

УДК 53.09; 53.043
EDN: RZSGXS

PACS: 07.50.-e; 37.10.Ty

Удержание микрочастиц в квадрупольной ловушке с прямоугольной формой напряжения в условиях атмосферного давления

© М. С. Доброклонская*, Л. М. Василяк, В. И. Владимиров, В. Я. Печеркин

*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, 125412 Россия***E-mail: m.dobro42@gmail.com**Статья поступила в редакцию 22.04.2026; после доработки 15.05.2026; принята к публикации 5.06.2026
Шифр научной специальности: 1.3.9*

Численно рассчитаны и экспериментально подтверждены области удержания заряженных микрочастиц диаметром 5–50 мкм в линейной квадрупольной ловушке, работающей в воздухе при атмосферном давлении с импульсным знакопеременным прямоугольным напряжением. Установлено влияние амплитуды напряжения, его частоты и асимметрии прямоугольных импульсов на положение и ширину областей удержания, которые зависят от диаметра частиц. Обнаружено, что в ловушке с синусоидальным напряжением можно переключать траектории частиц между устойчивым и неустойчивым режимами с помощью дополнительных прямоугольных импульсов внешнего знакопеременного электрического поля путем изменения его частоты. Экспериментально изучена возможность захвата и удержания микрочастиц в квадрупольной ловушке с коронным разрядом на электродах.

Ключевые слова: линейная квадрупольная ловушка, импульсно-периодическое напряжение, заряженные микрочастицы, воздух, атмосферное давление.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-3-41-46

Введение

Линейные электродинамические ловушки с синусоидальным удерживающим напряжением используются для разных задач: исследования свойств как отдельных частиц, так и кулоновских структур, определение размеров и заряда частиц по их траекториям в квадрупольном поле и др. [1–4]. По своей конструкции линейная квадрупольная ловушка близка к масс-спектрометрам и масс-фильтрам, для улучшения возможностей которых в последнее время исследуются возможности применения прямоугольной формы (часто называют цифровой) фильтрующего напряжения [5–13]. Наши исследования показали [14–16], что прямоугольная форма напряжения имеет ряд преимуществ для удержания заряженных частиц микронного размера в

квадрупольных линейных ловушках в воздухе при атмосферном давлении. Для прямоугольного напряжения теоретические исследования областей устойчивости фильтров [5–12] и ловушек ионов [13] выполнены для вакуумных условий, где динамика частиц зависит только от отношения заряда к массе Q/m , т.е. выполняется закон подобия. На удержание заряженных частиц микронных размеров в ловушке в воздухе при атмосферном давлении существенное влияние оказывают силы гравитации и вязкого трения, поэтому расчёты областей удержания, полученные для вакуума, неприменимы, и требуются расчёты с учетом сил гравитации и вязкого трения для каждого размера частиц. Целью работы являлись расчёты областей удержания для частиц различных размеров (5–50 мкм) для асимметричных импульсов

напряжения разной частоты, экспериментальные исследования и выяснение влияния на удержания внешнего электрического поля и плазмы коронного разряда.

Экспериментальная установка и расчетная модель

Схема эксперимента аналогична приведенной в [14–16]. Линейные цилиндрические электроды ловушки диаметром 4 мм и длиной 10 см закреплены в вершинах квадрата со стороной 2 см. К линейным электродам прикладывается импульсно-периодическое знакопеременное напряжение прямоугольной формы частотой 50 и 100 Гц и регулируемой амплитудой V до 10 кВ. Для импульсов асимметричной формы принято, что отношение длительности импульса положительной полярности к длительности периода следования импульсов называется коэффициентом заполнения импульсов положительной полярности K_p . Влияние плазмы коронного разряда исследовалось в квадрупольной ловушке с тонкими электродами длиной 110 мм и диаметрами 63, 120 и 200 мкм, расположенными на расстоянии 1 см. Использовались диэлектрические полидисперсные частицы Al_2O_3 с размерами 1–80 мкм. Зарядка микрочастиц производилась индукционным способом на металлической пластинке с постоянным потенциалом 5–7 кВ.

