

ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)

ФИЗИКА
PHYSICS

УДК 535.214
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2026-70-3-201-207>

Поступило в редакцию 11.02.2026
Received 11.02.2026

С. Ю. Михневич

*Белорусская государственная академия связи, Минск, Республика Беларусь
ул. Скорины, 8, 220017, Минск, Республика Беларусь*

**ГРАДИЕНТНАЯ СИЛА, ДЕЙСТВУЮЩАЯ СО СТОРОНЫ ГАУССОВА
СВЕТОВОГО ПУЧКА НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРОЗРАЧНУЮ МИКРОСФЕРУ:
ПРИБЛИЖЕНИЕ РЭЛЕЯ–ГАНСА**

(Представлено академиком С. В. Гапоненко)

Аннотация. В приближении Рэлея–Ганса получено выражение для градиентной силы, действующей в гауссовом пучке оптического излучения на прозрачную диэлектрическую микросферу. Приближение Рэлея–Ганса накладывает ограничение на фазовый сдвиг волны при прохождении микросферы. Вывод выражения проведен в предположении незатухающего пучка. Учтена неоднородность действующего излучения в пределах микросферы. Полученное выражение для градиентной силы в приближении Рэлея–Ганса при уменьшении отношения размера микросферы к диаметру гауссова пучка сводится к известным выражениям для градиентной силы в приближении Рэлея. Градиентная сила радиально симметрична и не зависит от направления поляризации световой волны в сечении пучка. Показано, что для частиц, удовлетворяющих приближению Рэлея–Ганса, градиентная сила, действующая в поперечном направлении пучка, меньше градиентной силы, рассчитанной в приближении Рэлея. С увеличением размера частиц это различие возрастает. Проведен расчет поправочного коэффициента для теории Рэлея–Ганса в зависимости от удвоенного квадрата отношения радиуса микросферы к радиусу светового пучка. Установлено, что уже при радиусе микросферы, составляющем 3,5 длины волны, градиентная сила в приближении Рэлея–Ганса в два раза меньше, чем в приближении Рэлея.

Ключевые слова: градиентная сила, приближения Рэлея–Ганса, оптический гауссов пучок

Для цитирования. Михневич, С. Ю. Градиентная сила, действующая со стороны гауссова светового пучка на диэлектрическую прозрачную микросферу: приближение Рэлея–Ганса / С. Ю. Михневич // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2026. – Т. 70, № 3. – С. 201–207. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2026-70-3-201-207>

Svetlana Yu. Mikhnevich

Belarusian State Academy of Telecommunications, Minsk, Republic of Belarus

**GRADIENT FORCE ACTING FROM A GAUSSIAN LIGHT BEAM ON A DIELECTRIC TRANSPARENT
MICROSPHERE: RAYLEIGH–GANS APPROXIMATION**

(Communicated by Academician Sergey V. Gaponenko)

Abstract. An expression for the gradient force acting in a Gaussian beam of optical radiation on a transparent dielectric microsphere is derived within the Rayleigh–Gans approximation, which imposes a constraint on the phase shift of the wave as it passes through the microsphere. The approximation of an undamped beam is assumed. The inhomogeneity of the incident radiation within the microsphere is taken into account. The resulting expression for the gradient force in the Rayleigh–Gans approximation reduces to the known expressions for the gradient force in the Rayleigh approximation. The expression for the gradient force is radially symmetric, regardless of the direction of light wave polarization in the beam cross section. It is shown that for particles satisfying the Rayleigh–Gans approximation, the gradient force acting in the transverse direction of the beam is smaller than the gradient force calculated in the Rayleigh approximation. This difference increases with increasing particle size.

A correction factor for the Rayleigh–Gans theory is computed as a function of twice the square of the ratio of the microsphere radius to the light beam radius. It is shown that even for a microsphere radius of 3.5 wavelengths, the gradient force in the Rayleigh–Gans approximation is half that in the Rayleigh approximation.

