

ДВИЖЕНИЕ ЗОЛОТОЙ НАНОЧАСТИЦЫ В ФИЗИОЛОГИЧЕСКОМ РАСТВОРЕ NaCl 0,9% ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Л. С. Гайда, Е. В. Матук

*Гродненский государственный университет им. Я. Купалы, ул. Ожешко, 22, 230023
Гродно, Беларусь, e-mail: Matuk_EV@grsu.by*

Работа посвящена теоретическому исследованию воздействия силы светового давления на управляемое движение золотой сферической наночастицы, находящейся в физиологическом растворе NaCl 0,9%. Рассмотрены основные выражения для расчета трех составляющих силы светового давления: градиентной составляющей, и составляющих обусловленных поглощением и рассеянием излучения, действующих на металлическую сферическую наночастицу в поле сфокусированного лазерного пучка. Полученные зависимости составляющих силы светового давления от положения наночастицы на оси лазерного пучка иллюстрированы графически. Результаты работы могут стать основой для дальнейших теоретических и экспериментальных исследований по влиянию силы светового давления лазерного излучения на металлические наночастицы в жидкостях.

Ключевые слова: металлическая наночастица; Гауссов пучок; световое давление; лазерное излучение; физиологический раствор.

MOVEMENT OF A GOLD NANOPARTICLE IN PHYSIOLOGICAL SOLUTION 0.9% NaCl SOLUTION UNDER ACTION OF LASER RADIATION

L. S. Gaida, E. V. Matuk

*Yanka Kupala State University of Grodno, Ozheshko str., 22, 230023 Grodno, Belarus,
Corresponding author: E. V. Matuk (Matuk_EV@grsu.by)*

This work is devoted to theoretical investigation of the influence of light pressure force on the controlled movement of a gold spherical nanoparticle in a 0.9% NaCl saline solution. Basic expressions for calculation of three components of light pressure force: gradient component, and components conditioned by absorption and scattering of radiation acting on metallic spherical nanoparticle in the field of focused laser beam are considered. The obtained dependences of the components of the light pressure force on the nanoparticle position on the laser beam axis are illustrated graphically. The results of the work may form the basis for further theoretical and experimental studies on the effect of the laser light pressure force on metallic nanoparticles in liquids.

Key words: metal nanoparticles; Gaussian beam; light pressure; laser radiation; physiological solution.

ВВЕДЕНИЕ

Управление движением нанообъектов лазерным излучением – один из перспективных способов манипулирования наночастиц в кровезамещающих жидкостях. Хорошо известно, что световое давление, вызванное сфокусированным лазерным лучом

[1], позволяют захватывать объекты и производить манипуляцию с ними в среде с силами, которые зависят от оптических свойств не только нанобъектов, но и самой среды [2–5]. В данной работе рассматривается движение золотой сферической наночастицы, находящейся в физиологическом растворе NaCl 0,9%, под действием силы светового давления. Представлены графические зависимости составляющих силы светового давления, действующих на металлическую наночастицу, в зависимости от положения центра масс наночастицы.

ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Результирующую силу светового давления, действующую на металлическую наночастицу, находящуюся в жидкости можно представить в виде [4]:

$$F = F^{\text{scat}} + F^{\text{abs}} + F^{\text{grad}} \quad (1)$$

где F^{scat} – составляющая силы, возникающая вследствие рассеяния излучения, наночастицей, F^{abs} – составляющая силы, возникающая вследствие поглощения излучения наночастицей, F^{grad} – градиентную составляющую силы светового давления.

Общий вид составляющих силы светового давления, можно представить в следующем виде [6]:

$$\begin{cases} F^{\text{scat}} = \sigma^{\text{scat}} \frac{n_m}{c} I(x, y, z), \\ F^{\text{abs}} = \frac{n_m I(x, y, z) \sigma^{\text{abs}}}{c}, \\ F^{\text{grad}, z} = 2\pi \frac{n_m}{c} \alpha \nabla_z I(x, y, z) \end{cases} \quad (2)$$

где $\sigma^{\text{scat}} = \frac{8}{3} \pi k_m^4 \alpha^2$ – сечение рассеяния наночастицы, $k_m = 2\pi n_m / \lambda$ – волновое число,

n_m – показатель преломления жидкости, $\alpha = \alpha' + i\alpha'' = 3V \frac{n_p^2 - n_m^2}{n_p^2 + 2n_m^2}$ – поляризуемость

металлической наночастицы, λ – длина волны в вакууме, V – объем наночастицы, n_p – показатель преломления материала наночастицы, c – скорость света в вакууме, $I(x, y, z)$ – интенсивность падающего излучения, $\sigma^{\text{abs}} = k_m \alpha''$ – поперечное сечение поглощения наночастицы, ∇_z – оператор градиента, состоящий только из компоненты z .