Поскольку нахождение областей удержания для таких условий путем аналитического исследования уравнений является сложной задачей, то использовался численный метод, основанный на расчетах устойчивых и неустойчивых траекторий частиц. Физические параметры модели были выбраны в соответствии с экспериментами. Расчетная схема подробно описана в [15, 16] и заключалась в решении уравнения Ланжевена с учетом силы гравитации и силы трения по формуле Стокса $F_f = -6\pi\mu r v$, где r – радиус частицы, μ – вязкость воздуха, v – скорость частицы. Начальное положение частицы в ловушке – на 350 мкм ниже центра потенциальной ямы ловушки, начальная скорость частицы нулевая. Расчет проведен для частиц размерами 5, 10, 20, 50 мкм в воздухе при атмосферном давлении для разных форм сигнала напряжения на электродах (синусоидальной и прямоугольной).

Результаты и обсуждение

На рисунке 1 показаны области удержания (расчет) в координатах «амплитуда напряжения – заряд частицы» для синусоидального и прямоугольного (меандр) напряжения при частоте 50 Гц для частиц размером 50 и 20 мкм. Области расширяются при снижении напряжения. На нижней границе сил электрического поля ловушки недостаточно для компенсации силы гравитации и частица падает вниз из ловушки. На верхней границе электрические силы столь велики, что частицы вылетают из ловушки. Для частиц 50 мкм области для синусоидального (1) и прямоугольного (2) напряжения близки по размеру, но область 2 смещена в сторону уменьшения заряда, что согласуется с ранее полученным экспериментальным результатом [14], где заряженная частица удерживалась при меньшей амплитуде прямоугольного напряжения. Поскольку в случае прямоугольного потенциала электрическое поле с амплитудным значением действует значительно более длительное время, чем при синусоиде, то частицы удерживаются при меньшей амплитуде напряжения. По этой же причине на верхней границе частицы вылетают из ловушки при меньшей амплитуде напряжения, а в результате вся область удержания смещается влево и вниз. Область удержания 3 для частиц с размерами 20 мкм сдвинута в область ещё меньших зарядов по сравнению с областью 2 для частиц 50 мкм. С уменьшением диаметра уменьшается сила гравитации и вязкое трение, поэтому частица легче удерживается при малом заряде.

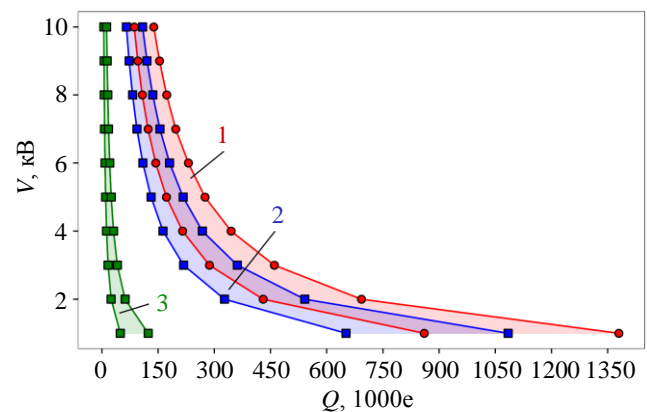


Рис. 1. Области удержания частиц для разных форм напряжения при частоте 50 Гц (расчет): 1 (красная) – синусоидальное, 50 мкм; 2 (синяя) – прямоугольное (меандр, $K_p = 50\%$), 50 мкм; 3 (зеленая) – прямоугольное, 20 мкм

На рисунке 2 показаны области удержания (расчет) для частиц 50 мкм для меандра при частотах 50 Гц (2, синяя) и 100 Гц (1, красная). При повышении частоты до 100 Гц область удержания 1 сместилась в сторону более высоких зарядов частиц настолько далеко, что области 1 и 2 не пересекаются. Следовательно, частицы, которые удерживаются в ловушке при частоте 50 Гц, не будут удерживаться при повышении частоты до 100 Гц. Этот факт был проверен экспериментально. В ловушке при амплитуде напряжения 4 кВ (меандр) и частоте 50 Гц удерживалось облако из большого количества частиц. При увеличении частоты с шагом 20 Гц количество частиц постепенно уменьшалось, и при 100 Гц в ловушке не осталось ни одной частицы.

