

УДК 536.95
 EDN: MGRURO

PACS: 83.10.Mj; 05.20.-y; 05.40.-a

О среднеквадратичном смещении активной броуновской частицы с инерцией вращения в гармонической ловушке

© Е. А. Лисин^{1,2,*}, И. И. Лисина^{1,2}

¹ Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, 125412 Россия

* E-mail: eaLisin@yandex.ru

² Московский физико-технический институт, Московская область, г. Долгопрудный, 141701 Россия

Статья поступила в редакцию 6.11.2025; после доработки 25.11.2025; принята к публикации 11.12.2025

Шифр научной специальности: 1.3.9

Одной из нерешенных базовых задач в физике активной материи является аналитическое описание среднеквадратичного смещения активной броуновской частицы в гармонической ловушке с учетом поступательной и вращательной инерции частицы. Актуальность решения такой задачи обусловлена множеством экспериментов и рядом приложений с активными частицами, в которых инерционные эффекты могут играть существенную роль. В рамках модели активной броуновской частицы с поступательной и вращательной инерцией получено аналитическое выражение, описывающее эволюцию среднеквадратичного смещения частицы в гармонической ловушке.

Ключевые слова: активная материя; активные броуновские частицы; среднеквадратичное смещение.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-6-44-49

Введение

Активная материя – особая форма «мягкого» конденсированного вещества, которая представляет собой дисперсионную среду, содержащую мелкодисперсные активные частицы. Несмотря на свою простоту и отсутствие подвижных частей, такие частицы (также называемые нано- и микромоторами) способны автономно преобразовывать доступную в окружающей среде энергию в собственное направленное движение [1–3]. Системы таких частиц представляют большой интерес для статистической механики и материаловедения, имеют множество перспективных приложений: от чисто технических до биомедицинских. Синтетические активные частицы являются идеальными строительными блоками для динамической самосборки функциональных микроструктур нового поколения, способных выполнять специфические задачи автономным и целенаправленным образом.

Коллоидное активное вещество является перспективным в контексте разработки новых материалов с «программируемым» откликом. Развиваются также приложения, связанные с биохимическим анализом, сепарацией вещества, коллективной доставке груза и утилизации энергии хаотического движения [1, 2].

Одной из нерешенных базовых задач в физике активной материи является аналитическое описание среднеквадратичного смещения, $MSD(t)$, активной броуновской частицы в гармоническом потенциале с учетом поступательной и вращательной инерции частицы. Актуальность решения такой задачи обусловлена множеством экспериментов с активными частицами, в которых инерционные эффекты могут играть существенную роль [4–9]. На сегодняшний день задача решена только для ряда частных (предельных) случаев, а именно: $MSD(t)$ безынерционной активной броуновской частицы в ловушке [10–15]; $MSD(t)$ активной частицы Орнштейна-Уленбека с по-

ступательной инерцией в ловушке [16, 17]; MSD(t) свободной полностью инерционной активной броуновской частицы (с поступательной и вращательной инерцией) [18, 19]; MSD(при $t = \infty$) полностью инерционной активной броуновской частицы в ловушке [20].

В данной работе впервые выводится точное аналитическое выражение, описывающее эволюцию среднеквадратичного смещения, MSD(t), полностью инерционной активной броуновской частицы в гармонической ловушке.

Основные уравнения

В рамках модели активной броуновской частицы с поступательной и вращательной инерцией, двумерное движение сферической частицы (с массой M и моментом инерции J) в гармонической ловушке (характеризующейся частотой ω_0) в проекции на произвольную ось X описывается следующими уравнениями [18–20]:

$$M\ddot{x}(t) = -\nu_t M\dot{x}(t) + F_A \cos(\phi(t)) - M\omega_0^2 x(t) + F_B^{(x)}, \quad (1)$$

$$\ddot{\phi}(t) = -\nu_r (\dot{\phi}(t) + \sqrt{2D_r} \zeta_r(t)), \quad (2)$$

где ν_t и ν_r – коэффициенты затухания поступательного и вращательного движения частицы в вязкой среде; F_A – активная (движущая) сила, направление которой определяется ориентационным углом $\phi(t)$, измеряемым от оси X ; $F_B^{(x)}$ – x -компонента броуновской силы («поступательного» шума); $D_r = T / (\nu_r J)$ – коэффициент вращательной диффузии (здесь T – температура среды, выраженная в энергетических единицах); а ζ_r – гауссовый белый шум с нулевым средним значением и единичной дисперсией.

