

УДК 53.087:538.93

ОПТИЧЕСКАЯ СЕДИМЕНТАЦИЯ ПОЛИДИСПЕРСНЫХ СМЕСЕЙ

Иванова Г.Д., Хе В.К., Иванов В.И.

ФГБОУ ВО Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск,
e-mail: tmeh@festu.khv.ru

Для сепарации наночастиц по размерам обычно используют центрифугирование. Этот метод требует достаточно сложного и дорогого оборудования. Мы предлагаем использовать силы светового давления для седиментации наночастиц в жидкости. Данные силы имеют достаточно большую величину, обеспечивающую скорость осаждения сравнимую с центрифужными методами. Рассматривается теоретическая модель разделения наночастиц по размерам при помощи лазерного воздействия в жидкой среде. Получено точное решение одномерной нестационарной задачи светоиндуцированного массопереноса. Показано, что скорость светоиндуцированного осаждения характеризуется резкой зависимостью (как радиус в 5-й степени) от радиуса частицы, что может позволить эффективно разделять полидисперсные смеси. Предложенный метод сепарации наночастиц актуален при исследовании дисперсных жидкофазных сред, а также для оптической диагностики таких сред.

Ключевые слова: седиментация, электрострикция, дисперсная среда

OPTICAL SEDIMENTATION OF THE POLYDISPERSE MIXTURES

Ivanova G.D., Khe V.K., Ivanov V.I.

Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, e-mail: tmeh@festu.khv.ru

A centrifugation is used usually for separation of nanoparticles in size. This method requires a fairly complex and expensive equipment. We suggest using of a light pressure force for sedimentation of nanoparticles in a liquid. These light forces are of sufficiently value, providing the speed comparable to ones in the centrifugal methods. We have discussed the theoretical model of separation of nanoparticles in size by using the laser effect in liquid. It was received the exact solution of one-dimensional task of the light induced mass transfer. It is shown that the rate of deposition is characterized by abrupt dependence (as the radius in 5-th degree) of the radius of the particles that can allow to effectively divide polydisperse mixes. The proposed method of separation of nanoparticles is relevant in the study of dispersed liquid-phase media, as well as in the optical diagnostics such materials.

Keywords: sedimentation, electrostriction, disperse medium

В промышленности и научно-прикладных исследованиях физико-химических свойств жидких и газообразных сред используют разные способы разделения смешанных объёмов разнородных частиц (смеси, жидкости разной плотности, эмульсии, твёрдые материалы, взвеси, твёрдые частицы или капельки в газе) в зависимости от размеров исследуемых веществ либо осаждение в гравитационном поле, либо центрифугирование [1].

В гравитационном поле осаждаются способны только достаточно крупные частицы, не подверженные тепловому (броуновскому) движению. Установившаяся скорость осаждения частиц зависит от массы, размера и формы частиц, вязкости и плотности среды. При этом, чем больше масса и размеры частиц, тем больше скорость оседания. Для более мелких частиц, например, молекул природных и синтетических полимеров, обычно используют центрифугирование. Сепараторы, работающие на основе выше приведенных способов, имеют достаточно громоздкие (крупногабаритные) по исполнению конструкции.

Данная работа посвящена модели сепарации наночастиц световым полем, являющейся альтернативной выше приведенным

методам, позволяющей создавать компактные сепараторы мелких частиц.

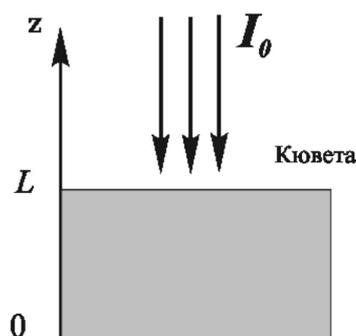


Рис. 1. Схема оптической сепарации наночастиц

Рассмотрим прозрачную наносuspension, освещаемую потоком лазерного излучения с однородным распределением интенсивности (рис. 1). На наночастицу действует сила светового давления:

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

где I_0 – 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, $\mu = (6\pi\eta a)^{-1}$ – коэффициент подвижности частиц, η – вязкость жидкости, a – радиус частицы, λ – длина волны излучения, c_0 – скорость света.

