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**

МЕЖВУЗОВСКИЙ СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

выпуск 10

ТВЕРЬ 2018

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 Межвузовском сборнике научных трудов «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов».

Официальный сайт издания в сети Интернет:

www.physchemaspects.ru

Ф50 Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]: межвуз. сб. науч. тр. / под общей редакцией В.М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2018. – Вып. 10. – 708 с.

ISBN 978-5-7609-1395-1

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 7747789 от 13.12.2011.

Сборник составлен из оригинальных статей 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. Сборник предназначен для научных и инженерно-технических работников, преподавателей ВУЗов, студентов и аспирантов. Издание подготовлено на кафедре общей физики Тверского государственного университета.

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

ББК Ж36:Г5+В379

ISBN 978-5-7609-1395-1

ISSN 2226-4442

© Коллектив авторов, 2018

© Тверской государственной
университет, 2018

УДК 535.211

ОСАЖДЕНИЕ НАНОЧАСТИЦ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛ СВЕТОВОГО ДАВЛЕНИЯ В ЖИДКИХ СРЕДАХ

В.И. Иванов, Г.Д. Иванова, В.И. Крылов, В.К. Хе

ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения»

680021, Хабаровск, ул. Серышева, 47

khe@ngs.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2018.10.286

Аннотация: Рассматривается модель осаждения наночастиц в равномерном световом поле как альтернатива методам осаждения в гравитационном поле и центрифугированию. Приведено точное аналитическое решение одномерной нестационарной задачи массопереноса в ограниченной кювете. Сравниваются основные параметры центрифужного и светоиндуцированного осаждения наночастиц.

Ключевые слова: осаждение, дисперсные среды, давление света.

Основными методами разделения неоднородных систем в промышленности и физико-химических исследованиях являются осаждение, фильтрование и центрифугирование [1]. В гравитационном поле осаждаются достаточно крупные частицы, не подверженные броуновскому тепловому движению, в поле центробежных сил возможно разделение коллоидных частиц и макромолекул – молекул природных и синтетических полимеров.

В данной работе исследуется альтернативная описанным выше методам модель осаждения наночастиц в жидкости силами светового давления. Рассмотрим прозрачную наносuspension (растворы, содержащие дисперсные частицы размерами меньше 500 нм), освещаемую потоком лазерного излучения с однородным распределением интенсивности (см. рис. 1).

Рис. 1. Схема осаждения наночастиц в световом поле.

На наночастицу действует сила светового давления [2]:

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

где I – интенсивность света.

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

$$m = n_2/n_1, \quad (3)$$

где n_1, n_2 – показатели преломления веществ дисперсионной и дисперсной сред соответственно, a – радиус частицы, λ – длина волны излучения, c_0 – скорость света. Скорость частицы $\vec{v} = \mu \vec{u}_p$, где $\mu = (6\pi\eta a)^{-1}$ – коэффициент подвижности частиц, η – вязкость жидкости.

Динамика изменения концентрации наночастиц описывается уравнением [3]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - V \frac{\partial C}{\partial z}, \quad (4)$$

где $C(z, t)$ – массовая концентрация дисперсных частиц, D – коэффициент диффузии, $V = \gamma I$ – скорость наночастиц в жидкой среде, I – интенсивность излучения, $\gamma = \frac{64}{9} \frac{\pi^2}{c_0} \frac{n_1}{\lambda^4 \eta} \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2}$.

Точное аналитическое решение уравнения (4) с учетом отсутствия потока частиц на верхней и нижней границах [4]:

$$C(z', t') = C_0 u \left\{ \frac{\exp(uz')}{(e^u - 1)} + \right. \\ \left. + e^{0,5uz'} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2(k\pi)^2 [1 - (-1)^k e^{-0,5u}]}{(k^2 \pi^2 + u^2/4)^2} \left[\frac{u}{(2k\pi)} \sin(k\pi z') + \cos(k\pi z') \right] e^{-(k^2 \pi^2 + u^2/4)t'} \right\}, \quad (5)$$

где C_0 – начальная концентрация наночастиц, $u = Vl/D$, l – высота кюветы, $t' = Dt/l^2$, $z' = z/l$.

