

УДК 535.36

ДВИЖЕНИЕ СЕРЕБРЯНЫХ НАНОЧАСТИЦ В ЖИДКОСТИ С РАЗЛИЧНОЙ ВЯЗКОСТЬЮ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛ СВЕТОВОГО ДАВЛЕНИЯ

А.А. Афанасьев¹, Л.С. Гайда², Е.В. Матук², А.Ч. Свистун²

¹Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси
²Гродненский государственный университет им. Я. Купалы

THE MOVEMENT OF SILVER NANOPARTICLES IN LIQUID WITH VARIOUS VISCOSITY UNDER THE INFLUENCE OF FORCES OF LIGHT PRESSURE

A.A. Afanas'ev¹, L.S. Gaida², E.V. Matuk², A.Ch. Svistun²

¹B.I. Stepanov Institute of Physics of NAS Belarus
²Y. Kupala Grodno State University

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований действия сил светового давления на движение серебряных наночастиц, находящихся в жидкостях с различным значением вязкости. Получено выражение основного уравнения динамики с учетом градиентной силы, сил поглощения и рассеяния, действующих на металлическую сферическую наночастицу в поле сфокусированного лазерного пучка гауссовой формы. Экспериментально определены скорости движения серебряных наночастиц и их перемещения в средах с различными коэффициентами вязкости.

Ключевые слова: металлическая наночастица, гауссов пучок, градиентная сила, силы рассеяния и поглощения, скорость наночастицы, вязкость жидкости.

The results of theoretical and experimental studies of influence of forces of light pressure upon the movement of the silver nanoparticles which are in liquid environments with various value of viscosity are given. The expression of the main equation of dynamics taking into account the gradient force, forces of absorption and dispersion operating on a metal spherical nanoparticle in the field of the focused laser beam of a Gaussian form are received. The speeds of the movement of silver nanoparticles and their movement in environments with various coefficients of viscosity are experimentally determined.

Keywords: metal nanoparticle, Gaussian beam, gradient force, forces of dispersion and absorption, speed of nanoparticles, liquid viscosity.

Введение

Одним из интересных эффектов взаимодействия лазерного излучения с суспензией наночастиц в жидкости является движение наночастиц в световом поле. Вопросы оптической манипуляции диэлектрических и металлических, микро- и наноразмерных частиц рассматривались в целом ряде теоретических и экспериментальных работ, из которых назовем лишь тематически близкие к рассматриваемой нами задаче [1]–[7].

В работе рассматривается движение серебряных наночастиц, находящихся в жидкостях с различной вязкостью, под действием сил светового давления. Известно, что при воздействии интенсивным лазерным излучением на наночастицы, находящиеся в жидкости, происходит разогрев наночастицы и жидкости вокруг нее. И, как следствие, при изменении температуры меняется вязкость среды, что может оказывать заметное влияние на транспортировку наночастиц. Такой тепловой фактор является весьма интересным в медико-биологических исследованиях. Например, разогретая наночастица может проделывать отверстие в мембране клетки и, тем самым, облегчить доставку лекарств внутрь нее [8], [9]. Как отмечают авторы [9], [10], сильный нагрев наночастиц лазерным излучением применяется в

процедурах фототермолиза раковых клеток. Облучение лазерными импульсами наночастиц приводит к быстрому локальному разогреву наночастиц за счет поглощения лазерного излучения, что в конечном итоге вызывает повреждение раковых клеток, оставляя здоровые неповрежденными. Механизм повреждения в настоящее время является предметом исследований.

Также необходимо отметить, что сила светового давления, действующая на металлическую наночастицу, может существенно возрастать, если частота излучения лазера совпадает с частотой плазмонного резонанса в наночастице [11], [12]. Это позволяет получить значительный отклик металлической наночастицы на излучение, что в свою очередь позволяет более эффективно управлять движением наночастиц в лазерном излучении. Эти и другие обстоятельства определяют интерес к исследованию влияния параметров наночастиц и среды на движение наночастиц в поле лазерного излучения.

