вращательным движением газа внутри него.

Список литературы

1. Чейс У. Г. Взрывающиеся проволочки // Успехи физических наук. 1965. Т. 85, вып. 2. С. 381–386.
2. Ткаченко С. И. Моделирование ранней стадии электрического взрыва проводника // Журнал технической физики. 2000. Т. 70, № 7. С. 138–140.
3. Демидов, В. А., Скоков В. И. О границах бесплазменного режима электровзрыва фольги // Прикладная механика и техническая физика. 2000. Т. 41, № 1. С. 14–20.

4. Баранов М. И. Получение дисперсных материалов с микронными, субмикронными и наноструктурными частицами вещества при электрическом взрыве тонких металлических проводников // *Электротехника и электромеханика*. 2012. № 4. С. 45–49.
5. Underwater electrical wire explosion and its applications / Y. E. Krasik, A. Grinenko, A. Sayapin [et al.] // *Transactions on plasma science*. 2008. Vol. 36, no. 2. P. 423–434.
6. Власов А. Н. О возможности формирования тороидального токового слоя при искровом разряде // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 1990. Т. 97. С. 468–475.
7. Власов А. Н. Мощный импульсный индукционный разряд с плотной плазмой внутри индуктивного накопителя энергии // *Вестник Рязанского радиотехнического университета*. 2007. № 21. С. 73–81.
8. Cen J., Ping Y., Simin X. Observation of the optical and spectral characteristics of ball lightning // *Physical Review Letters*. 2014. Vol. 112, is. 3. Art. no. 035001-5.
9. Корум К., Корум Дж. Эксперименты по созданию шаровой молнии при помощи высокочастотного разряда и электрохимические фрактальные кластеры // *Успехи физических наук*. 1990. Т. 160, вып. 4. С. 47–58.
10. Егоров А. И., Степанов С. И., Шабанов Г. Д. Демонстрация шаровой молнии в лаборатории // *Успехи физических наук*. 2004. Т. 174, вып. 1. С. 107–109.
11. Капица П. Л. О природе шаровой молнии // *Доклады АН СССР*. 1955. Т. 101, № 2. С. 245–248.
12. Ohtsuki Y., Ofuruton H. Plasma fireballs formed by microwave interference in air // *Nature*. 1991. Vol. 350. P. 139–141.
13. Шевкунов С. Рассеяние радиоволн сантиметрового диапазона в ионизированном радиоактивным излучением газе. Формирование кластерной плазмы // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2001. Т. 119, вып. 3. С. 485–508.
14. Стронг Д. Техника физического эксперимента. Л.: Лениздат, 1948. 662 с.
15. Фенман, Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Т. 7. Физика сплошных сред. М.: Мир, 1977. 267 с.
16. Экспериментальное исследование импульсного коронного разряда в воздухе / Ю. К. Стишков, А. В. Самусенко, А. С. Субботский, А. Н. Ковалев // *Журнал технической физики*. 2010. Т. 80, вып. 11. С. 21–28.
17. Blandford R., Thorne K. *Applications of classical physics*. Pasadena: California Institute of Technology, 2005. 336 p.
18. Гинзбург В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. 2-е изд., перераб. М.: Наука, 1967. 683 с.
19. Toward a theory of ball lightning occurring in houses and aircraft / J. J. Lowke, W. Heil, E. Tam, A. B. Murphy // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2021. Vol. 214. Art. no. 105532.
20. Spatio-temporal structure and emission of a large plasmoid in atmosphere / R. Friedl, U. Fantz, I. Pilottek [et al.] // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2021. Vol. 54. Art. no. 095205.

References

1. Chase W. G. Exploding wires. *Physics Today*, 1964, vol. 17, no. 8, pp. 19–24.
2. Tkachenko S. I. Modelirovanie rannei stadii elektricheskogo vzryva provodnika [Modeling of the early stage of electrical explosion of a conductor]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki = Journal of Technical Physics*, 2000, vol. 70, no. 7, pp. 138–140.
3. Demidov V. A., Skokov V. I. Boundaries of the plasma-free regime of electroexplosion of a foil. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2000, vol. 41, pp. 10–16.
4. Baranov M. I. Poluchenie dispersnykh materialov s mikronnymi, submikronnymi i nanostrukturnymi chastitsami veshchestva pri elektricheskome vzryve tonkikh metallicheskiikh provodnikov [Preparation of disperse materials with micron, submicron and nanostructured particles of matter at electric explosion of thin metal conductors]. *Elektrotekhnika i elektromekhanika = Electrical Engineering and Electromechanics*, 2012, no. 4, pp. 45–49.
5. Krasik Y., Grinenko E. A., Sayapin A., eds. Underwater Electrical wire explosion and its applications. *Transactions on plasma science*, 2008, vol. 36, no. 2, pp. 423–434.