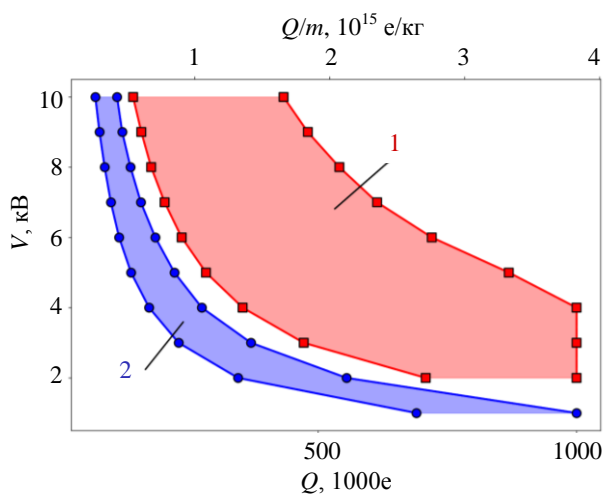


Рис. 2. Области удержания частиц диаметром 50 мкм для меандра. 1 (красная) – частота 100 Гц; 2 (синяя) – 50 Гц

Для синусоидального удерживающего напряжения амплитудой 5 кВ, частотой 50 Гц и для напряжения на зарядной пластине 2,5 кВ в эксперименте удерживаются частицы от 2 до 60 мкм, среднее значение – 26 мкм. Оценка физически возможного заряда для частиц 20 мкм (15 625–195 312 е) на 100 % перекрывает расчетную область удержания (12 600–32 800 е). Для частиц 5 мкм пересечение составляет 87 % (976–12 207 е против 2 600–9 300 е), для 50 мкм – около 30 % (97 656–1 220 703 е против 178 100–278 100 е). Поскольку в распределении исходной смеси изначально мало частиц – меньше 10 мкм и больше 40 мкм, то полученное в эксперименте распределение частиц по размеру аналогично распределению частиц в исходной смеси.

Таким образом, эксперимент подтверждает расчёт.

На рис. 3 для частиц 20 мкм при частоте 50 Гц показано влияние заполнения положительной полуволны K_p на области удержания (расчет). Удержание возможно при $K_p = 50\%$, 40%, 35% за счет баланса сил. При $K_p = 40\%$ область 2 лежит внутри области 1 ($K_p = 50\%$) и сдвинута вправо в область более высоких зарядов; при $K_p = 35\%$ область 3 стала еще более узкой и сдвинулась еще правее, выйдя за границу области 1. Следовательно, с увеличением асимметрии импульсов диапазон устойчивых зарядов сужается. Для частиц 5 и 50 мкм удержание возможно только при $K_p = 50\%$ (меандр). Лёгкие частицы (5 мкм) при асимметричных импульсах сильнее смещаются и притягиваются к электродам, а крупные (50 мкм) из-за инерционности не успевают вернуться за время короткой полуволны. Частицы 10 мкм удерживаются при $K_p = 50\%$ и 40%. Экспериментальные данные по осаждению захваченных частиц качественно согласуются с расчётом.

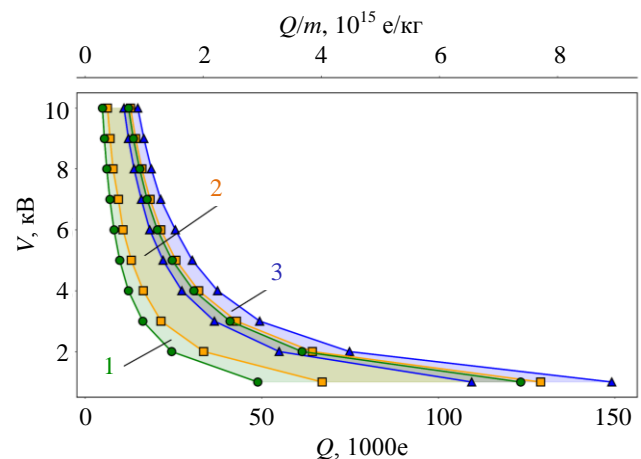


Рис. 3. Области удержания микрочастиц диаметром 20 мкм при частоте 50 Гц для различных значений заполнения положительного импульса K_p : 1 – меандр $K_p = 50\%$ (зеленая область); 2 – 40% (оранжевая); 3 – 35% (синяя)

Экспериментально и численно исследовано воздействие внешнего импульсно-периодического знакопеременного электрического поля, частота которого менялась в диапазоне 20–170 Гц, на траектории частиц в ловушке при синусоидальном удерживающем напряжении (5–7 кВ, 50 Гц). Внешнее электрическое поле создавали две металлические

пластины, размещенные на расстояниях 2 см от электродов ловушки, на которые подавалось импульсное напряжение (3–5 кВ) в форме меандра. Обнаружено, что как в расчетах, так и экспериментально – внешнее электрическое поле раскачивает две различные неустойчивости: вылет частиц при частоте 27 Гц и выпадение при 200 Гц. При 125 Гц наблюдается стабилизация траекторий, уменьшение осцилляций частиц и уменьшение расстояния между частицами. Результаты расчета согласуются с расчётами. На рис. 4 приведены рассчитанные траектории: слева показана устойчивая траектория без внешнего электрического поля, справа – при частоте внешнего поля 27 Гц происходит раскачка неустойчивости, размах траектории увеличивается с каждым колебанием, частица вылетает из ловушки.