Сильное резонансное поглощение наночастиц находит применение в процедурах фотоакустической визуализации. К поверхности наночастиц с помощью физической адсорбции или ковалентной пришивки прикреплены узнающие биомакромолекулы (например, одонитевые

олигонуклеотиды, антитела и т. п.). Такие наноструктуры называют конъюгатами. В результате, молекула-зонд конъюгата используется для уникального связывания с мишенью, а металлическое ядро – для визуализации взаимодействия в случае диагностики с помощью резонансного рассеяния света в темнопольной микроскопии [10].

Несмотря на большое число работ по оптической манипуляции частицами малых размеров, процесс динамики их движения, насколько нам известно, не нашел должного рассмотрения. Поэтому в данной работе нами предпринята попытка устранить данный пробел.

1 Основные соотношения

На металлическую наночастицу сферической формы, находящуюся в пространственно-неоднородном пучке со стороны лазерного излучения, действует сила светового давления, которая способна перемещать наночастицу в разных средах, осуществлять пространственное разделение наночастиц в зависимости от их размеров и оптических свойств.

Сила, с которой электромагнитное поле действует на металлическую наночастицу, условно можно разделить на две составляющие [13]: компоненту силы, действующую вдоль градиента интенсивности поля и отличную от нуля только в неоднородном электрическом поле, т.е. градиентную силу \mathbf{F}^{grad} , и силу, действующую вдоль направления распространения излучения, являющуюся суммой сил поглощения \mathbf{F}^{abs} и рассеяния \mathbf{F}^{scat} . Таким образом, полную силу светового давления можно представить в виде:

$$\mathbf{F}^{light} = \mathbf{F}^{grad} + \mathbf{F}^{abs} + \mathbf{F}^{scat}. \quad (1.1)$$

В случае поглощающей наночастицы [14], [15]:

$$\begin{aligned} \mathbf{F}^{grad} &= \frac{|\alpha|}{2} \nabla I, \\ \mathbf{F}^{abs} &= \frac{n_m \sigma_{abs} I}{c}, \\ \mathbf{F}^{scat} &= \frac{n_m \sigma_{scat} I}{c}, \end{aligned} \quad (1.2)$$

где

$$\alpha = \alpha' + i\alpha'' = 3V \frac{n_p^2 - n_m^2}{n_p^2 + 2n_m^2}$$

– поляризуемость металлической наночастицы,

$$\sigma_{abs} = k_m \alpha'' \quad (1.3)$$

– поперечное сечение поглощения наночастицы,

$$\sigma_{scat} = \frac{k_m^4 |\alpha|^2}{4\pi}$$

– сечение рассеяния наночастицы,

где I – интенсивность излучения действующего на наночастицу, ∇ – оператор градиента, $k_m = 2\pi n_m / \lambda$ – волновое число, n_m – показатель преломления жидкости, λ – длина волны в вакууме, c – скорость света в вакууме, V – объем

наночастицы, n_p – показатель преломления материала наночастицы.

Входную амплитуду гауссова пучка, распространяющегося вдоль оси z , в декартовой системе координат (x, y, z) представим в следующем виде [6]:

$$E(x, y, 0) = E_0 \cdot \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\rho_0^2}\right), \quad (1.4)$$

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 [16], [17]:

$$\begin{aligned} I(x, y, z) &= \frac{I_0}{\left(1 - \frac{z}{f}\right)^2 + \left(\frac{z}{z_0}\right)^2} \times \\ &\times \exp\left\{-\frac{x^2 + y^2}{\rho_0^2 \left[(1 - z/f)^2 + (z/z_0)^2\right]}\right\}, \end{aligned} \quad (1.5)$$

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

Следует отметить, что в случае нахождения наночастицы на оси пучка ($x = y = 0$) на нее будут действовать сила рассеяния \mathbf{F}^{scat} и поглощения \mathbf{F}^{abs} , а так же и продольная компонента градиентной силы $\mathbf{F}^{grad,z}$, которая имеет вид:

$$\mathbf{F}^{grad,z} = \frac{|\alpha| I_0}{f} \frac{1 - z/z_w}{\left[(1 - z/f)^2 + (z/z_0)^2\right]^2}, \quad (1.6)$$

где $z_w = \frac{f}{1 + (f/z_0)^2}$ – точка перетяжки лазерного луча.

