

**Оптическое осаждение наночастиц в плотных наносuspensionях**

И.Н. Егоршин<sup>1</sup>, В.И. Иванов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет»  
680035, Россия, Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения»  
680021, Россия, Хабаровск, ул. Серышева, 47  
valivi@mail.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.052

**Аннотация:** Исследование профилей концентрации, вызванных осаждением, является эффективным способом получения уравнения состояния коллоидной суспензии, изучения тонких деталей фазовой диаграммы и получения сведений о природе метастабильных фаз. Оптические методы осаждения обладают рядом преимуществ перед гравитационным методом или центрифугированием. В частности, эффективный метод осаждения в прозрачных наносuspensionях обеспечивает использование светового давления. В случае наночастиц сила давления света может на порядки превосходить гравитационные даже при использовании источников непрерывного излучения. Расчет концентрационного профиля для достаточно высоких интенсивностей излучения, когда объемная доля наночастиц на дне кюветы может достигать единицы, требует учета взаимодействия (отталкивания) наночастиц. В работе рассмотрена простейшая модель для учета конечного объема нанопазы – модель жестких сфер. В результате аналитического решения задачи о светоиндуцированном массопереносе получено выражение, позволяющее рассчитать стационарный профиль концентрации. Предложенная модель демонстрирует необходимость учета конечного объема наночастиц при расчете параметров оптического осаждения в плотных наносuspensionях при высоких (надтепловых) интенсивностях излучения. Полученные результаты представляют интерес для разработки новых методов получения наноматериалов, фотонных кристаллов и химических сенсоров, а также для совершенствования методов оптической диагностики наноматериалов.

**Ключевые слова:** *осаждение наночастиц, давление света, наносuspensionи, седиментационный профиль, модель жестких сфер, фотонные кристаллы, оптическая диагностика.*

*Егоршин Иван Николаевич – старший преподаватель высшей школы физико-математических наук ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет»*

*Иванов Валерий Иванович – д.ф.-м.н., профессор кафедры физики и теоретической механики ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщений»*

*Short Communication*

**Optical deposition of nanoparticles in dense nanosuspensions**

I.N. Egorshin<sup>1</sup>, V.I. Ivanov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Pacific State University, Khabarovsk, Russia

<sup>2</sup>Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.052

**Abstract:** Studying concentration profiles induced by sedimentation is an effective way to obtain an equation of state of a colloidal suspension, to study fine details of the phase diagram and obtain information about the nature of metastable phases. Optical sedimentation methods have a number of advantages over the gravity method or centrifugation. In particular, an effective method of sedimentation in transparent nanosuspensions provides the use of the light pressure. In the case of nanoparticles, the light pressure force can exceed gravitational ones by orders of magnitude even when using continuous radiation sources. Calculation of the concentration profile for sufficiently high radiation intensities, when the volume fraction of nanoparticles at the bottom of the cuvette can reach unity, requires taking into account the interaction (repulsion) of nanoparticles. In this paper, the simplest model for taking into account the finite volume of the nanophase, the hard sphere model, is considered. As a result of the analytical solution of the problem of light-induced mass transfer, an expression is obtained that allows calculating the steady-state concentration profile. The proposed

© И.Н. Егоршин, В.И. Иванов, 2025

model demonstrates the need to take into account the finite volume of nanoparticles when calculating the parameters of optical deposition in dense nanosuspensions at high (superthermal) radiation intensities. The results obtained are of interest for the development of new methods for obtaining nanomaterials, photonic crystals and chemical sensors, as well as for improving the methods of optical diagnostics of nanomaterials.

*Keywords: nanoparticle sedimentation, light pressure, nanosuspensions, sedimentation profile, hard sphere model, photonic crystals, optical diagnostics.*

*Ivan N. Egorshin – Senior Lecturer, Higher School of Physical and Mathematical Sciences, Pacific State University*

*Valery I. Ivanov – Dr. Sc., Professor, Department of Physics and Theoretical Mechanics, Far Eastern State Transport University*

Поступила в редакцию/received: 15.07.2025; после рецензирования/reviced: 20.09.2025; принята/accepted 24.09.2025.