В стационарном случае решение для концентрации (5) можно записать в виде зависимости от интенсивности излучения и высоты кюветы:

$$C(z, I) = C_0 \gamma I D^{-1} l \frac{e^{\gamma I D^{-1} z}}{e^{\gamma I D^{-1} l} - 1}, \quad (6)$$

где $\gamma = 64\pi^4 a^5 n_1 (m^2 - 1)(m^2 + 2)^{-1} (9c_0 \lambda^4 \eta)^{-1}$.

Выражение (6) преобразуем:

$$C(z, l_{ph}) = C_0 l / l_{ph} \frac{e^{z/l_{ph}}}{e^{l/l_{ph}} - 1}, \quad (7)$$

где параметр $l_{ph} = D/\gamma I$, характеризующий глубину, на которой концентрация частиц изменяется в e раз при заданной интенсивности.

На рис. 2 приведена зависимость параметра l_{ph} от интенсивности лазерного излучения для следующих параметров: $a = 10^{-7}$ м, $n_1 = 1,1$, $n_2 = 1,33$, $\lambda = 632$ нм, $\eta = 1,004 \cdot 10^{-3}$ Па·с. Коэффициент диффузии рассчитывался по формуле Стокса-Эйнштейна $D = kT/6\pi\eta a$.

Рис. 2. Зависимость параметра l_{ph} от интенсивности излучения.

При анализе процессов осаждения важной молекулярно-кинетической характеристикой системы является константа седиментации S (Сведберг), равная отношению скорости осаждения к центробежному ускорению:

$$S = \frac{V}{\omega^2 R} = \frac{2a^2 \Delta \rho}{9\eta}, \quad (8)$$

где ω – угловая скорость центрифуги, R – радиус центрифуги, $\Delta \rho = \rho_p - \rho_m$, ρ_p – плотность частиц, ρ_m – плотность среды. Константа осаждения зависит от массы, формы частиц и фазы, 1 Сведберг имеет размерность времени и численно равняется 10^{-13} секундам.

По аналогии с константой седиментации введем величину, характеризующую седиментацию в световом поле:

$$S_L = \frac{V}{F_p \left(\frac{4}{3} \pi a^3 \rho_p \right)^{-1}} = \frac{2a^2 \rho_p}{9\eta}. \quad (9)$$

Видно, что преимуществом введения постоянной седиментации в световом поле является отсутствие зависимости от плотности среды. Приравняв константы осаждения в формулах (8) и (9), получим формальную зависимость частоты вращения центрифуги от интенсивности излучения, требующейся для достижения аналогичной скорости осаждения частиц:

$$\omega = \left(\frac{32\pi^4 a^3 n_1}{c_0 \lambda^4 \Delta \rho R} \cdot \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} I \right)^{1/2}. \quad (10)$$

На рис. 3 показана зависимость угловой скорости центрифуги от интенсивности излучения, необходимой для достижения той же скорости осаждения, что и при ультрацентрифугировании, при следующих значениях: $a = 10^{-7}$ м, $R = 0,1$ м. Как видно из рис. 3 мощности лазерного излучения современных установок хватает для достижения частот, используемых при центрифугировании.

Рис. 3. Зависимость угловой скорости центрифуги от интенсивности излучения.

Таким образом, подводя краткие итоги имеем:

1. Была решена задача одномерная задача переноса наночастиц в прозрачной суспензии, решение которой позволяет анализировать двухфазные среды в режиме реального времени;
2. Был введен параметр, характеризующий изменение концентрации по высоте ячейки как функция интенсивности излучения;
3. Были рассчитаны интенсивности излучения, позволяющие достигать параметры как и при центрифугировании.

Предложенная модель оптического осаждения наночастиц актуальна при изучении дисперсных жидкофазных сред, а также для оптической диагностики [4-6] таких сред в качестве альтернативы методу центрифугирования.