В стационарном состоянии зависящее от времени среднеквадратичное смещение частицы по оси X определяется как

$$\text{MSD}(t) \equiv \langle [x(t) - x(0)]^2 \rangle = 2\langle x^2 \rangle - 2\langle x(t)x(0) \rangle, \quad (3)$$

где $\langle x(t)x(0) \rangle$ – автокорреляционная функция положения частицы. Отметим, что $\text{MSD}(\infty) = 2\langle x^2 \rangle$. Поскольку «поступательный» и «вращательный» шумы не коррелируют, то MSD(t) можно записать как сумму двух слагаемых: первое слагаемое представляет собой хорошо известную формулу Уленбека–Орнштейна для пассивной броуновской частицы [21], а второе слагаемое является результатом вклада активной (движущей) силы. Здесь мы намеренно выключим поступательный шум (полагая $F_B = 0$), чтобы сосредоточиться на изучении вклада активной силы.

Согласно теореме Хинчина–Колмогорова автокорреляционную функцию положения частицы можно записать в виде

$$\langle x(t)x(0) \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-i\omega t} H^2(\omega) S(\omega) d\omega, \quad (4)$$

где $H(\omega) = (F_A / M) / (\omega_0^2 - \omega^2 + i\nu_t \omega)$ – передаточная функция, а $S(\omega)$ – спектральная плотность мощности процесса $\cos(\phi(t))$. Для стационарного процесса спектральная плотность мощности записывается как преобразование Фурье автокорреляционной функции:

$$S(\omega) = 2 \int_0^{\infty} \cos(\omega t) \langle \cos(\phi(t)) \cos(\phi(0)) \rangle dt, \quad (5)$$

где автокорреляционная функция имеет следующий вид [19, 20]

$$\begin{aligned} \langle \cos(\phi(t)) \cos(\phi(0)) \rangle &= \\ &= \frac{1}{2} \exp \left[-\frac{D_r}{\nu_r} (\nu_r t - 1 + e^{-\nu_r t}) \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

Результаты и их обсуждение

Интегрирование уравнения (5) после разложения в ряд автокорреляционной функции (6) позволяет получить спектральную плотность мощности процесса $\cos(\phi(t))$ в стационарном состоянии:

$$S(\omega) = e^{D_r/\nu_r} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-D_r/\nu_r)^m}{m!} \frac{D_r + m\nu_r}{(D_r + m\nu_r)^2 + \omega^2}. \quad (7)$$

Подставляя передаточную функцию $H(\omega)$ и выражение (7) в уравнение (4), и применяя теорему о вычетах, мы получили следующие формулы.

При неколебательном движении частицы в ловушке ($\omega_0 / \nu_t < 1/2$),

$$\langle x(t)x(0) \rangle = \frac{V_0^2 \alpha e^\xi}{8\omega_0^2} \times \left\{ e^{\frac{\nu_t t}{2}} \left[C_+ G_1 e^{\tilde{\Omega} t} + C_- G_2 e^{-\tilde{\Omega} t} \right] + \left[e^{-D_r t} \left[C_+ F_1(t) + C_- F_2(t) \right] \right] \right\}, \quad (8a)$$

где $V_0 = F_A / M \nu_t$ – «собственная» скорость частицы, рассчитанная на основе формального баланса активной и диссипативной сил в отсутствие поступательных и вращательных шумов; $\alpha = \nu_t / \nu_r$, $\xi = D_r / \nu_r$, $C_+ = 1 + 0,5 \nu_t / \tilde{\Omega}$, $C_- = 1 - 0,5 \nu_t / \tilde{\Omega}$, $\tilde{\Omega} = \sqrt{\nu^2 / 4 - \omega_0^2}$, $G_j = \xi^{-a_j} \gamma(a_j, \xi) + \xi^{-b_j} \gamma(b_j, \xi)$ и $F_j(t) = z^{-a_j}(t) \gamma(a_j, z(t)) - z^{-b_j}(t) \gamma(b_j, z(t))$, здесь $a_j = \xi + i \omega_j / \nu_r$, $b_j = \xi - i \omega_j / \nu_r$, $z(t) = \xi e^{-\nu_r t}$, $\omega_{1,2} = -i \nu_t / 2 \pm i \tilde{\Omega}$, а $\gamma(s, z) = \int_0^z y^{s-1} e^{-y} dy$ – нижняя неполная гамма-функция.