Процессы осаждения представляют собой широко распространённое явление в природе, имеющее важное значение как для технологии, так и для науки. В промышленности и лабораторных условиях используются осветлители и гравитационные отстойники для отделения частиц от потоков. Помимо практического интереса исследования осадконакопления на модельных системах также предоставляют фундаментальную информацию о структурных свойствах коллоидных суспензий. Исследования седиментации позволяют получить уравнение состояния и фазовую диаграмму коллоидных систем, а также могут предоставить важную информацию о наличии и структурных свойствах метастабильных гелевых фаз [1, 2].

Широко известны химические методы формирования наноструктур (например, фотонных кристаллов) из жидкой фазы [3]. Однако недавние исследования демонстрируют ряд новых возможностей. Например, в работе [4] показано, как светоиндуцированная термодиффузия латексных микрочастиц в растворе приводит к образованию двумерного кристалла на охлаждающей поверхности в конвективном потоке жидкости. При этом концентрация микрочастиц увеличивалась в зоне светового пучка на несколько порядков.

Лазерное осаждение было продемонстрировано и в экспериментальных работах [5-7], где изучалось влияние размера светового пучка, плотности мощности лазера и времени воздействия на потоки жидкости, время испарения и результирующее распределение взвешенных наночастиц в испаряющихся каплях. Из-за локального нагрева индуцированные лазером потоки заставляют частицы перемещаться и накапливаться в любой выбранной области (внутри капли) с определённым размером. Образующиеся пятна могут быть на порядок меньше исходного размера капли. Этот эффект может найти применение в биотехнологии и фотонных устройствах, где важна высокая плотность частиц и минимальное пространство для осаждения. В [8-10] показано, что силы

светового давления могут значительно превышать гравитационные, что можно эффективно использовать для осаждения наночастиц в наносуспензии [11-13].

Целью данной работы является описание оптического осаждения наночастиц в концентрированной (плотной) наносуспензии с учетом конечного объема дисперсной фазы. Рассмотрим прозрачную наносуспензию, которая подвергается воздействию лазерного излучения с равномерным распределением интенсивности. Со стороны лазерного луча  $I_0$  вдоль оси  $z$  на наночастицу действует сила светового давления [12]:

$$F_p = AI_0, \quad A = \frac{128\pi^5 a^6 n_1}{3c_0 \lambda^4} \frac{m^2 - 1}{m^2 + 1}. \quad (1)$$

Здесь  $n_1$  и  $n_2$  – показатели преломления веществ дисперсионной среды и дисперсной фазы соответственно ( $m = n_1/n_2$ ),  $a$  – радиус частицы,  $\lambda$  – длина волны излучения,  $c_0$  – скорость света. Скорость дрейфа наночастицы  $V = \mu F_p$ , где  $\mu = (6\pi\eta a)^{-1}$  – коэффициент подвижности частиц,  $\eta$  – вязкость жидкости. Балансное уравнение, которое характеризует динамику концентрации наночастиц в жидкофазной среде с учётом диффузии:

$$\frac{\partial C(r,t)}{\partial t} = D\nabla^2 C - V\nabla C. \quad (2)$$

Здесь приняты следующие обозначения:  $C(r,t)$  – объемная доля дисперсных частиц,  $D$  – коэффициент диффузии. Решение одномерной задачи (2) с соответствующими граничными условиями на верхней и нижней границах в стационарном режиме выглядит как:

$$C_1 = C_0 \alpha \frac{\exp(\alpha Z)}{\exp(\alpha) - 1}, \quad (3)$$

где  $C_0$  – начальная доля наночастиц,  $Z = z/L$  – приведенная координата,  $L$  – длина кюветы. В (3) введен безразмерный параметр интенсивности излучения  $\alpha = I/I_{th}$ , где  $I_{th} = D(\mu AL)^{-1}$  соответствует некоторой пороговой интенсивности («тепловой»), при превышении которой изменение концентрации становится сравнимым с первоначальной, т.е. для больших изменений концентрации частиц (при большой интенсивности излучения) имеем  $\alpha \gg 1$ . Как показывают оценки, для увеличения объёмной доли на несколько порядков требуются интенсивности около МВт/м<sup>2</sup>, что для прозрачных наноматериалов вполне достижимо с использованием даже непрерывных лазерных источников. При этих мощностях объемная доля наночастиц на дне кюветы может достигать единицы, что требует учета взаимодействия (отталкивания) наночастиц.

Рассмотрим простейшую модель для учета конечного объёма нанофазы - модель жестких сфер. В отличие от работы [12] начальная

концентрация наночастиц не считается малой. В этом случае динамика изменения концентрации наночастиц описывается следующим уравнением:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \left( -D \frac{\partial C}{\partial z} - C(1-C)V \right). \quad (4)$$

В итоге решение одномерной задачи (4) с соответствующими граничными условиями на верхней и нижней границах в стационарном режиме выглядит как:

$$C_2 = \frac{B \exp(\alpha Z)}{(1 + B \exp(\alpha Z))}, \quad (5)$$

где  $B$  – константа, определяемая из условий нормировки (сохранения числа частиц):

$$B = \frac{1 - \exp(\alpha C_0)}{\exp(\alpha C_0) - \exp(\alpha)}.$$

Таким образом, для профиля концентрации имеем два выражения – для разбавленных наносuspензий  $C_1$  (формула (3)) и для плотных наносuspензий  $C_2$  (формула (5)), где учтен конечный объём наночастиц.

Сравнение моделей проведем для разных начальных концентраций и интенсивностей излучения. На рис. 1 показаны профили концентрации в случае малых интенсивностей излучения ( $\alpha = 0,1$ ). Видно, что в разбавленной наносuspензии профили концентраций совпадают, а в концентрированной немного отличаются. На рис. 2 приведены расчетные профили для пограничного случая квазитепловой интенсивности излучения ( $\alpha = 1$ ). Хотя изменение концентрации достигает десятков процентов, характеры профилей почти не отличаются.

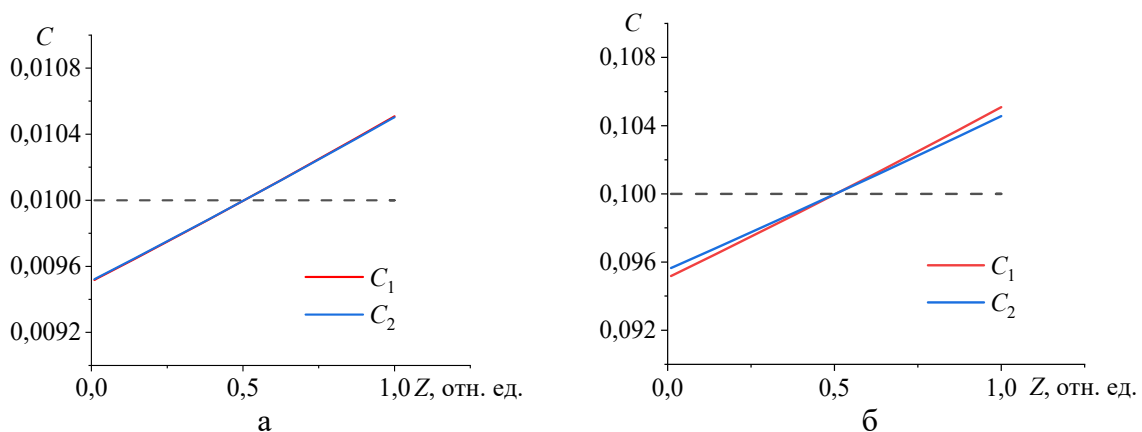


Рис. 1. Зависимость концентрации  $C$  (объёмной доли нанофазы) от приведенной координаты для малой интенсивности излучения: а – разбавленная наносuspензия ( $C_0 = 0,01$ ), б – концентрированная наносuspензия ( $C_0 = 0,1$ ). Здесь и далее значение  $C_0$  указано пунктиром; на панели (а) ход кривых  $C_1$  и  $C_2$  совпадает.