Основное уравнение динамики для наночастицы, находящейся на оси лазерного пучка, можно представить в виде:

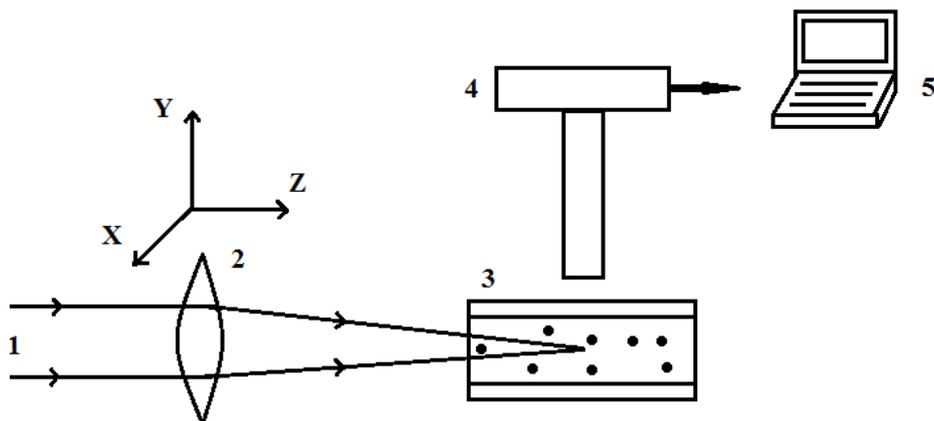
$$m \cdot \frac{d^2 z}{dt^2} + k \cdot \frac{dz}{dt} = \mathbf{F}^{grad,z} + \mathbf{F}^{scat} + \mathbf{F}^{abs}, \quad (1.7)$$

где m – масса наночастицы, $k = 6\pi\eta R$ – коэффициент трения в жидкости с динамической вязкостью η , R – радиус наночастицы.

Для дальнейшего экспериментального исследования движения металлической наночастицы под действием силы светового давления будем рассматривать множество серебряных наночастиц.

2 Определение скорости движения серебряных наночастиц, находящихся в жидкости в поле сфокусированного лазерного луча

Для экспериментальной оценки скорости движения серебряных наночастиц под действием сил светового давления лазерного излучения



1 – излучение лазера ЛТИ-701, 2 – фокусирующая линза,
3 – кювета с серебряными наночастицами, взвешенными в жидкости,
4 – цифровая видеокамера Logitech c920 совмещенная с микроскопом, 5 – компьютер

Рисунок 2.1 – Схема экспериментальной установки по исследованию действия сил светового давления лазерного излучения гауссовой формы на серебряные наночастицы в жидкости

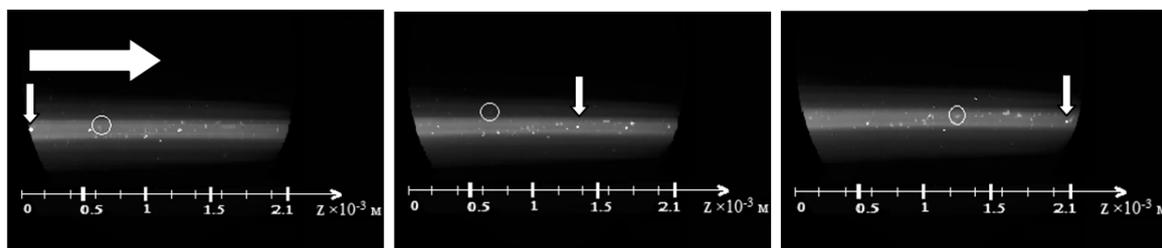


Рисунок 2.2 – Положения серебряных наночастиц в жидкости в поле лазерного излучения в разные промежутки времени: $t = 0$ с (1), 2,5 с (2), 4 с (3) (частица указана стрелкой). Кружками обозначены наночастицы не попавшие в фокус объектива микроскопа

создана лазерная установка, оптическая схема которой изображена на рисунке 2.1. В качестве источника оптического излучения использовался лазер ЛТИ-701 с длиной волны генерации 532 нм, максимальной мощностью до 4 Вт, радиусом пучка $r_0 = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м и интенсивностью $I_0 = 5,1 \cdot 10^6$ Вт/м². Лазерный пучок гауссовой формы фокусировался на кювету собирающей линзой с фокусным расстоянием $f = 0,1$ м. Визуализация за движением наночастиц осуществлялась при помощи компьютера с цифровой видеокамерой Logitech c920, которая была совмещена с микроскопом.

