Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный университет»

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ИЗУЧЕНИЯ КЛАСТЕРОВ,
НАНОСТРУКТУР
И НАНОМАТЕРИАЛОВ**

**PHYSICAL AND CHEMICAL ASPECTS
OF THE STUDY OF CLUSTERS,
NANOSTRUCTURES AND
NANOMATERIALS**

**FIZIKO-HIMIČESKIE ASPEKTY
IZUČENIÂ KLASTEROV,
NANOSTRUKTUR I NANOMATERIALOV**

выпуск 13

ТВЕРЬ 2021

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Ф50

Рецензирование статей осуществляется на основании Положения о рецензировании статей и материалов для опубликования в журнале «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов».

Официальный сайт издания в сети Интернет:

<https://www.physchemaspects.ru>

Ф50 Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]. – Тверь: Издательство Тверского государственного университета, 2021. – Вып. 13. – 956 с.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-47789 от 13.12.2011.

Издание составлено из оригинальных статей, кратких сообщений и обзоров теоретического и экспериментального характера, отражающих результаты исследований в области изучения физико-химических процессов с участием кластеров, наноструктур и наноматериалов физики, включая межфазные явления и нанотермодинамику. Журнал предназначен для научных и инженерно-технических работников, преподавателей ВУЗов, студентов и аспирантов. Издание подготовлено на кафедре общей физики Тверского государственного университета.

Переводное название: Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials

Транслитерация названия: Fiziko-himičeskie aspekty izučeniâ klasterov, nanostruktur i nanomaterialov

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Print ISSN 2226-4442

Online ISSN 2658-4360

© Коллектив авторов, 2021

© Тверской государственнй университет, 2021

УДК 535.214; 544.77

Оригинальная статья

СЕПАРАЦИЯ ЧАСТИЦ В ПОЛИДИСПЕРСНОЙ НАНОСУСПЕНЗИИ В ПОЛЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В.И. Иванов, С.А. Пячин

ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения»

680021, Россия, Хабаровск, ул. Серышева, 47

ivanov@festu.khv.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.146

Аннотация: На основе стационарного решения уравнения диффузии изучена сепарация наночастиц в прозрачной полидисперсной водной суспензии с различными типами распределений по размерам под действием силы светового давления, возникающей в поле лазерного излучения интенсивностью $0,5–500 \text{ кВт/см}^2$. Установлено, что на дно кюветы преимущественно будут осаждаться частицы радиусом более 100 нм, а концентрация более мелких наночастиц во всем объеме суспензии останется без изменений. В случае симметричного начального распределения наночастиц по размерам воздействие интенсивного светового пучка на суспензию приводит к нарушению симметрии кривой функции распределения, а также смещению максимума в область меньших размеров частиц на облучаемой поверхности. Если начальное распределение по размерам имеет несимметричный характер, исходное одномодовое распределение частиц по размерам трансформируется в двумодовое. Данная методика может быть использована для выделения наночастиц определенных размеров в зависимости от плотности мощности излучения.

Ключевые слова: лазерное излучение, полидисперсная среда, наночастицы, осаждение, сепарация.

1. Введение

В последние два десятилетия значительно вырос интерес к методам контролируемой транспортировки объектов с размерами нанометрового диапазона, что связано с интенсивным развитием нанотехнологий и созданием новых наноматериалов [1]. Принцип работы ловушек молекул и частиц основан на использовании силовых полей различной природы: электрических, магнитных, акустических и световых [2]. Особого внимания заслуживают устройства, использующие лазерное излучение для разделения частиц в жидкости, оптической левитации частиц в вакууме и в газе, захвате, удержании и перемещении частиц в фокусе лазерного луча [3-9].