В колебательном режиме движения ($\omega_0 / \nu_t > 1/2$),

$$\langle x(t)x(0) \rangle = \frac{V_0^2 \alpha e^\xi}{4\omega_0^2} \times \left\{ e^{-\frac{\nu_t t}{2}} \left[\left(\text{Re}[G_2] + \frac{\nu_t}{2\Omega} \text{Im}[G_2] \right) \cos(\Omega t) + \left(\frac{\nu_t}{2\Omega} \text{Re}[G_2] - \text{Im}[G_2] \right) \sin(\Omega t) \right] + \left[e^{-D_r t} \left(\text{Re}[F_2(t)] + \frac{\nu_t}{2\Omega} \text{Im}[F_2(t)] \right) \right] \right\}, \quad (8б)$$

где $\text{Re}[\dots]$ и $\text{Im}[\dots]$ являются действительной и мнимой частями комплексных функций, а $\Omega = i \tilde{\Omega}$.

В стационарном состоянии при $t=0$ функция $\langle x(t)x(0) \rangle$ описывает среднеквадра-

точное положение частицы относительно центра ловушки:

$$\langle x^2 \rangle = \frac{V_0^2 \alpha e^\xi}{4\omega_0^2} \left\{ C_+ \frac{\gamma(a_1, \xi)}{\xi^{a_1}} + C_- \frac{\gamma(a_2, \xi)}{\xi^{a_2}} \right\} \quad \text{при} \quad \omega_0 / \nu_t < 1/2, \quad (9a)$$

и

$$\langle x^2 \rangle = \frac{V_0^2 \alpha e^\xi}{2\omega_0^2} \left\{ \text{Re} \left[\frac{\gamma(a_2, \xi)}{\xi^{a_2}} \right] + \frac{\nu_t}{2\Omega} \text{Im} \left[\frac{\gamma(a_2, \xi)}{\xi^{a_2}} \right] \right\} \quad \text{при} \quad \omega_0 / \nu_t > 1/2. \quad (9б)$$

Теперь для вычисления функции эволюции среднеквадратичного смещение частицы в стационарном состоянии, $\text{MSD}(t)$, достаточно подставить (8)–(9) в (3).

Важно отметить, что уравнения (9a) и (9б) совпадают с полученными ранее в работе [20] и проверенными на результатах численного моделирования. Также легко показать, что при $\nu_r \rightarrow \infty$ уравнение (8a) сводится к известной автокорреляционной функции $\langle x(t)x(0) \rangle_{\text{АОУР}}$ для модели активной частицы Орнштейна-Уленбека, которая часто используется для приближенного описания динамики активной броуновской частицы с учетом только лишь поступательной инерции [16, 17]. При $\omega_0 = 0$ выражение для $\text{MSD}(t)$ можно привести к формуле, полученной в работе [19] для свободной полностью инерционной активной броуновской частицы. Перечисленные факты подтверждают корректность полученных в данной работе формул.

При достаточно большой частоте ловушки ($\omega_0 \rightarrow \infty$) на временах $t \gg \omega_0^{-1}$ выражение для $\text{MSD}(t)$ частицы, описываемое формулами (3), (8б) и (9б), значительно упрощается и может быть представлено в элементарных функциях:

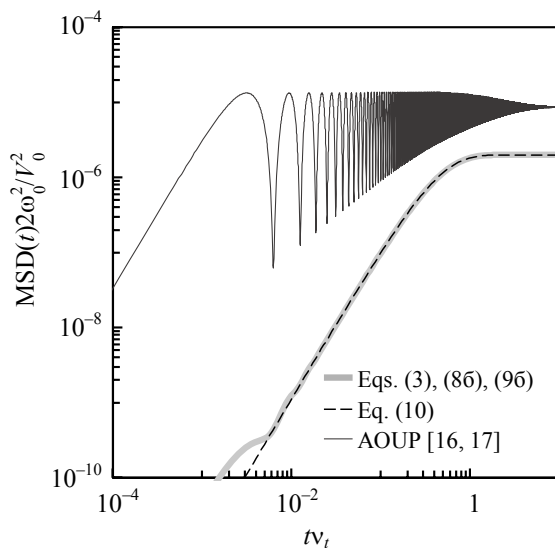
$$\text{MSD}(t) \approx \text{MSD}(\infty) \times \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{D_r}{\nu_r} (\nu_r t - 1 + e^{-\nu_r t}) \right] \right\}, \quad (10)$$