Keywords: gradient force, Rayleigh–Gans approximations, optical Gaussian beam

For citation. Mikhnevich S. Yu. Gradient force acting from a Gaussian light beam on a dielectric transparent microsphere: Rayleigh–Gans approximation. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2026, vol. 70, no. 3, pp. 201–207 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2026-70-3-201-207>

Введение. К настоящему времени, начиная с работ А. Эшкина и Г. Аскарьяна [1; 2], проведено большое количество исследований движения как одиночных частиц [3–6], так и большого количества частиц под действием светового излучения [6–8]. Результаты этих исследований используются для вращения, позиционирования и сортировки частиц в различных приложениях. Например, лазерные пинцеты применяются для манипуляции оптическими частицами и биологическими объектами, такими как клетки, вирусы, бактерии и ткани [7].

Для расчета сил светового давления во многих статьях используются численные методы. Аналитические выражения получены в приближении «оптически мягких» микросфер или приближении Рэлея–Ганса [9], которое подразумевает выполнение следующих соотношений для параметров микросфер. Показатели преломления микросферы n и среды n_0 близки ($m = n / n_0$ – относительный показатель преломления):

$$|m - 1| \ll 1. \quad (1a)$$

Фазовый сдвиг волны при прохождении микросферы мал:

$$2ka|m - 1| \ll 1, \quad (1b)$$

где a – радиус микросферы; $k = 2\pi n_0 / \lambda$ – волновое число; λ – длина волны.

Градиентная сила действует в поперечном направлении относительно направления светового пучка, сила рассеяния – преимущественно в продольном направлении, в приближении незатухающего пучка. Действие рассеивающей силы в поперечном направлении слабо и приводит к незначительному смещению положения равновесия частицы [10; 11].

Аналитические выражения для градиентных сил в приближении Рэлея–Ганса получены для интерференционных полей двух лазерных пучков [12], для бесселева пучка [13], однако для наиболее часто используемой формы светового пучка – гауссова, аналитических выражений в литературе не найдено. Вместе с тем для анализа действия градиентных сил более наглядна именно аналитическая зависимость. Получение аналитической зависимости градиентной силы, действующей на микросферу в гауссовом пучке, в приближении Рэлея–Ганса и является целью данной работы.

Основные соотношения. Световые силы, действующие на микросферу, могут быть получены из выражения для тензора напряжений Максвелла. С использованием аналогичного ограничения на сдвиг фазы при прохождении микросферы

$$2ka|m - 1| < \pi / 3 \quad (2)$$

в [10] получено обобщенное выражение для световой силы как суммы градиентной силы и силы светового рассеяния:

$$\vec{F} = \vec{F}_{\text{grad}} + \vec{F}_{\text{scat}} = \frac{\alpha_0 n_0}{2c} \int_V \vec{\nabla} I dV + \frac{n_0}{c} I C_{\text{scat}}, \quad (3)$$

где I – интенсивность световой волны, падающей на микросферу объемом V и сечением рассеяния C_{scat} ; α_0 – удельная поляризуемость

$$\alpha_0 = 3 \frac{(m^2 - 1)}{(m^2 + 2)},$$

соответствующая моде TEM_{00} ,

$$I(\rho) = I_0 \exp\left(-\frac{2\rho^2}{w^2}\right), \quad (4)$$

где I_0 – пиковая интенсивность в центре пучка; ρ – радиальное расстояние от центра пучка; w – радиус пучка, принимаем, что световой луч распространяется в z -направлении и не затухает.

Точность описания реального лазерного пучка в виде гауссова пучка (или моды нулевого порядка TEM_{00}) зависит от соотношения волнового вектора и радиуса пучка s (апертуры пучка):

$$s = \frac{1}{kw} = \frac{\lambda}{2\pi w}.$$

Точность аппроксимации реального лазерного пучка гауссовой кривой зависит от апертуры. Так для $s = 0,02$ точность составляет 0,817 %, что соответствует $w \cong 8\lambda$, для $s = 0,1$ точность составляет 4,4 %, что соответствует $w \cong 1,68\lambda$ [14]. В лабораторных исследованиях часто используют апертуру 1,2.