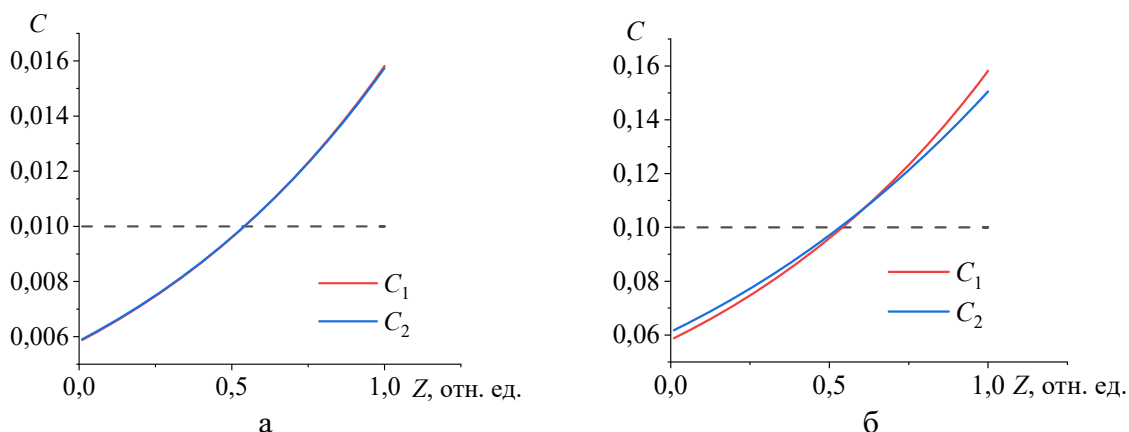


Рис. 2. Зависимость концентрации  $C$  (объемной доли нанофазы) от приведенной координаты для квазитепловой интенсивности излучения: а – разбавленная наносuspension ( $C_0 = 0,01$ ), б – концентрированная наносuspension ( $C_0 = 0,1$ ).

В случае большой (надтепловой) интенсивности излучения ( $\alpha = 20$ ) расчетный профиль концентрации в плотной наносuspension значительно отличается (см. рис. 3 б), при этом формула (3) приводит к нефизичному результату с объемной долей нанофазы большей единицы.

Таким образом, предложенная модель демонстрирует необходимость учета конечного объема наночастиц при расчете параметров оптического осаждения в плотных наносuspension при высоких (надтепловых) интенсивностях излучения. Исследование профилей концентрации, вызванных оптическим осаждением, можно использовать для получения уравнения состояния коллоидной suspension, изучения тонких деталей фазовой диаграммы и получения сведений о природе метастабильных фаз.

Полученные результаты представляют интерес для разработки новых методов получения наноматериалов, фотонных кристаллов и химических сенсоров, а также для совершенствования методов оптической диагностики наноматериалов [14-18].