где

$$\text{MSD}(\infty) = \frac{(V_0 \nu_t)^2}{\omega_0^4}. \quad (11)$$

Интересной особенностью является отсутствие осцилляций в формуле (10), которые характерны для эволюции среднеквадратичного смещения как пассивной частицы [21], так и активной частицы Орнштейна-Уленбека [16]. На рисунке представлено нормированное $MSD(t)$ активной броуновской частицы шаровидной формы при $D_r/v_r=1$ и $\omega_0/v_t=1000$. Для сравнения на рисунок добавлено $MSD(t)$ активной частицы Орнштейна-Уленбека (АОУП) при $\omega_0/v_t=1000$ и без учета вращательной инерции частицы.

Легко заметить, что в пределе сильной ловушки $MSD(\infty)$ полностью инерционной активной частицы не зависит от v_r , а значит, и от вращательной инерции частицы. Кроме этого, $MSD(\infty)$ совпадает со среднеквадратичным смещением активной частицы Орнштейна-Уленбека [16] при $tv_t \gg 1$ и $D_r/v_t \ll 1$. Последнее выполняется, например, для частицы радиусом ~ 1 мкм, находящейся в газе при давлении ~ 1000 Па и более.



Нормированное среднеквадратичное смещение активной частицы при $\omega_0/v_t=1000$ в зависимости от времени. Сплошная толстая линия – полностью инерционная модель с $D_r/v_r=1$; сплошная тонкая линия – АОУП модель без учета вращательной инерции частицы

Заключение

В рамках модели активной броуновской частицы с поступательной и вращательной

инерцией впервые получены аналитические выражения, описывающие эволюцию среднеквадратичного смещения частицы в гармонической ловушке. Результаты данной работы могут быть полезны для описания динамики светочувствительных активных микрочастиц в газоразрядной плазме [4, 5], сверхтекучем гелии [6] и вакуумной оптической ловушке [22], а также микропловцов в акустической ловушке [23], макроскопических виброботов в параболическом конфайнменте [9] и др. Макроскопические инерционные активные частицы, приводимые в движение вибрацией и движущиеся по ограниченным траекториям, могут использоваться в качестве управляемого аналога транспортных средств или пешеходов для моделирования заторов в узких местах при оптимизации транспортных систем и проектировании общественных пространств [24]. Макроскопические инерционные активные частицы могут использоваться при создании механических метаматериалов и автономных устройств, приводимых в движение вибрацией [25, 26]. Обсуждаются идеи создания микрокопических тепловых машин на основе инерционной активной материи [27, 28].

Работа выполнена за счет гранта
Российского научного фонда № 24-22-00130
(<https://rscf.ru/project/24-22-00130/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арансон И. С. / Успехи физических наук. 2013. Т. 183 (1). С. 87–102.
2. Elgeti J., Winkler R. G., Gompper G. / Rep. Prog. Phys. 2015. Vol. 78. P. 056601.
3. Bechinger C., Di Leonardo R., Löwen H., Reichhardt C., Volpe G., Volpe G. / Rev. Mod. Phys. 2016. Vol. 88. P. 045006.
4. Nosenko V., Luoni F., Kaouk A., Rubin-Zuzic M., Thomas H. / Phys. Rev. Res. 2020. Vol. 2. P. 033226.
5. Arkar K., Vasiliev M. M., Petrov O. F., Kononov E. A., Trukhachev F. M. / Molecules. 2021. Vol. 26. P. 561.
6. Petrov O. F., Boltnev R. E., Vasiliev M. M. / Sci. Rep. 2022. Vol. 12. P. 6085.
7. Leoni M., Paoluzzi M., Eldeen S., Estrada A., Nguyen L., Alexandrescu M., Sherb K., Ahmed W. W. / Physical Review Research. 2020. Vol. 2 (4). P. 043299.
8. Deblais A., Barois T., Guerin T., Delville P. H., Vaudaine R., Lintuvuori J. S., Boudet J. F., Baret J. C., Kellay H. / Physical review letters. 2018. Vol. 120 (18). P. 188002.