Влияние плазмы на удержание частиц было исследовано в квадрупольной ловушке с электродами диаметром 63, 120 и 200 мкм, длиной 11 см и расстоянием между электродами 1 см. Пороговое напряжение зажигания: 2,6 кВ для 63 и 120 мкм, 4,0 кВ для 200 мкм. С электродами 63 и 120 мкм захватывались частицы размером 2–8 мкм, для 200 мкм – 40–60 мкм. Устойчивое удержание частиц – при токах коронного разряда 15–70 мкА. На рис. 5 приведено изображение удерживаемых частиц в ловушке с диаметром электродов 63 мкм с прямоугольными импульсами напряжения (меандр) амплитудой 3,2 кВ, частотой 50 Гц и токе коронного разряда 30 мкА. Количество удерживаемых частиц при напряжении в форме меандра намного больше, чем при синусоидальном напряжении той же амплитуды.

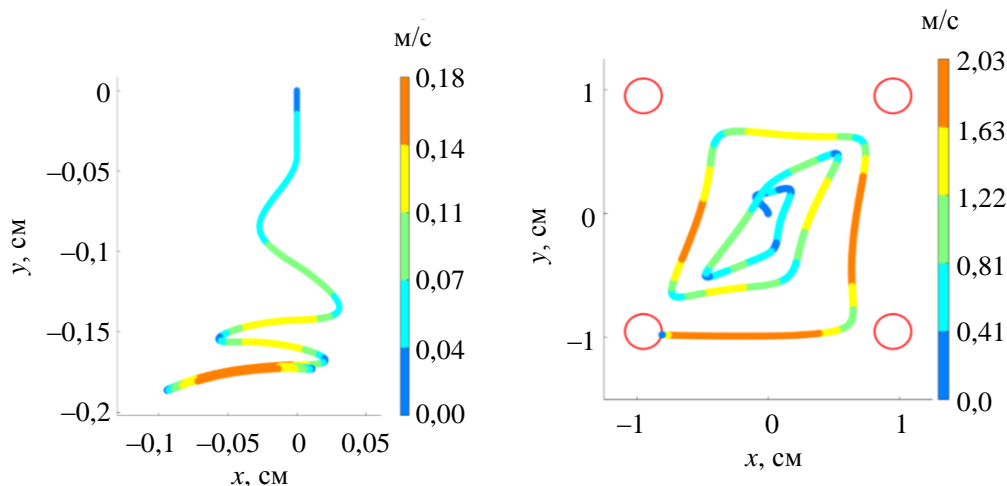


Рис. 4. Слева: устойчивая траектория без внешнего электрического поля. Справа: траектория вылета частицы из ловушки при частоте внешнего поля 27 Гц. Цветом показаны скорости частиц. Частица: заряд 98 000 е, диаметр 20 мкм. Прямоугольное напряжение (меандр) на пластинах: $V = 5$ кВ. Удерживающее синусоидальное напряжение на электродах ловушки $V = 7$ кВ, 50 Гц