6. Vlasov A. N. O vozmozhnosti formirovaniya toroidal'nogo tokovogo sloya pri iskrovom razryade [Possible formation of a toroidal current layer during a spark discharge]. *Zhurnal eksperimental'noi i teoreticheskoi fiziki = Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1990, vol. 70, no. 2, pp. 259–262.
7. Vlasov A. N. Moshchnyi impul'snyi induktsionnyi razryad s plotnoi plazmoi vnutri induktivnogo nakopitelya energii [Powerful pulse induction discharge with a dense plasma inside the inductive energy accumulator]. *Vestnik Ryazanskogo radiotekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Ryazan Radio Engineering University*, 2007, no. 21. pp. 73–81.
8. Cen J., Ping Y., Simin X. Observation of the optical and spectral characteristics of ball lightning. *Physical Review Letters*, 2014, vol. 112, is. 3, art. no. 035001-5.
9. Corum K., Corum J. Eksperimenty po sozdaniyu sharovoi molnii pri pomoshchi vysokochastotnogo razryada i elektrokhimicheskie fraktal'nye klasteri [Experiments on creation of ball lightning by means of high-frequency discharge and electrochemical fractal clusters]. *Uspekhi fizicheskikh nauk = Physics-Uspekhi*, 1990, vol. 160, 4, pp. 47–58.
10. Egorov A. I., Stepanov S. I., Shabanov G. D. Laboratory demonstration of ball lightning. *Physics-Uspekhi*, 2004, vol. 47, pp. 99–101.
11. Kapitza P. L. On the nature of ball lightning. Experiment, theory, practice. *Boston Studies in the Philosophy of Science*, 1980, vol. 46, pp. 47–52.
12. Ohtsuki Y., Ofuruton H. Plasma fireballs formed by microwave interference in air. *Nature*, 1991, Vol. 350, pp. 139–141.
13. Shevkunov S. V. Scattering of centimeter radiowaves in a gas ionized by radioactive radiation: Cluster plasma formation. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2001, vol. 92, pp. 420–440.
14. Strong J. Procedures in experimental physics. New-York, Prentice Hall, 1938. 642 p.
15. Feynman R. P., Leighton R. B., Sands M. Feynman lectures on physics. Pasadena, California Institute of Technology Publ., 1963, vol. 3. 350 p.
16. Stishkov Y. K., Samusenko A. V., Subbotskii A. S., eds. Experimental study of pulsed corona discharge in air. *Technical Physics*, 2010, vol. 55, pp. 1569–1576.
17. Blandford, R., Thorne K. Applications of classical physics. Pasadena: California Institute of Technology Publ., 2005. 336 p.
18. Ginzburg V. L. Rasprostranenie elektromagnitnykh voln v plazme [Propagation of electromagnetic waves in plasma]. 2th ed. Moscow, Nauka Publ., 1967. 683 p.
19. Lowke J. J., Heil W., Tam E., Murphy A. B. Toward a theory of ball lightning occurring in houses and aircraft. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2021, vol. 214, art. no. 105532.
20. Friedl R., Fantz U., Pilottek I., eds. Spatio-temporal structure and emission of a large plasmoid in atmosphere. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2021, vol. 54, art. no. 095205.

Информация об авторе / Information about the Author

Иванов Алексей Сергеевич, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией «Динамики дисперсных систем», Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук – филиал Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь, Российская Федерация,
e-mail: lesnichiy@icmm.ru,
ORCID: 0000-0003-1743-3526

Aleksey S. Ivanov, Candidate of Science (Physics and Mathematics), Head of the laboratory "Dynamics of dispersed systems", Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation,
e-mail: lesnichiy@icmm.ru,
ORCID: 0000-0003-1743-3526