9. Dauchot O., Démercy V. / Physical review letters. 2019. Vol. 122 (6). P. 068002.
10. Jiang H. R., Yoshinaga N., Sano M. / Physical review letters. 2010. Vol. 105 (26). P. 268302.
11. ten Hagen B., van Teeffelen S., Lowen H. / J. Phys.: Condens. Matter. 2011. Vol. 23. P. 194119.
12. Szamel G. / Physical Review E. 2014. Vol. 90 (1). P. 012111.
13. Das S., Gompper G., Winkler R. G. / New Journal of Physics. 2018. Vol. 20 (1). P. 015001.
14. Chaudhuri D., Dhar A. / Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment. 2021. Vol. 2021 (1). P. 013207.
15. Caraglio M., Franosch T. / Physical Review Letters. 2022. Vol. 129 (15). P. 158001.
16. Caprini L., Marconi U. M. B. / The Journal of Chemical Physics. 2021. Vol. 154 (2). P. 024902.
17. Nguyen G. P., Wittmann R., Löwen H. / Journal of Physics: Condensed Matter. 2021. Vol. 34 (3). P. 035101.
18. Lisin E. A., Vaulina O. S., Lisina I. I., Petrov O. F. / Physical Chemistry Chemical Physics. 2022. Vol. 24 (23). P. 14150–14158.
19. Sprenger A. R., Caprini L., Löwen H., Wittmann R. / Journal of Physics: Condensed Matter. 2023. Vol. 35 (30). P. 305101.
20. Gutierrez-Martinez L. L., Sandoval M. / The Journal of Chemical Physics. 2020. Vol. 153 (4). P. 044906.
21. Uhlenbeck G. E., Ornstein L. S. / Physical review. 1930. Vol. 36 (5). P. 823.
22. Li T., Kheifets S., Medellin D., Raizen M. G. / Science. 2010. Vol. 328 (5986). P. 1673–1675.
23. Takatori S. C., De Dier R., Vermant J., Brady J. F. / Nature communications. 2016. Vol. 7 (1). P. 10694.
24. Rozenblit A., Buzakov M., Molodtsova A., Dmitriev A., Olekhno N. 18th International Conference on Management of Large-Scale System Development. 2025. doi: 10.1109/MLSD65526.2025.11220665
25. Wang J., Wang G., Chen H., Liu Y., Wang P., Yuan D., Liu L. et al. / Nature communications. 2024. Vol. 15 (1). P. 8853.
26. Ning L., Zhu H., Yang J., Zhang Q., Liu P., Ni R., Zheng N. / National Science Open. 2024. Vol. 3(4). P. 20240005.
27. Kumari A., Pal P. S., Saha A., Lahiri S. / Physical Review E. 2020. Vol. 101 (3). P. 032109.
28. Hecht L., Mandal S., Löwen H., Liebchen B. / Physical Review Letters. 2022. Vol. 129 (17). P. 178001.

PACS: 83.10.Mj; 05.20.-y; 05.40.-a

On the mean square displacement of an active Brownian particle with rotational inertia in a harmonic trap

E. A. Lisin^{1,2,*} and I. I. Lisina^{1,2}

¹ Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Moscow, 125412 Russia

* E-mail: eaLisin@yandex.ru

² Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow Region, Dolgoprudny, 141701 Russia

Received 6.11.2025; revised 25.11.2025; accepted 11.12.2025

One of the unsolved problems in the physics of active matter is providing an analytical description of the mean square displacement of an active Brownian particle in a harmonic trap that takes into account the particle's translational and rotational inertia. Solving this problem is relevant because inertial effects can play a significant role in a number of experiments and applications involving active particles. Within the framework of a model of an active Brownian particle with translational and rotational inertia, an analytical expression has been obtained that describes the evolution of the mean square displacement of a particle in a harmonic trap.

Keywords: active matter; active Brownian particles; mean square displacement.

REFERENCES

1. Aranson I. S., Active colloids. Physics-Uspekhi **56** (1), 79 (2013).
2. Elgeti J., Winkler R. G. and Gompper G., Rep. Prog. Phys. **78**, 056601 (2015).
3. Bechinger C., Di Leonardo R., Löwen H., Reichhardt C., Volpe G. and Volpe G., Rev. Mod. Phys. **88**, 045006 (2016).