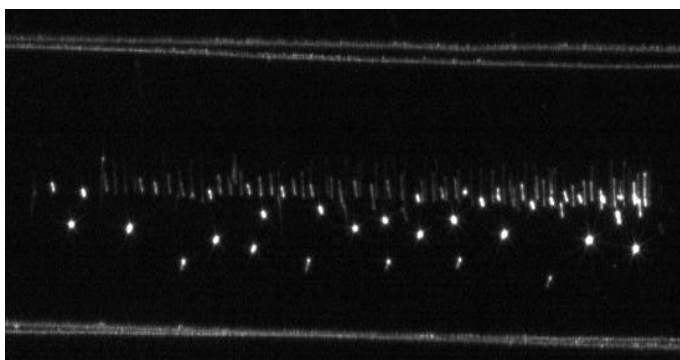


Рис. 5. Фото захваченных микрочастиц ловушкой с плазмой коронного разряда

Заключение

Экспериментальные и численные исследования показали, что области удержания зависят от размеров частиц, и закон подобия отношения заряда к массе не выполняется. Такое отличие позволяет селективно влиять на частицы определенного размера. Установлено, что форма удерживающего напряжения существенно влияет на области устойчивости. Прямоугольное удерживающее напряжение (меандр) позволяет удерживать частицы с меньшим зарядом, чем синусоидальное, благодаря более длительному воздействию электрического поля с амплитудным значением. Увеличение частоты удерживающего напряжения смещает и расширяет области удержания в сторону более высоких напряжений и зарядов, что позволяет селективно отсеивать частицы. Для асимметричных импульсов прямоугольного напряжения при уменьшении коэффициента заполнения K_p область удержания сужается и сдвигает её в область более высоких зарядов, давая возможность избирательно удерживать или отсеивать частицы разного размера. Внешнее электрическое поле в виде меандра позволяет управлять динамикой частиц в ловушке с синусоидальным удерживающим напряжением: изменяя частоту внешнего электрического поля можно вызвать выпадение частиц или раскочку неустойчивости и вылет частиц из ловушки. Существует область частот, при которых внешнее электрическое поле стабилизировало неустойчивые траектории частиц в ловушке, уменьшая при этом размах колебаний и расстояние между частицами. Экспериментально обнаружено, что в квадрупольной линейной ловушке с плазмой коронного разряда с прямоугольным напряжением в форме меандра удерживается намного больше частиц, чем при синусоидальном напряжении, причем в узкой области токов коронного разряда, а размер удержива-

емых частиц зависит от диаметра коронирующих электродов.

Работа выполнена при поддержке
Министерства науки и высшего образования
Российской Федерации (Государственное задание
№ 075-00270-26-00).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mihalcea B. M., Filinov V. S., Syrovatka R. A., Vasilyak L. M. / Phys. Rep. 2023. Vol. 1016. P. 1–103.
2. Rybin V. V., Rudy S. S., Kokorina O. / JVE. 2020. Vol. 32. P. 156–159.
3. Rudy S. S., Vasilyev M., Rybin V. V., Rozhdestvensky Yu. V. / Int. J. Mass Spectrom. 2022. Vol. 479. P. 116894.
4. Rybin V. V., Rudy S. S., Rozhdestvensky Yu. V. / Int. J. Non-Linear Mech. 2022. Vol. 147. P. 104227. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2022.104227>
5. Reilly P. T. A., Chakravorty S., Bailey C. F., Obe F. O., Huntley A. P. / J. Am. Soc. Mass Spectrom. 2021. Vol. 32. № 10. P. 2615.
6. Simke F., Fischer P., Marx G., Schweikhard L. / Int. J. Mass Spectrom. 2021. Vol. 473. P. e116779.
7. Ivanov A. I., Sysoev A. A., Konenkov N. V. / Eur. J. Mass Spectrom. 2024. Vol. 30. № 3–4. P. 143.
8. Ivanov A. I., Sysoev A. A., Konenkov A. N., Konenkov N. V. / J. Mass Spectrom. 2024. Vol. 59. № 6. P. e5030.
9. Шеретов Э. П., Терентьев В. И. / ЖТФ. 1972. Т. 42. С. 953.
10. Richards J. A., Huey R. M., Hiller J. / Int. J. Mass Spectrom. 1973. Vol. 12. P. 317.
11. Ding L., Sudakov M., Kumashiro S. / Int. J. Mass Spectrom. 2002. Vol. 221. P. 117.
12. Sudakov M., Nikolaev E. / Eur. J. Mass Spectrom. 2002. Vol. 8. P. 191.
13. Ding Li, Sun Lulu, Wang Weimin / Mass Spectrometry Reviews. 2026. P. 336. <https://doi.org/10.1002/mas.70022>
14. Доброклонская М. С., Василяк Л. М., Владимиров В. И., Печеркин В. Я. / Прикладная физика. 2023. № 2. С. 29–34.
15. Доброклонская М. С., Василяк Л. М., Владимиров В. И., Печеркин В. Я. / Прикладная физика. 2024. № 3. С. 93–98.
16. Доброклонская М. С., Печеркин В. Я., Владимиров В. В., Василяк Л. М. / Вестник Объединенного института высоких температур. 2024. Т. 15. С. 44–48.