Библиографический список:

1. **Рафиков, С.Р.** Методы определения молекулярных весов и полидисперсности высокомолекулярных соединений / С.Р. Рафиков, С.А. Павлова, И.И. Твердохлебова. – М.: АН СССР, 1963. – 335 с.
2. Физическая энциклопедия / под ред. А.М. Прохорова – М.: «Советская энциклопедия», 1988. Т. 1: Ааронова-Боме эффект – Длинные линии. – 704 с.
3. **Ландау, Л.Д.** Теоретическая физика: в 10 т. / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: «Наука», 1986. Т. 6: Гидродинамика. – 736 с.
4. **Ivanov, V.I.** Light induced lens response in nanosuspension / V.I. Ivanov, G.D. Ivanova, V.K. Khe // Proceedings The International Society for Optics and Photonics. Asia-Pacific Conference on Fundamental Problems of Opto- and Microelectronics, Khabarovsk, 14 December 2016. – 2017. – V. 10176. – P. 1017607-1-1017607-8.
5. **Buzzaccaro, S.** Kinetics of sedimentation in colloidal suspensions / S. Buzzaccaro, A. Tripodi, R. Rusconi, D. Vigol., R. Piazza // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2008. – V. 20. – № 49. – P. 494219-1-494219-9.
6. **Ivanov, V.I.** Light-induced thermodiffusion in two-component liquid / V.I. Ivanov, G.D. Ivanova, K.N. Okishev // Proceedings The International Society for Optics and Photonics. XXII International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, Tomsk, 29 November 2016. – 2016. – V. 10035. – P. 100354Y-1-100354Y-4.

References:

1. **Rafikov, S.R.** Metody opredeleniya molekulyarnykh vesov i polidispersnosti vysokomolekulyarnykh soedinenij / S.R. Rafikov, S.A. Pavlova, I.I. Tverdohlebova. – M.: AN SSSR, 1963. – 335 p.
2. Fizicheskaya enciklopediya / pod red. A.M. Prohorova – M.: «Sovetskaya enciklopediya», 1988. V. 1: Aaronova-Boma effekt – Dlinnye linii. – 704 p.
3. **Landau, L.D.** Teoreticheskaya fizika: v 10 vol. / L.D. Landau, E.M. Lifshic. – M.: «Nauka», 1986. V. 6: Gidrodinamika. – 736 p.
4. **Ivanov, V.I.** Light induced lens response in nanosuspension / V.I. Ivanov, G.D. Ivanova, V.K. Khe // Proceedings The International Society for Optics and Photonics. Asia-Pacific Conference on Fundamental Problems of Opto- and Microelectronics, Khabarovsk, 14 December 2016. – 2017. – V. 10176. – P. 1017607-1-1017607-8.
5. **Buzzaccaro, S.** Kinetics of sedimentation in colloidal suspensions / S. Buzzaccaro, A. Tripodi, R. Rusconi, D. Vigol., R. Piazza // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2008. – V. 20. – № 49. – P. 494219-1-494219-9.
6. **Ivanov, V.I.** Light-induced thermodiffusion in two-component liquid / V.I. Ivanov, G.D. Ivanova, K.N. Okishev // Proceedings The International Society for Optics and Photonics. XXII International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, Tomsk, 29 November 2016. – 2016. – V. 10035. – P. 100354Y-1-100354Y-4.

SEDIMENTATION OF NANOPARTICLES UNDER THE ACTION OF LIGHT PRESSURE FORCES IN LIQUID MEDIA

V.I. Ivanov, G.D. Ivanova, V.I. Krylov, V.K. Khe
Far Eastern State Transport University

DOI: 10.26456/pcascnn/2018.10.286

Abstract: A model of sedimentation of nanoparticles in a uniform light field is considered as an alternative to methods of precipitation in a gravitational field and centrifugation. The exact analytical solution of the one-dimensional nonstationary mass transfer problem in a bounded cell is given. The main parameters of the centrifugal and light-induced sedimentations of nanoparticles are compared.

Keywords: *sedimentation, dispersed media, light pressure.*

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

Иванова Галина Дмитриевна – старший преподаватель кафедры «Физика и теоретическая механика» ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения»

Крылов Владимир Иванович – д.ф.-м.н., профессор кафедры «Физика и теоретическая механика» ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения»

Хе Владимир Канчерович – инженер кафедры «Физика и теоретическая механика» ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения»

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

Galina D. Ivanova – Senior Lecturer, Physics and Theoretical Mechanics Department, Far Eastern State Transport University

Vladimir I. Krylov – Dr. Sc., Professor, Physics and Theoretical Mechanics Department, Far Eastern State Transport University

Vladimir K. Khe – engineer, Physics and Theoretical Mechanics Department, Far Eastern State Transport University