Сила радиационного давления позволяет осуществить миграцию любых частиц, которые имеют показатель преломления, отличный от показателя преломления окружающей среды. Этот подход был применен для разработки модели осаждения частиц в суспензии на дно кюветы, освещаемой равномерным световым потоком [10-12]. Было показано, что скорость светоиндуцированной миграции частицы в вязкой жидкости характеризуется прямой зависимостью от интенсивности излучения и резкой степенной зависимостью от радиуса этой частицы. Вследствие

этого после продолжительного облучения распределение концентрации микро- и наноразмерных частиц в жидкой среде будет существенно отличаться от начального – в основном будут мигрировать частицы, обладающие большим радиусом. Поэтому возникает возможность использовать этот эффект для разделения крупных и мелких фракций наносuspензий, которые, как правило, представляют собой полидисперсные системы. Цель работы заключалась в изучении сепарации частиц в полидисперсной наносuspензии с различными типами распределений под действием силы рассеяния, возникающей в поле лазерного излучения.

2. Математическая модель

Предполагается, что прозрачная наносuspензия освещается потоком лазерного излучения с однородным распределением интенсивности [11]. Сила светового давления зависит от интенсивности света I_0 :

$$F_p = AI_0, \quad (1)$$

где $A = \frac{128}{3} \frac{a^6 \pi^5}{c \lambda^4} \frac{n_1 (n_2^2 - n_1^2)^2}{(n_2^2 + 2n_1^2)^2}$, n_1 и n_2 – показатели преломления

дисперсионной и дисперсной сред соответственно, a – радиус частицы, λ – длина волны излучения, c – скорость света.

Скорость сферической частицы равна $v = \mu F_p$, где $\mu = \frac{1}{6\pi a \eta}$ – коэффициент подвижности частиц, η – вязкость жидкости. Влиянием гравитационного поля на перемещение частиц пренебрегаем из-за их малых размеров.

Динамика изменения объемной концентрации наночастиц определяется диффузионным уравнением:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - v \frac{\partial C}{\partial z}, \quad (2)$$

где $D = \frac{kT}{6\pi a \eta}$ – коэффициент диффузии, k – постоянная Больцмана, T – температура дисперсионной среды. Начальные условия имеют вид

$$C = C_0 \text{ при } t = 0 \quad (3)$$

и соответственно граничные условия записываем в виде:

$$\frac{\partial C}{\partial z} = \frac{v}{D} C, \quad (4)$$

при $z = 0$ (облучаемая поверхность) и $z = l$ (дно кюветы). Стационарное решение уравнения (2) дает возможность вычислить концентрацию наночастиц определенного радиуса на разной глубине кюветы:

$$C(z) = C_0 \frac{vl}{D} \frac{\exp\left(\frac{v}{D}z\right)}{\exp\left(\frac{v}{D}l\right) - 1}. \quad (5)$$

Заменяв отношение скорости движения частиц в суспензии к коэффициенту диффузии на выражение

$$v/D = Ba^6 I_0, \quad (6)$$

где $B = \frac{128}{3} \frac{\pi^5}{kTc\lambda^4} \frac{n_1(n_2^2 - n_1^2)^2}{(n_2^2 + 2n_1^2)^2}$, можно установить зависимость концентрации

частиц от интенсивности светового потока, размера частицы, глубины кюветы:

$$C(z) = C_0 Ba^6 I_0 l \frac{\exp(Ba^6 I_0 z)}{\exp(Ba^6 I_0 l) - 1}. \quad (7)$$

Расчеты проведены для водной суспензии, содержащей частицы диоксида кремния. Показатель преломления SiO_2 – $n_2 = 1,56$; показатель преломления воды – $n_1 = 1,33$. Температура дисперсной среды – 293 К. Глубина кюветы – $l = 10$ мм. Вязкость водной суспензии – 0,001 Па·с. Интенсивность лазерного излучения длиной волны $\lambda = 632$ нм изменяли в диапазоне от 0,5 до 500 кВт/см².