Выражение для градиентной силы из (3) с учетом теоремы Остроградского–Гаусса перепишем в виде интеграла по поверхности микросферы S_a и подставим выражение (4):

$$\vec{F}_{\text{grad}} = \frac{\alpha_0 n_0}{2c} \oint_{S_a} I(\rho) d\vec{S}. \quad (5)$$

Перейдем в сферическую систему координат и определим расстояние ρ (от центра пучка до точки интегрирования) через радиус микросферы a и расстояние от центра пучка до центра микросферы r :

$$\rho = \sqrt{r^2 + a^2 \sin^2 \Theta + 2ra \sin \Theta \cos \varphi}, \quad (6)$$

где φ – зенитный угол; Θ – азимутальный угол сферической системы координат. Якобиан перехода $a^2 \sin^2 \Theta$, а единичная площадка:

$$d\vec{S} = \vec{e}_a \sin \Theta \cos \varphi d\Theta d\varphi, \quad (7)$$

где $\vec{e}_a$ – единичный вектор, указывающий направление на микросферу из центра пучка. Интеграл (5) с учетом (6) и (7) можно записать в виде следующего выражения:

$$\vec{F}_{\text{grad}} = \frac{\alpha_0 n_0}{2c} \vec{e}_a \int_0^\pi I_0 a^2 \exp\left(-\frac{2r^2}{w^2} - \frac{2a^2}{w^2} \sin^2 \Theta\right) \sin^2 \Theta \int_0^{2\pi} \exp\left(-\frac{4ra}{w^2} \sin \Theta \cos \varphi\right) \cos \varphi d\varphi d\Theta. \quad (8)$$

Используя интегральное представление модифицированной функции Бесселя [15, с. 376], интегрирование от 0 до π , а затем от π до 2π с заменой переменной со сдвигом на π , а также свойство нечетности модифицированной функции Бесселя, можем записать

$$-2J_1\left(\frac{4ra}{w^2} \sin \Theta\right) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \exp\left(-\frac{4ra}{w^2} \sin \Theta \cos \varphi\right) \cos \varphi d\varphi.$$

При значении аргумента модифицированной функции Бесселя $4ra / w^2 \rightarrow 0$, что достигается при радиусе микросферы меньше радиуса пучка излучения, можно использовать представление модифицированной функции Бесселя первого порядка в виде ряда с гамма-функциями и ограничиться первым слагаемым [15, с. 375], т. е.

$$J_\nu(x \rightarrow 0) \cong \left(\frac{x}{2}\right)^\nu \frac{1}{\Gamma(\nu+1)}.$$

Поскольку по определению $\Gamma(2) = 1$, выражение (8) можем переписать в виде

$$\vec{F}_{\text{grad}} = -2\pi\alpha_0 n_0 a^2 I_0 \frac{ra}{cw^2} \vec{e}_a \exp\left(-\frac{2r^2}{w^2}\right) \int_0^\pi \exp\left(-\frac{2a^2}{w^2} \sin^2 \Theta\right) \sin^3 \Theta d\Theta. \quad (9)$$

Заменим переменную Θ на $y = \cos(\Theta)$ и для упрощения введем обозначение $\gamma = 2a^2 / w^2$, тогда интеграл в формуле (9) примет вид

$$e^{-\gamma} \left[\int_{-1}^1 e^{\gamma y^2} dy - \int_{-1}^1 e^{\gamma y^2} y^2 dy \right]. \quad (10)$$