Индукированное световое давление приводит к изменению концентрации ча-

стиц, описываемой следующим уравнением [2]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D\nabla^2 C - \text{div}(\vec{V}C), \quad (4)$$

где скорость частицы $\vec{V} = \mu \vec{F}_p$, $C(z, t)$ – массовая концентрация дисперсных частиц, D – коэффициент диффузии. В одномерном случае скорость наночастиц в жидкой среде удобно представить в виде $V = \gamma I_0$, где

$$\gamma = \left(64\pi^2 n_1 (m^2 - 1)(m^2 + 2)^{-1} \right) / (9c_0 \lambda^4 \eta).$$

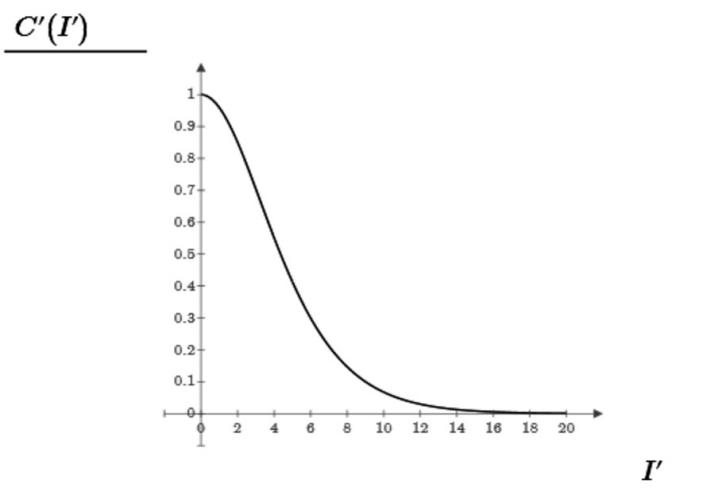


Рис. 2. Зависимость концентрации наночастиц на полувысоте кюветы от интенсивности излучения (в отн. ед.)

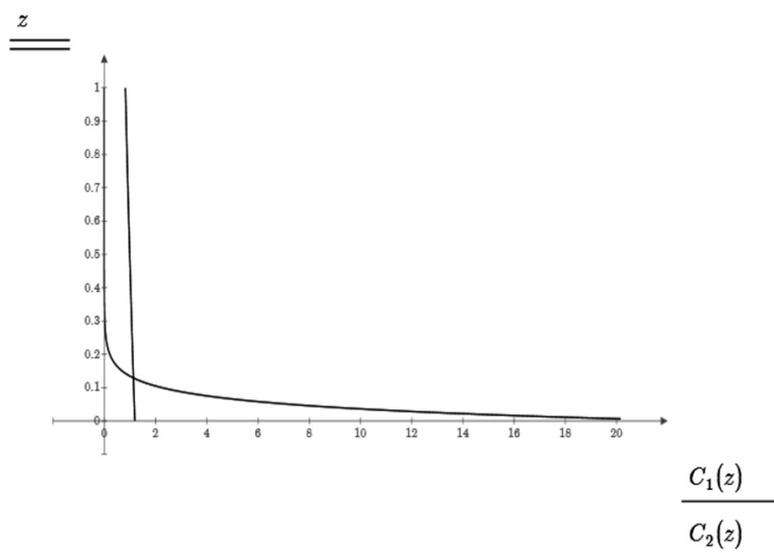


Рис. 3. Зависимость относительной концентрации наночастиц в световом поле от высоты для двух наносuspензий, радиусы частиц в которых отличаются в 2 раза

Решение уравнения (4) на участке $z \in [0, l]$ с учетом отсутствия потока частиц на верхней и нижней границах [3]:

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

где C_0 – начальная концентрация наночастиц, $u = Vl/D$, l – высота кюветы, $t' = Dt/l^2$, $z' = z/l$. Как показывает анализ этого выражения установление равновесия фактически происходит уже при $t' = 1$ (для $u = 3$).