Особое внимание было уделено реализации возможности определения линейных размеров области кюветы, в пределах которой происходило перемещение наночастиц. Твердотельный YAG: Nd лазер с радиусом пучка $0,5 \cdot 10^{-3}$ м использовался в качестве «масштабной линейки», позволяющей измерить размеры той части кюветы, на которую был сфокусированный объектив микроскопа. Для этого лазерный луч направлялся на кювету с наночастицами, расположенными в воде. Зная радиус наблюдаемого в микроскопе лазерного пучка, есть возможность разбить всю область визуализированной части кюветы на равные участки длиной $0,5 \cdot 10^{-3}$ м. В результате

максимальное перемещение наночастиц, которое можно наблюдать в микроскопе, составляет $\approx 2,1 \cdot 10^{-3}$ м (рисунок 2.2).

На рисунке 2.2 показаны результаты действия сил светового давления лазерного излучения на серебряные наночастицы в точках $z < f$. В результате рассеяния лазерного излучения от наночастиц имеется возможность определения положения наночастиц в разный момент времени.

Следует отметить, что в эксперименте преимущественное движение серебряных наночастиц наблюдалось вдоль направления распространения лазерного излучения по сравнению со смещением поперек к направлению пучка. Вследствие того, что размер наночастиц существенно меньше радиуса поперечного сечения лазерного пучка, интенсивность действующего на наночастицу излучения не значительно меняется на расстояниях порядка нескольких размеров наночастицы, что приводит к относительно небольшой по абсолютной величине градиентной силе.

Относительная нечеткость изображений связана с рассеянием света не только на металлических наночастицах, но и на поверхности стекла кюветы [18]. Кроме того, некоторые наночастицы, которые визуализировались в виде

темных пятен на показанных снимках (отмечены кружками), не попали в фокус объектива микроскопа. Светлые точки соответствуют наночастицам находящимся в фокусе объектива.

На рисунках 2.3 и 2.4 представлена теоретическая зависимость скорости движения наночастиц в лазерном пучке от времени, полученная с помощью численного моделирования уравнения (1.7), и экспериментальные результаты изменения скорости движения наночастиц для жидкостей с различной вязкостью. В качестве материальных параметров были взяты следующие: радиус серебряных наночастицы $R = 50$ нм с комплексным показателем преломления

$$n_p = 0,06 + i3,586$$

[19], плотность материала наночастиц $\rho = 10500$ кг/м³ [20]. Длина волны лазерного излучения 532 нм, мощность лазера 4Вт, радиус лазерного пучка $\rho_0 = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м, фокусное расстояние линзы $f = 0,1$ м. Будем рассматривать случаи нахождения наночастиц в трех жидкостях с различными значениями коэффициентов вязкости и показателями преломления: 1 – вода ($n_m = 1,33$, $\eta = 100,4 \cdot 10^{-6}$ кг/(см·с)), 2 – смесь воды и глицерина в соотношении 50:50 ($n_m = 1,34$), 3 – смесь воды и спирта в соотношении 50:50 ($n_m = 1,4$).

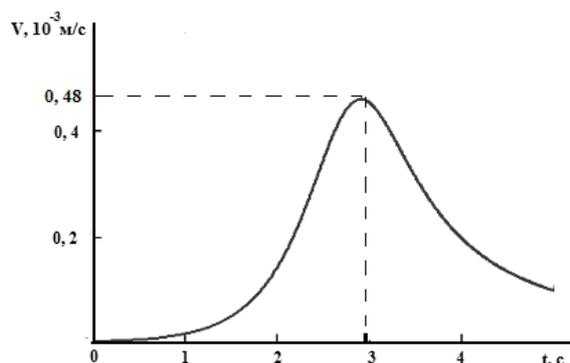


Рисунок 2.3 – Теоретическая зависимость скорости движения серебряных наночастиц в лазерном поле от времени (для случая нахождения наночастиц в воде) на основании численного моделирования уравнения (1.7).