Проанализировано осаждение частиц, которые характеризуются однородным, нормальным и несимметричным распределениями по размерам в диапазоне от 10 до 200 нм. При этом использованы три соответствующие функции распределения вида

$$f_1(a) = \begin{cases} \frac{N_0}{a_{\max} - a_{\min}}, & \text{если } a_{\min} \leq a \leq a_{\max}, \\ 0, & \text{если } a < a_{\min}, a > a_{\max}, \end{cases}$$

$$f_2(a) = \frac{\alpha}{\sqrt{2\pi}\beta} e^{-\frac{(a-\bar{a})^2}{2\beta^2}}, \quad f_3(a) = \frac{\alpha a^3}{e^{-\beta a} - 1},$$

где N_0 – общее число частиц, $\bar{a}$ – размер частиц с максимальной концентрацией в исходном состоянии, $a_{\min}$, $a_{\max}$ – минимальный и максимальный размеры частиц в суспензии соответственно, α , β – постоянные коэффициенты. Условие нормировки данных функций определяется количеством частиц в суспензии, заполняющей кювету объемом V :

$$\int_{a_{\min}}^{a_{\max}} f_i(a) da = C_0 V = N_0 \quad (i = 1, 2, 3).$$

3. Результаты расчетов

Результаты вычислений относительной концентрации частиц различных размеров на разной глубине кюветы при исходном ступенчатом равномерном распределении $f_1(a)$ по размерам ($a_{\min} = 40$ нм, $a_{\max} = 170$ нм) показаны на рис. 1. Как видно, при светоиндуцированной диффузии ко дну кюветы смещаются частицы преимущественно больших размеров, в то время как концентрация более мелких частиц практически не изменяется. С увеличением интенсивности лазерного излучения с 0,5 до 50 кВт/см² скорость дрейфа крупных частиц значительно возрастает. Это приводит к тому, что почти все частицы радиусом более 140 нм перемещаются к стенке кюветы, противоположной той, на которую падает световой поток (см. рис. 1 в).

В случае, когда начальное распределение по размерам соответствует нормальному распределению $f_2(a)$, воздействие светового потока интенсивностью более 50 кВт/м² на суспензию приводит к нарушению симметрии кривой функции распределения, а также смещению максимума в область меньших размеров частиц на облучаемой поверхности (см. рис. 2). Так, например, при интенсивности лазерного излучения 100 кВт/см² максимум кривой распределения вблизи облучаемой поверхности соответствует радиусу частиц 90 нм в отличие от 100 нм в исходном состоянии, а на дне кюветы глубиной 10 мм происходит накопление частиц преимущественно с радиусом 118 нм. В этой области их концентрация увеличивается более чем в 2 раза по сравнению с начальной.

Интересный результат получается при осаждении частиц из полидисперсной суспензии, в которой распределение по размерам имеет несимметричный характер типа функции $f_3(a)$. Как видно на рис. 3 а, при малой интенсивности 0,5 кВт/см² распределение частиц по размерам с максимумом при 40 нм не претерпевает заметных изменений с увеличением глубины.

Повышение интенсивности до 100 кВт/см² приводит к росту концентрации частиц радиусом более 100 нм вблизи дна кюветы (см. рис. 3 б). При этом на кривой распределения появляется второй максимум в области 130 нм, высота которого растет с повышением интенсивности светового потока (см. рис. 3 в). Таким образом, исходное одномодовое распределение частиц по размерам $f_3(a)$ трансформируется в двумодовое. Т.е. даже несмотря на малую концентрацию частиц радиусом 110–150 нм их можно выделить из наносуспензии, осаждая на дно кюветы.

Рис. 1. Относительная концентрация частиц разных размеров с исходным распределением $f_1(a)$ на разной глубине при интенсивности излучения: а – 0,5 кВт/м², б – 5 кВт/м², в – 50 кВт/м².

Рис. 2. Относительная концентрация частиц разных размеров с исходным распределением $f_2(a)$, если $\bar{a}=100$ нм, на разной глубине при интенсивности излучения: а – 0,5 кВт/м², б – 50 кВт/м², в – 100 кВт/м².

Рис. 3. Относительная концентрация частиц разных размеров с исходным распределением $f_3(a)$ на разной глубине при интенсивности излучения: а – 0,5 кВт/м², б – 100 кВт/м², в – 500 кВт/м².