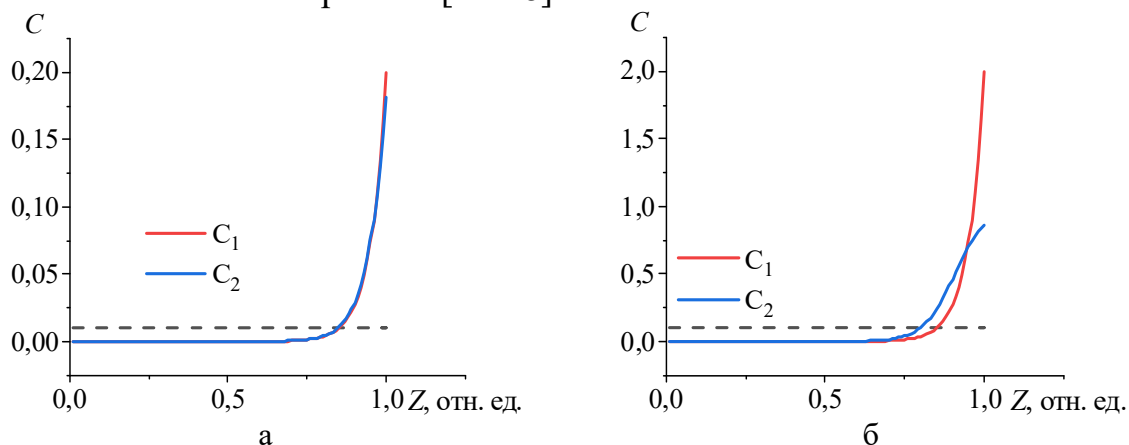


Рис. 3. Зависимость концентрации  $C$  (объемной доли нанофазы) от приведенной координаты для надтепловой интенсивности излучения: а – разбавленная наносuspension ( $C_0 = 0,01$ ), б – концентрированная наносuspension ( $C_0 = 0,1$ ).

**Библиографический список:**

1. **Buzzaccaro, S.** Kinetics of sedimentation in colloidal suspensions / S. Buzzaccaro, A. Tripodi, R. Rusconi et al. // *Journal of Physics: Condensed Matter*. – 2008. – V. 20. – № 49. – Art. № 494219. – 9 p. DOI: 10.1088/0953-8984/20/49/494219.
2. **Anghel, S.** Optical studies on sedimentation of suspensions / S. Anghel, I. Iova, S. Levai et al. // *Proceedings of the SPIE*. – 1998. – V. 3405. – P. 1027-1031. DOI: 10.1117/12.312708.
3. **Debora, J.D.** Thermoresponsive photonic crystals / J.D. Debora, L.A. Lyon // *The Journal of Physical Chemistry B*. – 2000. – V. 104. – I. 27. – P. 6327-6331. DOI: 10.1021/jp001238c.
4. **Duhr, S.** Two-dimensional colloidal crystals formed by thermophoresis and convection / S. Duhr, D. Braun // *Applied Physics Letters*. – 2005. – V. 86. – I. 23. – P. 131921-1-131921-3. DOI: 10.1063/1.1888036.
5. **Dietze, M.** Laser-induced motion in nanoparticle suspension droplets on a surface / M. Dietze, D. Poulidakos // *Physics of Fluids*. – 2005. – V. 17. – I. 10. – P. 102106-1-102106-12. DOI: 10.1063/1.2098587.
6. **Bieri, N.R.** Microstructuring by printing and laser curing of nanoparticle solutions/ N. R. Bieri, J. Chung, S. E. Haferl et al. // *Applied Physics Letters*. – 2003. – V. 82. – I. 20. – P. 3529-3531. DOI: 10.1063/1.1575502.
7. **Ta, V.D.** Dynamically controlled deposition of colloidal nanoparticle suspension in evaporating drops using laser radiation / V.D. Ta, R.M. Carter, E. Esenturk et al. // *Soft Matter*. – 2016. – V. 12. – I. 20. – P. 4530-4536. DOI: 10.1039/c6sm00465b.
8. **Wang, L.-G.** Dynamic radiation force of a pulsed Gaussian beam acting on Rayleigh dielectric sphere / L.-G. Wang, C.-L. Zhao // *Optics Letters*. – 2007. – V. 15. – I. 17. – P. 10615-10621. DOI: 10.1364/OE.15.010615.
9. **Quidant, R.** Radiation forces on a Rayleigh dielectric sphere in a patterned optical near field / R. Quidant, D. Petrov, G. Badenes // *Optics Letters*. – 2005. – V. 30. – I. 9. – P. 1009-1011. DOI: 10.1364/ol.30.001009.
