

XXII региональная научная конференция
«Физика: фундаментальные и прикладные исследования, образование»

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДА ЛАЗЕРНОЙ СЕПАРАЦИИ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ

С.А. Пячин, В.И. Иванов, В.М. Петкевич

Дальневосточный государственный университет путей сообщения

Хабаровск 2024

ПРИНЦИП МЕТОДА ЛАЗЕРНОГО ПИНЦЕТА

Сила рассеяния Релея

$$F_{\text{scatt}} = \frac{I_0 \sigma n_m}{c}, \quad \sigma = \frac{128\pi^5 a^6}{3\lambda^4} \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)^2$$

c – скорость света;

a – радиус частицы;

σ – поперечное сечение рассеяния сферы;

λ – длина волны излучения лазера.

Градиентная сила

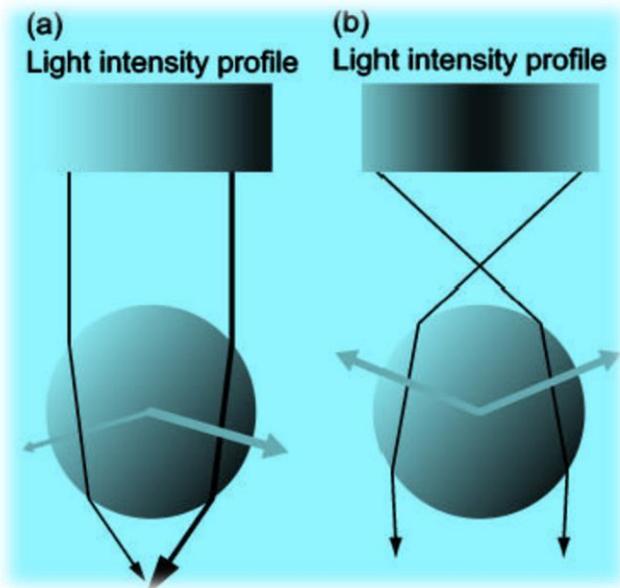
$$F_{\text{grad}} = \frac{2\pi\alpha}{cn_m^2} \nabla I_0, \quad \alpha = n_m^2 a^3 \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)$$

α – поляризуемость сферы;

n_m – коэффициент преломления среды;

I_0 – интенсивность излучения на частице;

m – отношение показателя преломления частицы к показателю преломления среды



(a) Прозрачный шарик освещается параллельным пучком света с градиентом интенсивности, увеличивающимся слева направо. Два луча света разной интенсивности проходят через шарик. Преломление лучей шариком изменяет импульс фотонов, равный изменению направления входного и выходного лучей. Закон сохранения импульса требует, чтобы импульс шарика изменялся на равную, но противоположную величину, что приводит к возникновению сил, изображенных серыми стрелками. Суммарная сила, действующая на шарик, находится справа, в направлении градиента интенсивности. (b) При освещении шарика сфокусированным лучом света с радиальным градиентом интенсивности изменение импульса приводит к возникновению суммарной силы, направленной к фокусу. Серые стрелки обозначают силы. Боковые силы уравниваются друг друга, а осевая сила уравнивается рассеивающей силой, которая уменьшается по мере удаления от фокуса.

Neuman K. C., Block S. M. Optical trapping // Review of Scientific Instruments. – 2004. Vol. 75. P. 2787–2809.

Минин, И.В. Оптические и акустические ловушки / И.В. Минин, О.В. Минин. // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22. – № 3. – С. 194-214. – **2**

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОСАЖДЕНИЯ ЧАСТИЦ В СУСПЕНЗИЯХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛ ОПТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

СВЕТОИНДУЦИРОВАННАЯ ЛИНЗА В ПРОЗРАЧНОЙ ПЛОТНОЙ НАНОСУСПЕНЗИИ

Иванова Г.Д., Мяготин А.В., Иванов В.И.

[Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов](#). 2019. № 11. С. 590-595.

LIGHT-INDUCED SEDIMENTATION IN NANOLIQUIDS

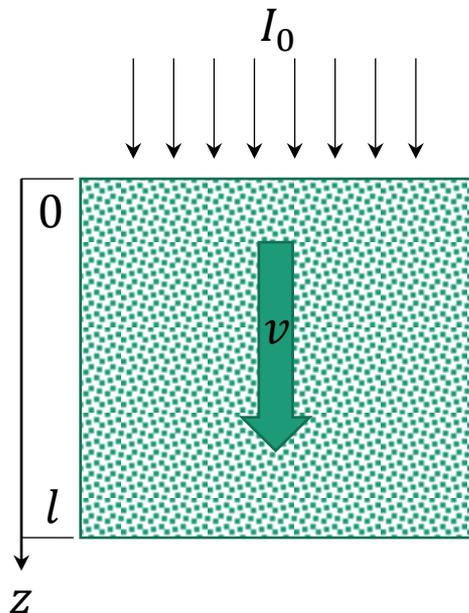
Ivanova G., Khe V., Ivanov V.

В сборнике: Journal of Physics: Conference Series. 2018. С. 032086.

SEDIMENTATION OF PARTICLES BY THE LIGHT PRESSURE IN NANOSUSPENSION

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

Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 2017. Т. 10466. С. 104664.