Используя формулу интегрирования по частям с функциями $\exp(\gamma y^2)$ и $y / 2\gamma$ для второго интеграла, выражение (10) можно переписать в виде

$$e^{-\gamma} \left[\int_{-1}^1 e^{\gamma y^2} dy - e^{\gamma y^2} \frac{y}{2\gamma} \Big|_{-1}^1 + \int_{-1}^1 \frac{1}{2\gamma} e^{\gamma y^2} dy \right] = e^{-\gamma} \left[-\frac{e^{\gamma}}{\gamma} + \left(1 + \frac{1}{2\gamma}\right) \int_{-1}^1 e^{\gamma y^2} dy \right]. \quad (11)$$

Удобно выразить это соотношение через мнимую функцию ошибок, которая связана с функцией ошибок для мнимого аргумента и определяется как

$$\operatorname{erfi}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{t^2} dt.$$

Поскольку функция ошибок нечетна, т. е. $\operatorname{erfi}(-x) = -\operatorname{erfi}(x)$, то для $z = y\sqrt{\gamma}$ можно записать

$$\int_{-1}^1 e^{\gamma y^2} dy = \frac{1}{\sqrt{\gamma}} \int_{-\sqrt{\gamma}}^{\sqrt{\gamma}} e^{z^2} dz = \frac{2\sqrt{\pi}}{2\sqrt{\gamma}} \operatorname{erfi}(\sqrt{\gamma}).$$

Тогда выражение (11) преобразуется к виду

$$-\frac{1}{\gamma} + \left(1 + \frac{1}{2\gamma}\right) e^{-\gamma} \sqrt{\frac{\pi}{\gamma}} \operatorname{erfi}(\sqrt{\gamma}),$$

а выражение (9) для градиентной силы примет вид

$$\begin{aligned} \vec{F}_{\text{grad}} &= -\pi\alpha_0 n_0 I_0 \frac{ra}{c} \vec{e}_a \exp\left(-\frac{2r^2}{w^2}\right) \left(-1 + (\gamma + 0,5) e^{-\gamma} \sqrt{\frac{\pi}{\gamma}} \operatorname{erfi}(\sqrt{\gamma})\right) = \\ &= -\pi\alpha_0 n_0 I_0 \frac{ra}{c} \vec{e}_a \exp\left(-\frac{2r^2}{w^2}\right) P(\gamma). \end{aligned} \quad (12)$$

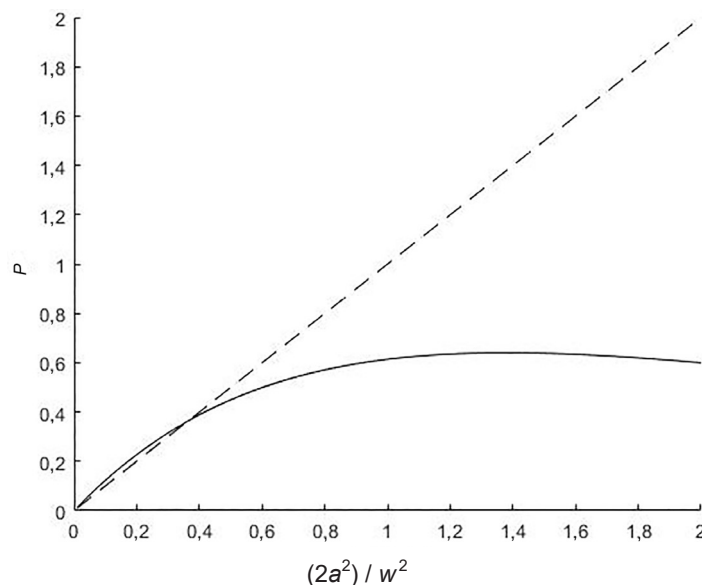
Независимо от направления поляризации в плоскости, перпендикулярной направлению распространения светового пучка, градиентная сила будет радиально симметричной и описываться выражением (12). Микросферы с показателем преломления больше, чем показатель преломления окружающей среды, будут втягиваться в максимум интенсивности поля, что соответствует известным результатам [1–14].