10. **Deng, J.L.** Numerical modeling of optical levitation and trapping of the «stuck» particles with a pulsed optical tweezers / J. L. Deng, Q. Wei, Y. Z. Wang, Y. Q. Li // *Optics Express*. – 2006. – V. 13. – I. 10. – P. 3673-3680. DOI: 10.1364/OPEX.13.003673.
11. **Свистун, А.Ч.** Перемещение и локализация наночастиц в идеальной жидкости под действием градиентной силы светового давления / А.Ч. Свистун, Э.В. Мусафиров, Л.С. Гайда, Е.В. Матук // *Проблемы физики, математики и техники*. – 2024. – № 1 (58). – С. 44-49. DOI: 10.54341/20778708\_2024\_1\_58\_44.
12. **Иванов, В.И.** Сепарация частиц в полидисперсной наносuspension в поле лазерного излучения / В.И. Иванов, С.А. Пячин // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. – 2021. – Вып. 13. – С. 146-155. DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.146.
13. **Ivanova, G.** Light-induced sedimentation in nanoliquids / G. Ivanova, V. Khe, V. Ivanov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – V. 1115. – I. 3. – Art. № 032086. – 4 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1115/3/032086.
14. **Иванов, В.И.** Осаждение наночастиц под действием сил светового давления в жидких средах / В.И. Иванов, Г.Д. Иванова, В.И. Крылов, В.К. Хе // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. – 2018. – Вып. 10. – С. 286-290. DOI: 10.26456/pcascnn/2018.10.286.
15. **Khe, V.K.** Sedimentation of particles by the light pressure in nanosuspension / V.K. Khe, V.I. Ivanov, G.D. Ivanova, P.G. Chigrin // 23<sup>rd</sup> International symposium on atmospheric and ocean optics, atmospheric physics: proceedings, 3-7 July 2017, Irkutsk, Russian Federation. – Washington: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers. – 2017. – V. 10466. – Art. № 104664K. – 7 p. DOI: 10.1117/12.2288774.
16. **Ivanov, V.I.** Diagnostics of nanosuspension by the light-induced pseudo-prism method / V.I. Ivanov, G.D. Ivanova, V. I. Krylov, V. K. Khe // *Proceedings of the SPIE*. – 2016. – V. 10176. – P. 1017607-1-1017607-8. DOI: 10.1117/12.2268280.
17. **Vigolo, D.** Thermophoresis: microfluidics characterization and separation / D. Vigolo, R. Rusconi, H.A. Stone, R. Piazza // *Soft Matter*. – 2010. – V. 6. – I. 15. – P. 3489-3493. DOI: 10.1039/C002057E.
18. **Иванов, В.И.** Модуляционный метод светоиндуцированной псевдо-призмы в наносuspension / В.И. Иванов, И.Н. Егоршин // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. – 2024. – Вып. 16. – С. 134-139. DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.134.