4. Nosenko V., Luoni F., Kaouk A., Rubin-Zuzic M. and Thomas H., *Phys. Rev. Res.* **2**, 033226 (2020).
5. Arkar K., Vasiliev M. M., Petrov O. F., Kononov E. A. and Trukhachev F. M., *Molecules* **26**, 561 (2021).
6. Petrov O. F., Boltnev R. E. and Vasiliev M. M., *Sci. Rep.* **12**, 6085 (2022).
7. Leoni M., Paoluzzi M., Eldeen S., Estrada A., Nguyen L., Alexandrescu M., Sherb K. and Ahmed W. W., *Physical Review Research* **2** (4), 043299 (2020).
8. Deblais A., Barois T., Guerin T., Delville P. H., Vaudaine R., Lintuvuori J. S., Boudet J. F., Baret J. C. and Kellay H., *Physical review letters* **120** (18), 188002 (2018).
9. Dauchot O. and Démary V., *Physical review letters* **122** (6), 068002 (2019).
10. Jiang H. R., Yoshinaga N. and Sano M., *Physical review letters* **105** (26), 268302 (2010).
11. ten Hagen B., van Teeffelen S. and Lowen H., *J. Phys.: Condens. Matter* **23**, 194119 (2011).
12. Szamel G., *Physical Review E* **90** (1), 012111 (2014).
13. Das S., Gompper G. and Winkler R. G., *New Journal of Physics* **20** (1), 015001 (2018).
14. Chaudhuri D. and Dhar A., *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2021(1), 013207.(2021).
15. Caraglio, M., & Franosch, T. *Physical Review Letters*, 129(15), 158001 (2022).
16. L. Caprini and U. M. B. Marconi, *The Journal of Chemical Physics*, 154(2), 024902.2021,
17. Nguyen G. P., Wittmann R. and Löwen H., *Journal of Physics: Condensed Matter.* **34** (3), 035101 (2021).
18. Lisin E. A., Vaulina O. S., Lisina I. I. and Petrov O. F., *Physical Chemistry Chemical Physics* **24** (23), 14150–14158 (2022).
19. Sprenger A. R., Caprini L., Löwen H. and Wittmann R., *Journal of Physics: Condensed Matter.* **35** (30), 305101 (2023).
20. Gutierrez-Martinez L. L. and Sandoval M., *The Journal of Chemical Physics* **153** (4), 044906 (2020).
21. Uhlenbeck G. E. and Ornstein L. S., *Physical review* **36** (5), 823 (1930).
22. Li T., Kheifets S., Medellin D. and Raizen M. G., *Science* **328** (5986), 1673–1675 (2010).
23. Takatori S. C., De Dier R., Vermant J. and Brady J. F., *Nature communications* **7** (1), 10694 (2016).
24. Rozenblit A., Buzakov M., Molodtsova A., Dmitriev A. and Olekhno N. 18th International Conference on Management of Large-Scale System Development, 2025. doi: 10.1109/MLSD65526.2025.11220665
25. Wang J., Wang G., Chen H., Liu Y., Wang P., Yuan D., Liu L. et al., *Nature communications* **15** (1), 8853 (2024).
26. Ning L., Zhu H., Yang J., Zhang Q., Liu P., Ni R. and Zheng N., *National Science Open* **3** (4), 20240005 (2024).
27. Kumari A., Pal P. S., Saha A. and Lahiri S., *Physical Review E* **101** (3), 032109 (2020).
28. Hecht L., Mandal S., Löwen H. and Liebchen B., *Physical Review Letters* **129** (17), 178001 (2022).

Об авторах

Лисин Евгений Александрович, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Лаборатория диагностики пылевой плазмы, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН) (125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2); старший научный сотрудник, Лаборатория физики активных сред и систем, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9). E-mail: eaLisin@yandex.ru AuthorID: 179843, Scopus Author ID 32867795100, ORCID 0000-0001-5498-0321, Web of Science Researcher M-1738-2016

Лисина Ирина Игоревна, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Лаборатория диагностики пылевой плазмы, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН) (125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2); старший научный сотрудник, Лаборатория физики активных сред и систем, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9). E-mail: irina.lisina@mail.ru SPIN-код: 5802-2312, AuthorID: 923626, Scopus Author ID 21743105800, Web of Science Researcher E-8876-2017.