В пределе Рэлея, когда микросфера может быть представлена диполем, интегрирование по сфере в (5) не нужно. Вместе с тем формула (12) переходит в известное выражение для градиентной силы в приближении Рэлея при уменьшении размера микросферы, т. е. при $\gamma \rightarrow 0$. В этом пределе $\operatorname{erfi}(\sqrt{\gamma})$ представляется в виде первого члена ряда $2\sqrt{\gamma} / \sqrt{\pi}$ и выражение для градиентной силы принимает вид

$$\begin{aligned} \vec{F}_{\text{grad}} &= -\pi\alpha_0 n_0 I_0 \frac{ra}{c} \vec{e}_a \exp\left(-\frac{2r^2}{w^2}\right) (-1 + 2(\gamma + 0,5)) = \\ &= -2\pi\alpha_0 n_0 I_0 a^2 \frac{ra}{cw^2} \vec{e}_a \exp\left(-\frac{2r^2}{w^2}\right) = \vec{F}_0 a^2 \frac{ra}{w^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{w^2}\right), \end{aligned}$$

аналогичный полученному в [14]. Градиентная сила в приближении Рэлея–Ганса меньше по модулю, чем в приближении Рэлея, что нужно учитывать в случае выполнения условий (1) или (2).

Численный расчет поправочного коэффициента $P(\gamma)$ в зависимости от соотношения радиуса частицы к радиусу светового пучка приведен на рисунке.



Зависимость поправочного коэффициента P от соотношения радиусов микросферы и светового пучка $2a^2/w^2$ в приближении Рэлея (--) и в приближении Рэлея–Ганса (—)

Dependence of the correction factor P on the ratio of the radius of the microsphere and the light beam $2a^2/w^2$ in the Rayleigh approximation (--) and in the Rayleigh–Gans approximation (—)

Из рисунка видно, что приближение Рэлея дает завышенные значения градиентной силы. В работе [3] определен предел применения теории Рэлея, когда нужно начинать пользоваться теорией Ми, и показано, что он зависит от отношения радиуса микросферы к длине волны излучения. В [3] предельное значение определено как 0,1, а в [14] – 0,05. Используемое приближение Рэлея–Ганса (1) расширяет пределы применимости выражения (12). При близких значениях показателей преломления среды и микросферы радиус микросферы может быть соизмерим с длиной волны излучения.

Зависимость градиентной силы от отношения радиуса микросферы к длине волны излучения носит немонотонный характер: в области a/λ до 1 наблюдается максимум, далее при значениях отношения ближе к 2 пики начинают повторяться. На приведенной на рисунке зависимости поправочного коэффициента от отношения радиуса микросферы к радиусу пучка в области $2a^2/w^2 \approx 1$ также наблюдается характерный максимум. Однако в целом данная зависимость носит более простой характер и удобнее для практического использования.

В данной работе в отличие от других работ получена аналитическая зависимость градиентной силы от отношения радиуса микросферы к диаметру пучка, что удобно при практическом использовании и расчете прохождения излучения через микронеоднородные среды.

Заключение. В приближении Рэлея–Ганса получено аналитическое выражение для градиентной силы, действующей на прозрачную диэлектрическую микросферу в гауссовом пучке оптического излучения. Данное выражение в пределе малых частиц сводится к выражению для градиентной силы в приближении Рэлея. График зависимости поправочного коэффициента качественно совпадает с расчетами, выполненными по теории Ми. Поскольку приближение Рэлея–Ганса имеет более широкие пределы применимости, полученное выражение можно использовать в указанных пределах без необходимости проведения сложных расчетов в рамках теории Ми. Использование зависимости градиентной силы именно от отношения радиуса микросферы к радиусу оптического пучка, как в настоящей работе, более практично по сравнению с зависимостью от отношения радиуса микросферы к длине волны излучения. Полученные результаты могут быть применимы для расчета прохождения излучения сквозь среды, состоящие из взвеси частиц меньше или соизмеримых с длиной волны излучения.