**References:**

1. Buzzaccaro S., Tripodi A., Rusconi R. et al. Kinetics of sedimentation in colloidal suspensions, *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2008, vol. 20, no. 49, art. no. 494219, 9 p. DOI: 10.1088/0953-8984/20/49/494219.
2. Anghel S., Iova I., Levai S. et al. Optical studies on sedimentation of suspensions, *Proceedings of the SPIE*, 1998, vol. 3405, pp. 1027-1031 DOI: 10.1117/12.312708.

3. Debra J.D., Lyon L.A. Thermoresponsive photonic crystals, *The Journal of Physical Chemistry B*, 2000, vol. 104, issue 27, pp. 6327-6331. DOI: 10.1021/jp001238c.
4. Duhr S., Braun D. Two-dimensional colloidal crystals formed by thermophoresis and convection, *Applied Physics Letters*, 2005, vol. 86, issue 23, pp. 131921-1-131921-3. DOI: 10.1063/1.1888036.
5. Dietze M., Poulikakos D. Laser-induced motion in nanoparticle suspension droplets on a surface, *Physics of Fluids*, 2005, vol. 17, issue 10, pp. 102106-1-102106-12. DOI: 10.1063/1.2098587.
6. Bieri N. R., Chung J., Hafner S. E., Poulikakos D., Grigoropoulos C. P. Microstructuring by printing and laser curing of nanoparticle solutions, *Applied Physics Letters*, 2003, vol. 82, issue 30, pp. 3529-3531. DOI: 10.1063/1.1575502.
7. Ta V.D., Carter R.M., Esenturk E. et al. Dynamically controlled deposition of colloidal nanoparticle suspension in evaporating drops using laser radiation, *Soft Matter*, 2016, vol. 12, issue 20, pp. 4530-4536. DOI: 10.1039/c6sm00465b.
8. Wang L.G., Zhao C.L. Dynamic radiation force of a pulsed Gaussian beam acting on Rayleigh dielectric sphere, *Optics Letters*, 2007, vol. 15, issue 17, pp. 10615-10621. DOI: 10.1364/oe.15.010615.
9. Quidant R., Petrov D., Badenes G. Radiation forces on a Rayleigh dielectric sphere in a patterned optical near field, *Optics Letters*, 2005, vol. 30, issue 9, pp. 1009-1011. DOI: 10.1364/ol.30.001009.
10. Deng J.L., Wei Q., Wang Y.Z., Li Y.Q. Numerical modeling of optical levitation and trapping of the «stuck» particles with a pulsed optical tweezers, *Optics Express*, 2006, vol. 13, issue 10, pp. 3673-3680. DOI: 10.1364/OPEX.13.003673.
11. Svistun A.Ch., Musafirov E.V., Gaida L.S., Matuk E.V. Peremeshchenie i lokalizatsiya nanochastits v ideal'noj zhidkosti pod dejstviem gradientnoj sily svetovogo davleniya [Movement and localization of nanoparticles in an ideal liquid under the influence of the gradient force of light pressure], *Problemy Fiziki, Matematiki i Tekhniki [Problems of Physics, Mathematics and Technics]*, 2024, no. 1 (58), pp. 44-49; DOI: 10.54341/20778708\_2024\_1\_58\_44 (in Russian).
12. Ivanov V.I., Pyachin S.A. Separatsiya chastits v polidispersnoj nanosuspenszii v pole lazernogo izlucheniya [Separation of particles in polydisperse nanosuspension in the laser radiation field], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2021, issue 13, pp. 146-155. DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.146. (In Russian).
13. Ivanova G., Khe V., Ivanov V. Light-induced sedimentation in nanoliquids, *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1115, issue 3, art. no. 032086, 4 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1115/3/032086.
14. Ivanov V.I., Ivanova G.D., Krylov V. I., Khe V.K. Osazhdenie nanochastits pod dejstviem sil svetovogo davleniya v zhidkikh sredakh [Sedimentation of nanoparticles under the action of light pressure forces in liquid media], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2018, issue 10, pp. 286-290. DOI: 10.26456/pcascnn/2018.10.286. (In Russian).
15. Khe V.K., Ivanov V.I., Ivanova G.D., Chigrin P.G. Sedimentation of particles by the light pressure in nanosuspension, *23<sup>rd</sup> International symposium on atmospheric and ocean optics, atmospheric physics: proceedings*, 3-7 July 2017, Irkutsk, Russian Federation. Washington, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2017, vol. 10466, art. no. 104664K, 7 p. DOI: 10.1117/12.2288774.
16. Ivanov V.I., Ivanova G.D., Krylov V.I., Khe V.K. Diagnostics of nanosuspension by the light-induced pseudo-prism method, *Proceedings of the SPIE*, 2016, vol. 10176, pp. P. 1017607-1-1017607-8. DOI: 10.1117/12.2268280.
17. Vigolo D., Rusconi R., Stone H.A., Piazza R. Thermophoresis: microfluidics characterization and separation, *Soft Matter*, 2010, vol. 6, issue 15, pp. 3489-3493. DOI: 10.1039/C002057E.
18. Ivanov V.I., Egorshin I.N. [A modulation method of light-induced pseudo-prism in nanosuspension], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2024, issue 16, pp. 134-139. DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.134. (In Russian).