Входную амплитуду Гауссова пучка, распространяющегося вдоль оси z , в декартовой системе координат (x, y, z) представим в следующем виде:

$$E(x, y, 0) = E_0 \cdot \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\rho_0^2}\right), \quad (3)$$

где E_0 и ρ_0 – соответственно амплитуда и радиус пучка. Поскольку лазерный пучок в рассматриваемой задаче фокусируется тонкой линзой в кювету с наночастицей, выражение для интенсивности падающего электромагнитного поля имеет вид [7, 8]:

$$I(x,y,z) = \frac{I_0}{(1-z/f)^2 + (z/z_0)^2} \cdot \exp\left\{-\frac{x^2 + y^2}{\rho_0^2[(1-z/f)^2 + (z/z_0)^2]}\right\} \quad (4)$$

где f – фокусное расстояние линзы, I_0 – входная интенсивность излучения, $z_0 = k_m \rho_0^2$ – дифракционная длина пучка.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для оценки составляющих силы светового давления, действующих на сферическую наночастицу, находящуюся в жидкости, используем следующие условия и числовые значения экспериментальных параметров: лазерное излучение, характеризующееся длиной волны $\lambda = 532$ нм, мощностью 4 Вт и радиусом пучка $0,5 \cdot 10^{-3}$ м, фокусируется на наночастицу радиусом 50 нм линзой с фокусным расстоянием, равным $f = 0,1$ м. Исследуемым объектом является золотая наночастица, комплексный показатель преломления которой, соответствующий длине волны 532 нм, $n_p = \epsilon_p^{1/2} = 0,43 + i2,455$ плотность материала $\rho = 10500$ кг/м³ [9]. Будем рассматривать наночастицу, находящуюся в физиологическом растворе NaCl 0,9%, показатель преломления которого $n_m = 1,4$, а коэффициент динамической вязкости $\eta_m = 1,38 \cdot 10^{-6}$ кг/(см·с) [10].

На рисунках 1–3 представлены зависимости составляющих силы светового давления, действующих на металлическую сферическую наночастицу в зависимости от координаты z , совпадающей с направлением распространения луча, рассчитанные по формулам (2).

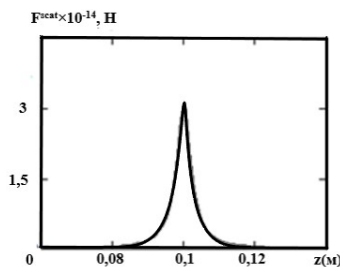


Рисунок 1. Зависимость составляющей силы, обусловленной рассеянием излучения F^{scat} от продольной координаты центра металлической наночастицы

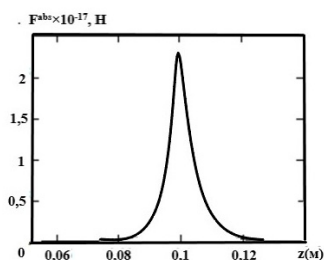


Рисунок 2. Зависимость составляющей силы, обусловленной поглощением излучения F^{abs} от продольной координаты центра металлической наночастицы

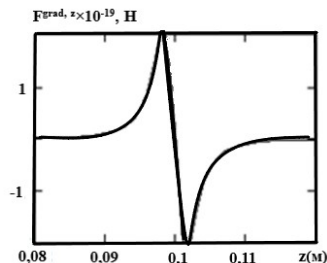


Рисунок 3. Зависимость градиентной составляющей силы $F^{\text{grad},z}$ от продольной координаты центра металлической наночастицы

На рисунке 1 видно, что максимальное значение составляющей силы, обусловленной рассеянием излучения, действующей на наночастицу достигается в области перетяжки лазерного пучка, где интенсивность света максимальна.