Confinement of microparticles in a quadrupole trap with rectangular voltage at atmospheric pressure

M. S. Dobroklonskaya^{*}, L. M. Vasilyak, V. I. Vladimirov, and V. Ya. Pecherkin

Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences, Moscow, 125412 Russia

^{*}E-mail: m.dobro42@gmail.com

Received 22.04.2026; revised 15.05.2026; accepted 5.06.2026

The areas of confinement of charged microparticles with a diameter of 5–50 microns in a linear quadrupole trap with a pulsed alternating rectangular voltage in air at atmospheric pressure have been numerically calculated and experimentally confirmed. The influence of the voltage amplitude, its frequency, and the asymmetry of rectangular pulses on the position and width of the retention areas has been established. It is confirmed that the retention areas depend on the particle diameter. It has been found that in a trap with a sinusoidal voltage, it is possible to stabilize the trajectories of a particle or make them unstable by using additional rectangular pulses of an external alternating electric field by changing its frequency. The possibility of capturing and retaining microparticles in a quadrupole trap with a corona discharge on electrodes has been experimentally investigated.

Keywords: linear quadrupole trap, pulse-periodic voltage, charged microparticles, air, atmospheric pressure.

REFERENCES

1. Mihalcea B. M., Filinov V. S., Syrovatka R. A., and Vasilyak L. M., Phys. Rep. **1016**, 1–103 (2023).
2. Rybin V. V., Rudy S. S., and Kokorina O., JVE **32**, 156–159 (2020).
3. Rudy S. S., Vasilyev M., Rybin V. V., and Rozhdestvensky Yu. V., Int. J. Mass Spectrom. **479**, 116894 (2022).
4. Rybin V. V., Rudy S. S., and Rozhdestvensky Yu. V., Int. J. Non-Linear Mech. **147**, 104227 (2022).
<https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2022.104227>
5. Reilly P. T. A., Chakravorty S., Bailey C. F., Obe F. O., and Huntley A. P., J. Am. Soc. Mass Spectrom. **32** (10), 2615 (2021).
6. Simke F., Fischer P., Marx G., and Schweikhard L., Int. J. Mass Spectrom. **473**, e116779 (2021).
7. Ivanov A. I., Sysyov A. A., and Konenkov N. V., Eur. J. Mass Spectrom. **30** (3–4), 143 (2024).
8. Ivanov A. I., Sysyov A. A., Konenkov A. N., and Konenkov N. V., J. Mass Spectrom. **59** (6), e5030 (2024).
9. Sheretov E. P. and Terentev V. I., Technical Physics **42**, 953 (1972) [in Russian].
10. Richards J. A., Huey R. M., and Hiller J., Int. J. Mass Spectrom. **12**, 317 (1973).
11. Ding L., Sudakov M., and Kumashiro S., Int. J. Mass Spectrom. **221**, 117 (2002).
12. Sudakov M. and Nikolaev E., Eur. J. Mass Spectrom. **8**, 191 (2002).
13. Ding Li, Sun Lulu, and Wang Weimin, Mass Spectrometry Reviews **336** (2026). <https://doi.org/10.1002/mas.70022>
14. Dobroklonskaya M. S., Vasilyak L. M., Vladimirov V. I., and Pecherkin V. Ya., Applied Physics, № 2, 29–34 (2023) [in Russian].
15. Dobroklonskaya M. S., Vasilyak L. M., Vladimirov V. I., and Pecherkin V. Ya., Applied Physics, № 3, 93–98 (2024) [in Russian].
16. Dobroklonskaya M. S., Pecherkin V. Ya., Vladimirov V. V., and Vasilyak L. M., Herald of the Joint Institute for High Temperatures **15**, 44–48 (2024) [in Russian].

Об авторах

Доброклонская Марина Сергеевна, аспирант, Объединенный институт высоких температур РАН (125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2). E-mail: m.dobro42@gmail.com SPIN-код: 5232-9283, AuthorID: 1175259

Василяк Леонид Михайлович, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН (125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2). E-mail: vasilyak@ihed.ras.ru SPIN-код: 5623-5167, AuthorID: 19599, ORCID 0000-0001-6982-3038, Scopus ID 7004886755

Владимиров Владимир Иванович, старший научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН (125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2). E-mail: vid@ihed.ras.ru SPIN-код: 4150-6689, AuthorID: 26958

Печеркин Владимир Яковлевич, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН (125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2). E-mail: vpecherkin@yandex.ru SPIN-код: 4910-0417, AuthorID: 1089774, ORCID 0000-0001-7470-5132, Scopus ID 6507468054