Максимальная скорость в момент $t = 3$ с равна $v = 0,48 \cdot 10^{-3}$ м/с

Максимальная скорость (рисунок 2.3) оказалась равной $v = 0,48 \cdot 10^{-3}$ м/с для момента времени, когда наночастицы находятся в точке перетяжки лазерного луча. Так как в данной точке интенсивность лазерного излучения достигает наибольшего значения, это приводит, согласно выражениям (1.2), (1.5), к увеличению сил рассеяния и поглощения. В области за точкой перетяжки лазерного луча силы, действующие на наночастицы со стороны лазерного излучения, уменьшаются, что приводит к уменьшению их скорости.

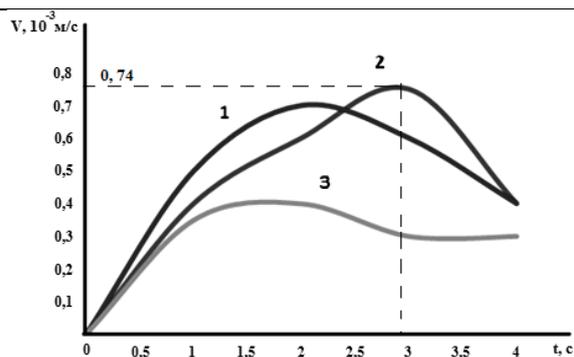


Рисунок 2.4 – Экспериментальная зависимость скорости движения серебряных наночастиц в лазерном поле от времени в жидкостях с различной вязкостью $n_m = 1,34$ (1), $1,33$ (2), $1,4$ (3)

Кривые, представленные на рисунке 2.4, были получены на основе анализа экспериментальных результатов. Значения скорости рассчитывались путем измерения средних расстояний, пройденных наночастицами для каждого последовательного промежутка времени. Время между отдельными измерениями составляло 0,5 с.

Кривая 1, изображенная на рисунке 2.4, соответствует изменению скорости движения наночастиц, находящейся в растворе спирта с водой ($n_m = 1,34$). Максимальная скорость соответствует значению $0,74 \cdot 10^{-3}$ м/с. Однако, вследствие того, что плотность смеси спирта с водой значительно меньше плотности серебра, наблюдалось оседание наночастиц на дно кюветы. Для предотвращения данного факта перед проведением данного эксперимента необходимо было ультразвуковое воздействие на кювету с суспензией наночастиц в жидкости, для того чтобы больше наночастиц попали на ось лазерного луча. Далее наночастицы помещались в смесь воды с глицерином ($n_m = 1,4$). Результаты представлены на кривой 3. Максимальная скорость движения наночастиц составила $0,41 \cdot 10^{-3}$ м/с. Для сравнения проведены эксперименты по движению наночастиц в дистиллированной воде. Максимальное значение скорости наночастиц (кривая 2 ($n_m = 1,33$)) равно $0,78 \cdot 10^{-3}$ м/с. Полученные результаты подтверждает соответствующее влияние изменения коэффициента вязкости среды на скорость движения наночастиц в поле лазерного луча.

Как видно из рисунков 2.3 и 2.4, форма кривых и максимальные значения скорости наночастиц, находящих в воде, полученные из теоретических и экспериментальных расчетов, отличается на $\approx 0,26 \cdot 10^{-3}$ м/с. Это объясняется тем, что в эксперименте на движение наночастиц оказывает влияние не только сила светового давления, но и тепловые процессы, возникающие в результате нагрева мощным лазерным излучением металлических наночастиц и жидкости, и,

как следствие, изменяется значение коэффициента вязкости жидкости.

Теоретическая и экспериментальная зависимости перемещения наночастиц от времени представлены на рисунках 2.5 и 2.6.