4. Заключение

Проведена оценка возможности разделения наночастиц диоксида кремния в полидисперсной водной суспензии под действием потока монохроматического света длиной волны 632 нм и интенсивностью 0,5–500 кВт/см². Рассмотрены системы с различными типами начального распределения частиц по размерам: равномерного, нормального и несимметричного. На основе стационарного решения уравнения диффузии установлено, что светоиндуцированную миграцию ко дну кюветы осуществляют преимущественно частицы радиусом более 100 нм, в то время концентрация более мелких наночастиц во всем объеме суспензии практически не изменяется. При этом характер распределения частиц по размерам изменяется в зависимости от интенсивности лазерного излучения и глубины слоя. Вблизи дна кюветы наблюдается смещение максимума нормального распределения в область больших размеров, а одномодовое несимметричное распределение с максимумом для частиц радиусом 40 нм трансформируется в двумодовое с дополнительным максимумом, соответствующим радиусу 130 нм. В целом можно констатировать, что предложенная методика лазерного облучения полидисперсной наносуспензии позволит реализовать сепарацию наночастиц определенных размеров в зависимости от плотности мощности светового потока.

Библиографический список:

1. Пул, Ч. Нанотехнологии / Ч. Пул, Ф. Оуэнс. Пер. с англ. – 2-е, доп. изд. – М.: ЗАО «РИЦ «Техносфера», 2005. – 336 с.
2. Евстапов, А.А. Физические методы управления движением и разделением микрочастиц в жидких средах. I. Диэлектрофорез, фотофорез, оптофорез, оптический пинцет / А.А. Евстапов // Научное приборостроение. – 2005. – Т. 15. – № 1. – С. 3-20.
3. Соколовский, Г.С. Манипулирование микрочастицами при помощи бесселевых пучков, полученных от полупроводниковых лазеров / Г.С. Соколовский, С.Н. Лосев, К.К. Соболева и др. // Письма в Журнал технической физики. – 2014. – Т. 40. – Вып. 11. – С. 53-59.
4. Nieminen, T.A. 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. – V. 146. – P. 59-80. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2014.04.003.
5. Афанасьев, А.А. Движение серебряных наночастиц в жидкости с различной вязкостью под действием сил светового давления / А.А. Афанасьев, Л.С. Гайда, Е.В. Матук, А.Ч. Свистун // Проблемы физики, математики и техники. – 2016. – № 4(29). – С. 7-12.
6. Polimeno, P. Optical tweezers and their applications / P. Polimeno, A. Magazzù, M.A. Iatì et al. // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. – 2018. – V. 218. – P. 131-150. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2018.07.013.
7. Yang, Y. Optical trapping with structured light: a review / Y. Yang, Y.-X. Ren, M. Chen, Y. Arita, C. Rosales-Guzmán // Advanced Photonics. – 2021. – V. 3. – № 3. – P. 034001-1-034001-40. DOI: 10.1117/1.AP.3.3.034001.
8. Минин, И.В. Оптические и акустические ловушки / И.В. Минин, О.В. Минин // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22. – № 3. – С. 194-214.
9. Иванова, Г.Д. Светоиндуцированная линза в прозрачной плотной наносуспензии / Г.Д. Иванова, А.В. Мяготин, В.И. Иванов // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2019. – Вып. 11. – С. 590-595. DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.590.
10. 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.

11. **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.

12. **Khe, V.K.** Sedimentation of particles by the light pressure in nanosuspension / V.K. Khe, V.I. Ivanov, G.D. Ivanova, P.G. Chigrin // 23rd 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.