Список использованных источников

1. Аскарьян, Г. А. Воздействие градиента поля интенсивного электромагнитного луча на электроны и атомы / Г. А. Аскарьян // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1962. – Т. 42, № 6. – С. 1567–1570.
2. Ashkin, A. Acceleration and trapping of particles by radiation pressure / A. Ashkin // Physical Review Letters. – 1970. – Vol. 24, N 4. – Art. 156. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.24.156>
3. Optical tweezers: theory and modelling / T. A. Nieminen, N. du Preez-Wilkinson, A. B. Stilgoe [et al.] // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. – 2014. – Vol. 146. – P. 59–80. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2014.04.003>
4. Sukhov, S. Non-conservative optical forces / S. Sukhov, A. Dogariu // Reports on Progress in Physics. – 2017. – Vol. 80, N 11. – Art. 112001. <https://doi.org/10.1088/1361-6633/aa834e>
5. Levitodynamics: Levitation and control of microscopic objects in vacuum / C. Gonzalez-Ballester, M. Aspelmeyer, L. Novotny [et al.] // Science. – 2021. – Vol. 374, N 6564. – P. 168–179. <https://doi.org/10.1126/science.abg3027>
6. Forbes, K. A. Optical binding of nanoparticles / K. A. Forbes, D. S. Bradshaw, D. L. Andrews // Nanophotonics. – 2020. – Vol. 9, N 1. – P. 1–17. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2019-0361>
7. Optical pulling forces and their applications / H. Li, Y. Cao, L.-M. Zhou [et al.] // Advances in Optics and Photonics. – 2020. – Vol. 12, N 2. – P. 288–366. <https://doi.org/10.1364/aop.378390>
8. Transparent microspheres pattern generation in liquid by counter-propagating beams of laser radiation / A. A. Afanas'ev, A. N. Rubinov, V. M. Volkov [et al.] // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. – 2008. – Vol. 11, N 4. – P. 465–470.
9. Ван де Хюлст, Х. К. Рассеяние света малыми частицами / Х. К. ван де Хюлст. – М., 1961. – 536 с.
10. Rohrbach, A. Optical trapping of dielectric particles in arbitrary fields / A. Rohrbach, E. H. K. Stelzer // Journal of the Optical Society of America A. – 2001. – Vol. 18, N 4. – P. 839–853. <https://doi.org/10.1364/josaa.18.000839>
11. О радиационных силах, действующих на прозрачную наночастицу в поле сфокусированного лазерного пучка / А. А. Афанасьев, Л. С. Гайда, Д. В. Гузатов [и др.] // Квантовая электроника. – 2015. – Т. 45, № 10. – С. 904–907.
12. Локализация частиц сферической формы под действием градиентной силы в интерференционном поле лазерного излучения / А. А. Афанасьев, А. Н. Рубинов, Ю. А. Курочкин [и др.] // Квантовая электроника. – 2003. – Т. 33, № 3. – С. 250–254.
13. Локализация сферических частиц под действием градиентных сил в поле бесселева пучка нулевого порядка. Приближение Рэлея–Ганса / А. Н. Рубинов, А. А. Афанасьев, И. Е. Ермолаев [и др.] // Журнал прикладной спектроскопии. – 2003. – Т. 70, № 4. – С. 502–507.
14. Harada, Y. Radiation forces on a dielectric sphere in the Rayleigh scattering regime / Y. Harada, T. Asakura // Optics Communications. – 1996. – Vol. 124, N 5–6. – P. 529–541. [https://doi.org/10.1016/0030-4018\(95\)00753-9](https://doi.org/10.1016/0030-4018(95)00753-9)
15. Abramowitz, M. Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables / M. Abramowitz, I. A. Stegun. – 10th ed., revised. – National Bureau of Standards, 1972. – 470 p.