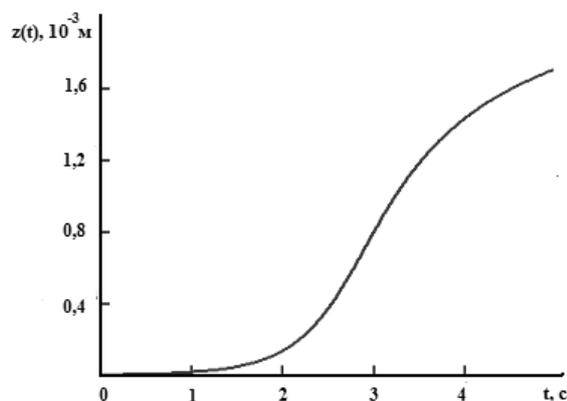


Рисунок 2.5 – Теоретическая зависимость перемещения серебряных наночастиц в воде ($n_m = 1,33$) в поле лазерного излучения от времени на основе численного моделирования формулы (1.7)

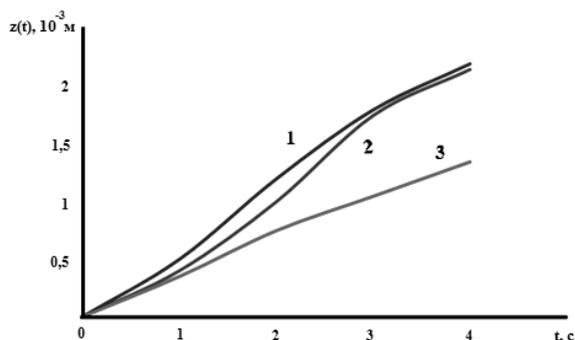


Рисунок 2.6 – Экспериментальная зависимость перемещения серебряных наночастиц в поле лазерного излучения от времени в жидкостях с различной вязкостью $n_m = 1,34$ (1), $1,33$ (2), $1,4$ (3)

Анализируя теоретические и экспериментальные зависимости скорости и перемещения от времени для металлических наночастиц в жидкости под действием сил светового давления можно сделать следующие заключения:

– центральные участки теоретической и экспериментальных зависимостей скорости движения наночастиц от времени имеют совпадения соответствующие интервалу времени $2 \text{ с} < t < 4 \text{ с}$ (рисунки 2.3, 2.4);

– боковые участки теоретической и экспериментальных зависимостей скорости движения наночастиц от времени при $t \leq 2 \text{ с}$ и $t \geq 4 \text{ с}$ имеют отличие (рисунки 2.3, 2.4), которое связано с тем, что в теоретической модели не учитываются процессы образования парового облака (наблюдаемого в эксперименте) в окрестности наночастиц и процессы вскипание жидкости, которые

возникают в результате воздействия лазерным излучением на наночастицу и среду[4];

– перемещение наночастиц в начальный момент времени значительно больше, чем перемещение полученное при численном моделировании уравнения (1.7), как хорошо видно из рисунков 2.5 и 2.6.

В эксперименте визуально наблюдалось также, что относительно «малые» наночастицы перемешаются с большей скоростью, чем более «крупные», что объясняется прямо пропорциональной зависимостью поляризуемости от радиуса наночастиц $\alpha \sim R^3$.

Заключение

В работе теоретически и экспериментально исследовано движение серебряных наночастиц под действием сил светового давления в поле сфокусированного лазерного пучка с гауссовым распределением интенсивности в средах с различной вязкостью.

Теоретически и экспериментально построены зависимости скорости движения и перемещения наночастиц от времени для сред с различной вязкостью. Показано, что для наночастиц радиусом $R = 50 \text{ нм}$ скорость их движения под действием сил светового давления значительно выше при малой вязкости среды.

Показано, что воздействие сил светового давления приводит к преимущественному смещению металлических наночастиц вдоль направления распространения лазерного излучения по сравнению со смещением поперек к направлению пучка.

Получено хорошее согласование экспериментальных и теоретических результатов для серебряных наночастиц размером $\sim 50 \text{ нм}$ на длине волны 532 нм при интенсивности лазерного излучения $I_0 = 5,1 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$.

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 с различными параметрами.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ashkin, A.* Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles / A. Ashkin, J.M. Dziedzic, J.E. Bjorkholm, S. Chu // Opt. Lett. – 1986. – Vol. 11. – P. 288–290.
2. *Ashkin, A.* Optical trapping and manipulation of single cells using infrared laser beams / A. Ashkin, J.M. Dziedzic, T. Yamane // Nature. – 1987. – Vol. 330. – P. 769–771.
3. *Гузатов, Д.В.* Теоретическое исследование силы светового давления, действующей на сферические наночастицы в поле лазерного излучения / Д.В. Гузатов, Л.С. Гайда // Вестник БГУ: Серия 1. – 2010. – № 3. – С. 29–33.