References:

1. Poole C.P., Owens F.J. (Jr.) Introduction to nanotechnology. Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 2003. XII, 388 p.
2. Evstrapov A.A. Fizicheskie metody upravleniya dvizheniem i razdeleniem mikrochastits v zhidkikh sredakh. I. Dielektroforez, fotoforez, optoforez, opticheskij pintset [Physical methods of motion control and separation of microparticles in liquid media. I. Dielectrophoresis, photophoresis, optophoresis, optical tweezers], *Nauchnoe priboroostroenie [Scientific Instrumentation]*, 2005, vol. 15, no. 1, pp. 3-20. (In Russian).
3. Sokolovskii G.S., Losev S.N., Soboleva K.K. et al. Manipulation of microparticles using Bessel beams from semiconductor lasers, *Technical Physics Letters*, 2014, vol. 40, issue 6, pp. 475-478. DOI: 10.1134/S1063785014060133.
4. Nieminen T. A., du Preez-Wilkinson N., Stilgoe A.B. et al. Optical tweezers: theory and modelling, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2014, vol. 146, pp. 59-80. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2014.04.003.
5. Afanas'ev A.A., Gaida L.S., Matuk E.V., Svistun A.Ch. Dvizheniye serebryanykh nanochastits v zhidkosti s razlichnoy vyazkostyu pod deystviyem sil svetovogo davleniya [The movement of silver nanoparticles in liquid with various viscosity under the influence of forces of light pressure], *Problemy fiziki. matematiki i tekhniki [Problems of Physics, Mathematics and Technics]*, 2016, no. 4(29), pp. 7-12. (In Russian).
6. Polimeno P., Magazzù A., Iati M.A. et al. Optical tweezers and their application, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2018, vol. 218, pp. 131-150. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2018.07.013.
7. Yang Y., Ren Y.X., Chen M. Optical trapping with structured light: a review, *Advanced Photonics*, 2021, vol. 3, no. 3, pp. 034001-1-034001-40. DOI: 10.1117/1.AP.3.3.034001.
8. Minin I.V., Minin O.V. Opticheskie i akusticheskie lovushki [Optical and acoustic traps], *Vestnik SGUGiT [Vestnik of SSUGT]*, 2017, vol. 22, no. 3, pp. 194-214. (In Russian).
9. Ivanova G.D., Myagotin A.V., Ivanov V.I. Svetoinducirovannaya linza v prozrachnoy plotnoy nanosuspenszii [Light induced lens in a transparent dense nanosuspension], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2019, issue 11, pp. 590-595. DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.590. (In Russian).
10. 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.
11. Ivanov V.I., Ivanova G.D., Krylov V.I., Khe V.K. Osazhdenie nanochastits pod deystviem 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).
12. Khe V.K., Ivanov V.I., Ivanova G.D., Chigrin P.G. Sedimentation of particles by the light pressure in nanosuspension, *23rd 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.

Original paper

SEPARATION OF PARTICLES IN POLYDISPERSE NANOSUSPENSION IN THE LASER RADIATION FIELD

V.I. Ivanov, S.A. Pyachin

Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.146

Abstract: On the basis of a stationary solution of a diffusion equation separation of nanoparticles in a transparent polydisperse aqueous suspension with different types of size distributions was studied

under the action of the light pressure arising in the laser radiation field with the intensity of $0,5-500 \text{ kW/cm}^2$. It was found that particles with a radius of more than 100 nm will mainly be precipitated at the bottom of the cell, and the concentration of smaller nanoparticles in the entire volume of the suspension will remain unchanged. In the case of a symmetrical initial distribution of nanoparticles size, the effect of a light beam with high intensity on the suspension leads to a violation of the symmetry of the distribution function curve, as well as a shift of the maximum to the region of smaller particle sizes on the irradiated surface. If the initial size distribution is asymmetric, the initial single-mode particle size distribution is transformed into a two-mode one. This technique can be used to isolate nanoparticles of certain sizes depending on the power density of the radiation.

Keywords: laser radiation, polydisperse medium, nanoparticles, deposition, separation.

Иванов Валерий Иванович – д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой «Физика и теоретическая механика» ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения»

Пячин Сергей Анатольевич – д.ф.-м.н., доцент, профессор кафедры «Физика и теоретическая механика» ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения»

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

Sergey A. Pyachin – Dr. Sc., Docent, Professor, Physics and Theoretical Mechanics Department, Far Eastern State Transport University

Поступила в редакцию/received: 25.09.2021; после рецензирования/revised: 17.10.2021; принята/accepted 20.10.2021.