References

1. Askaryan G. A. The effects of the gradient of an intense electromagnetic beam field on electrons and atoms. *Soviet Physics JETP*, 1962, no. 15, pp. 1088–1099.
2. Ashkin A. Acceleration and trapping of particles by radiation pressure. *Physical Review Letters*, 1970, vol. 24, no. 4, art. 156. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.24.156>
3. Nieminen T. A., du Preez-Wilkinson N., Stilgoe A. B., Loke V. L. Y., Bui A. A. M., Rubinsztajn-Dunlop H. Optical tweezers: theory and modelling. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2014, vol. 146, pp. 59–80. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2014.04.003>
4. Sukhov S., Dogariu A. Non-conservative optical forces. *Reports on Progress in Physics*, 2017, vol. 80, no. 11, art. 112001. <https://doi.org/10.1088/1361-6633/aa834e>
5. Gonzalez-Ballester C., Aspelmeyer M., Novotny L., Quidant R., Romero-Isart O. Levitodynamics: Levitation and control of microscopic objects in vacuum. *Science*, 2021, vol. 374, no. 6564, pp. 168–179. <https://doi.org/10.1126/science.abg3027>
6. Forbes K. A., Bradshaw D. S., Andrews D. L. Optical binding of nanoparticles. *Nanophotonics*, 2020, vol. 9, no. 1, pp. 1–17. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2019-0361>
7. Li H., Cao Y., Zhou L.-M., Xu X., Zhu T., Shi Y., Qiu C.-W., Ding W. Optical pulling forces and their applications. *Advances in Optics and Photonics*, 2020, vol. 12, no. 2, pp. 288–366. <https://doi.org/10.1364/aop.378390>
8. Afanas'ev A. A., Rubinov A. N., Volkov V. M., Izobov N. A., Mikhnevich S. Yu. Transparent microspheres pattern generation in liquid by counter-propagating beams of laser radiation. *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*, 2008, vol. 11, no. 4, pp. 465–470.
9. Van de Hulst H. C. *Light Scattering by Small Particles*. New York, 1957. 470 p.
10. Rohrbach A., Stelzer E. H. K. Optical trapping of dielectric particles in arbitrary fields. *Journal of the Optical Society of America A*, 2001, vol. 18, no. 4, pp. 839–853. <https://doi.org/10.1364/josaa.18.000839>
11. Afanas'ev A. A., Rubinov A. N., Gaida L. S., Guzatov D. V., Svistun A. Ch. On radiation forces acting on a transparent nanoparticle in the field of a focused laser beam. *Quantum Electronics*, 2015, vol. 45, no. 10, pp. 904–907. <https://doi.org/10.1070/qe2015v045n10abeh015798>
12. Afanas'ev A. A., Rubinov A. N., Kurochkin Yu. A., Mikhnevich S. Yu., Ermolaev I. E. Localization of spherical particles under the action of a gradient force in an interference field of laser radiation. *Quantum Electronics*, 2003, vol. 33, no. 3, pp. 250–254.

13. Rubinov A. N., Afanas'ev A. A., Ermolaev I. E., Kurochkin Yu. A., Mikhnevich S. Yu. Localization of spherical particles under the action of gradient forces in the field of a zero-order Bessel beam. Rayleigh–Gans approximation. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2003, vol. 70, no. 4, pp. 565–572. <https://doi.org/10.1023/a:1026102615647>
14. Harada Y., Asakura T. Radiation forces on a dielectric sphere in the Rayleigh scattering regime. *Optics Communications*, 1996, vol. 124, no. 5–6, pp. 529–541. [https://doi.org/10.1016/0030-4018\(95\)00753-9](https://doi.org/10.1016/0030-4018(95)00753-9)
15. Abramowitz M., Stegun I. A. *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*, 10th ed., revised. National Bureau of Standards, 1972. 470 p.

Информация об авторе

Михневич Светлана Юрьевна – канд. физ.-мат. наук, заведующий кафедрой. E-mail: s.mikhnevich@bsac.by.

Information about the author

Mikhnevich Svetlana Yu. – Ph. D. (Physics and Mathematics), Head of the Department. E-mail: s.mikhnevich@bsac.by.