4. *Транспортировка металлических наночастиц в вязкой среде с помощью лазерного излучения* / А.А. Афанасьев, Л.С. Гайда, Д.В. Гузатов, И.И. Кургузенкова, Е.В. Матук // *Материалы IX Международной конференции «Лазерная физика и оптические технологии»*, Гродно, 30 мая – 2 июня 2012 г. / Институт физики НАН Беларуси им. Б.И. Степанова. – Минск, 2012. – С. 264–268.
5. *Рубинов, А.Н.* Сортировка микрочастиц градиентным полем / А.Н. Рубинов, В.М. Катаркевич, Т.Ш. Эфендиев // *Журнал прикладной спектроскопии*. – 2003. – № 5 (70). – С. 663–666.
6. *О радиационных силах, действующих на прозрачную наночастицу в поле сфокусированного лазерного пучка* / А.А. Афанасьев, Л.С. Гайда, Д.В. Гузатов, А.Н. Рубинов, А.Ч. Свистун // *Квантовая электроника*. – 2015. – Т. 45. – № 10. – С. 604–607.
7. *Концентрационная нелинейность суспензии прозрачных микросфер под действие градиентной силы в поле периодически модулированного лазерного излучения* / А.А. Афанасьев, Л.С. Гайда, Ю.А. Курочкин, Д.В. Новицкий, А.Ч. Свистун // *Квантовая электроника*. – 2016. – Т. 46. – № 10. – С. 891–894.
8. *Кургузенкова, И.И.* Световое давление на сферическую наночастицу с концентрической оболочкой в поле плоской электромагнитной волны / И.И. Кургузенкова, Д.В. Гузатов, Л.С. Гайда // *Проблемы физики, математики и техники*. – 2013. – № 2 (15). – С. 11–17.
9. *Vapor bubble generation around gold nanoparticles and its application to damaging of cells* / M. Kitz [et al.] // *Biomed. Opt. Express*. – 2011. – Vol. 2, № 2. – P. 291–304.
10. *Хлебцов, А.Н.* Оптика и биофотоника наночастиц с плазмонным резонансом / А.Н. Хлебцов. – *Квантовая электроника*, 2008. – 504с.
11. *A hybridization model for the Plasmon response of complex nanostructures* / E. Prodan [et al.] // *Science*. – 2003. – Vol. 302. – P. 419–422.
12. *Климов, В.В.* Наноплазмоника / В.В. Климов. – М.: Физматлит, 2009. – 480 с.
13. *Chaumet, P.C.* Time-averaged total force on a dipolar sphere in an electromagnetic field / P.C. Chaumet, M. Nieto-Vesperinas // *Opt. Lett.* – 2000. – Vol. 25, № 15. – P. 1065–1067.
14. *Efficient Optical Trapping and Visualization of Silver Nanoparticles* / L. Bosanac, T. Aabo, P.M. Bendix, L.B. Oddershede // *Nano Letters*. – 2008. – Vol. 8, № 5. – P. 1486–1491.
15. *Матук, Е.В.* Движение металлической наночастицы вблизи поверхности пузырька воздуха в жидкости под действием силы светового давления / Е.В. Матук, Л.С. Гайда, Д.В. Гузатов // *Проблемы физики, математики и техники*. – 2015. – № 3 (24). – С. 17–20.
16. *Ахманов, С.А.* Физическая оптика / С.А. Ахманов, С.Ю. Никитин. – М.: Наука, 2004. – 654 с.
17. *Транспортировка сферической прозрачной наночастицы радиационными силами в поле гауссова пучка лазерного излучения* / А.А. Афанасьев, Л.С. Гайда, Д.В. Гузатов, Д.В. Новицкий, Е.В. Матук // *Оптика и спектроскопия*. – 2016. – Т. 120. – № 1. – С. 53–57.
18. *Johnson, P.B.* Optical constants of the noble metals / P.B. Johnson, R.W. Christy // *Phys. Rev. B*. – 1973. – Vol. 6, №12. – P. 4370–4379.
19. *Таблицы физических величин*; под ред. И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976 – 1006 с.

Поступила в редакцию 24.07.16.