В стационарном режиме выражение (5) можно представить в виде зависимости концентрации частиц от интенсивности излучения и высоты:

$$C(z', I_0) = \gamma l D^{-1} C_0 I_0 \frac{\exp(\gamma l z' I_0)}{(\exp(\gamma l I_0 / D) - 1)}. \quad (6)$$

На рис. 2 показана расчетная зависимость концентрации наночастиц на полувысоте кюветы от интенсивности излучения в стационарном режиме.

На рис. 3 показана зависимость относительной концентрации наночастиц в световом поле от высоты для двух наносuspензий, радиусы частиц в которых отличаются в 2 раза.

Видно, что для частиц с меньшим радиусом концентрация C_2 практически не отличается от первоначальной, в то время как для больших частиц C_1 резко падает с высотой.

Это связано с резкой зависимостью (как радиус в 5-й степени) скорости осаждения от радиуса частицы, что, как мы считаем, может позволить значительно более эффективно разделять полидисперсные смеси.

Выводы

Таким образом, в работе получено точное решение одномерной нестационарной задачи светоиндуцированного массопереноса. Показано, что скорость светоиндуцированного осаждения характеризуется резкой зависимостью (как радиус в 5-й степени) от радиуса частицы, что может позволить эффективно разделять полидисперс-

ные смеси. Предложенный метод сепарации наночастиц актуален при исследовании дисперсных жидкофазных сред, а также для оптической диагностики таких сред [4-8], как альтернативный методу центрифугирования.

Список литературы

1. Рафиков С.Р. Методы определения молекулярных весов и полидисперсности высокомолекулярных соединений / С.Р. Рафиков, С.А. Павлова, И.И. Твердохлебова. – М., 1963. – 174 с.
2. Иванов В.И. Термолинзовая спектроскопия жидкофазных двухкомпонентных сред / В.И. Иванов, Г.Д. Иванова, В.К. Хе // Вестник ТОГУ. – 2011. – № 4. – С. 43–46.
3. Иванов В.И. Электрострикционный механизм самовоздействия излучения в жидкости с наночастицами / В.И. Иванов, А.И. Ливашвили, К.Н. Окишев // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Физика. – 2009. – Т. 4. – № 2. – С. 58–60.
4. Иванов В.И. Оптическая левитация наночастиц: монография / В.И. Иванов, А.А. Кузин, К.Н. Окишев. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2008. – 105 с.
5. Крылов В.И. Метод светоиндуцированной псевдо-призмы в наножидкости / В.И. Крылов, Г.Д. Иванова, В.К. Хе // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов, межвуз. сб. науч. тр. / под общей редакцией В. М. Самсонова, Н.Ю. Слобнякова. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2015. – Вып. 5. – С. 329–334.
6. Иванов В.И. Оптическая диагностика полимерных наночастиц / В.И. Иванов, Г.Д. Иванова, В.К. Хе // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 11–6. – С. 1085–1088.
7. Иванова Г.Д. Светоиндуцированная псевдо-призма в наножидкости / Г.Д. Иванова, В.К. Хе // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2.
8. Иванова Г.Д. Нелинейная линза в дисперсной среде / Г.Д. Иванова, С.И. Кирюшина, А.В. Мяготин // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1.
9. Иванов В.И. Самовоздействие гауссова пучка излучения в слое жидкофазной микрогетерогенной среды / В.И. Иванов, А.И. Ливашвили // Оптика атмосферы и океана. – 2009. – Том 22. – № 8. – С. 751–752.
10. Иванов В.И. Динамика светоиндуцированной тепловой линзы в жидкофазной двухкомпонентной среде // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. – 2011. – Т. 4. – № 134. – С. 44–46.