Влияние на наночастицу составляющей силы светового давления, связанной с поглощением, показано на рисунке 2. Анализируя рисунок 2 видим, что составляющая силы, обусловленная поглощением излучения, аналогично, как и составляющая силы, обусловленная рассеянием излучения, достигает своего максимального значения

в области перетяжки лазерного луча и имеет минимальное значение вдали от области перетяжки.

На рисунке 3 показана зависимость градиентной составляющей силы $F^{\text{grad},z}$ от координаты z центра наночастицы, смещающейся вдоль направления распространения луча.

Градиентная составляющая силы, действующая на золотую наночастицу до области перетяжки лазерного луча, действует в направлении составляющей силы, обусловленной рассеянием излучения, однако за областью перетяжки становится противоположно направленной [11]. В самой же области перетяжки данная составляющая силы светового давления равна нулю.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе теоретически исследовано движение золотой сферической наночастицы под действием сил светового давления в поле сфокусированного лазерного пучка с гауссовым распределением интенсивности в физиологическом растворе NaCl 0,9%. Получены численные зависимости для трех составляющих силы светового давления, действующих на золотую сферическую наночастицу, находящуюся на оси лазерного пучка от продольной координаты центра сферической наночастицы.

Результаты работы могут стать основой для дальнейших теоретических и экспериментальных исследований по влиянию сил светового давления лазерного излучения гауссовой формы на металлические наночастицы в жидкостях.

REFERENCES

1. Афанасьев, А. А. О радиационных силах, действующих на прозрачную наночастицу в поле сфокусированного лазерного пучка / А. А. Афанасьев [и др.] // Квантовая электроника. – 2015. – Т. 45, №10. – С. 605–607.
2. Doyle, W. T. Optical properties of a suspension of metal spheres / W. T. Doyle // Phys. Rev. – 1989. – В. 39. – Р. 9852–9858.
3. Rogovin, D. Phase conjugation in liquid suspensions of microspheres in the diffusive limit / D. Rogovin, O. Sari // Phys. Rev. – 1985. – № 31. – Р. 2375–2389.
4. Афанасьев, А. А. Движение серебряных наночастиц в жидкости с различной вязкостью под действием сил светового давления / А. А. Афанасьев [и др.] // Проблемы физики, математики и техники. – 2016. – № 4 (29). – С. 7–12.
5. Granqvist, C. G. Optical properties of ultrafine gold particles / C. G. Granqvist, O. Hunderi // Phys. Rev. – 1977. – В. 16. – Р. 3513–3534.
6. Матук, Е. В. Исследование действия радиационных сил на металлические наночастицы в лазерном луче гауссовской формы / Е. В. Матук, И. А. Остапчук // Физика конденсированного состояния: материалы XXIV междунар. науч.-практ. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 21 апр. 2016 г. / ГрГУ им. Я. Купалы; редкол.: В. Г. Барсуков (гл. ред.) [и др.]. – Гродно, 2016. – С. 166–169.
7. Ахманов, С.А. Физическая оптика / С.А. Ахманов, С.Ю. Никитин. – М.: Наука, 2004. – 654 с.
8. Афанасьев, А. А. Транспортировка сферической прозрачной наночастицы радиационными силами в поле гауссова пучка лазерного излучения / А.А. Афанасьев [и др.] // Оптика и спектроскопия. – 2016. – Т.120, № 1. – С.53–57.
9. Таблицы физических величин / под ред. И. К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1009 с.
10. Рабинович В.А. Краткий химический справочник / В.А.Рабинович, З.Я.Хавин. – Изд. «Химия», 1978. – 392 с.
11. Матук, Е. В. Теоретическое исследование действия сил светового давления на полистироловые наночастицы в жидких средах с различной вязкостью / Е. В. Матук, Е. В. Богдевич, Е. Ю. Жолнерчик // Физика конденсированного состояния: материалы XXV междунар. науч.-практ. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 20 апр. 2017 г. / ГрГУ им. Я. Купалы. – Гродно, 2017. – С. 78–81.