$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - v \frac{\partial C}{\partial z}$$

где $D = \frac{k_B T}{6\pi a \eta}$ – коэффициент диффузии; k_B – постоянная Больцмана; T – температура дисперсионной среды.

$$\text{при } t = 0 \quad C = C_0$$

$$\text{при } z = 0 \text{ и } z = l \quad \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{v}{D} C$$

СКОРОСТЬ ЧАСТИЦ

Скорость осаждения частицы в вязкой жидкости в поле действия гравитации

$$v' = \frac{2(\rho_2 - \rho_1)ga^2}{9\eta}$$

Скорость светоиндуцированного перемещения частиц

$$v'' = \mu F$$

$$\mu = \frac{1}{6\pi a\eta}$$

$$F = AI_0$$

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

$$v = \frac{64}{9} \frac{a^5 \pi^4 n_1 (n_2^2 - n_1^2)^2}{\eta c \lambda^4 (n_2^2 + 2n_1^2)^2} I_0$$

a - радиус наночастиц, η - вязкость жидкости, λ - длина волны излучения, n_1 и n_2 - показатели преломления дисперсионной и дисперсной среды соответственно, c - скорость света

РЕШЕНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО УРАВНЕНИЯ

$$C_a(z, t) = C_0 f(a) \frac{vl}{D} \left[\frac{\exp\left(\frac{vz}{D}\right)}{\exp\left(\frac{vl}{D}\right) - 1} + \exp\left(\frac{vz}{2D}\right) \sum_{m=1}^{\infty} C_m(z, t) \right]$$

$$C_m(z, t) = \frac{2(m\pi)^2 \left(1 - (-1)^m e^{-\frac{vl}{2D}}\right)}{\left(k^2\pi^2 + \left(\frac{vl}{2D}\right)^2\right)^2} \left(\frac{vl}{2m\pi D} \sin \frac{m\pi z}{l} + \cos \frac{m\pi z}{l} \right) \exp\left(-\left(m^2\pi^2 + \left(\frac{vl}{2D}\right)^2\right) \frac{Dt}{l^2}\right)$$

ОСАЖДЕНИЕ НАНОЧАСТИЦ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛ СВЕТОВОГО ДАВЛЕНИЯ В ЖИДКИХ СРЕДАХ

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

[Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов](#). 2018. № 10. С. 286-290.

РЕШЕНИЕ СТАЦИОНАРНОГО УРАВНЕНИЯ

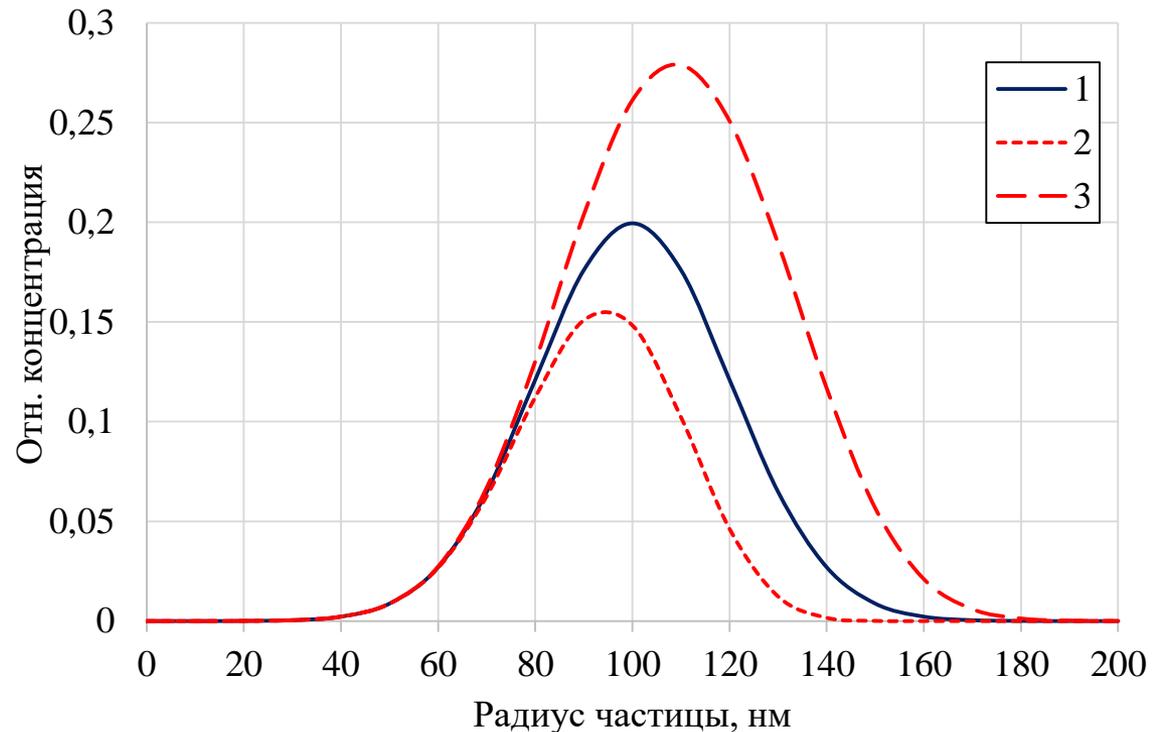
$$C_a(z, t) = C_0 f(a) \frac{vl}{D} \frac{\exp\left(\frac{vz}{D}\right)}{\exp\left(\frac{vl}{D}\right) - 1}$$

I. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСАЖДЕНИЕ

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТИЦ ПО РАЗМЕРАМ НА РАЗНЫХ ГЛУБИНАХ

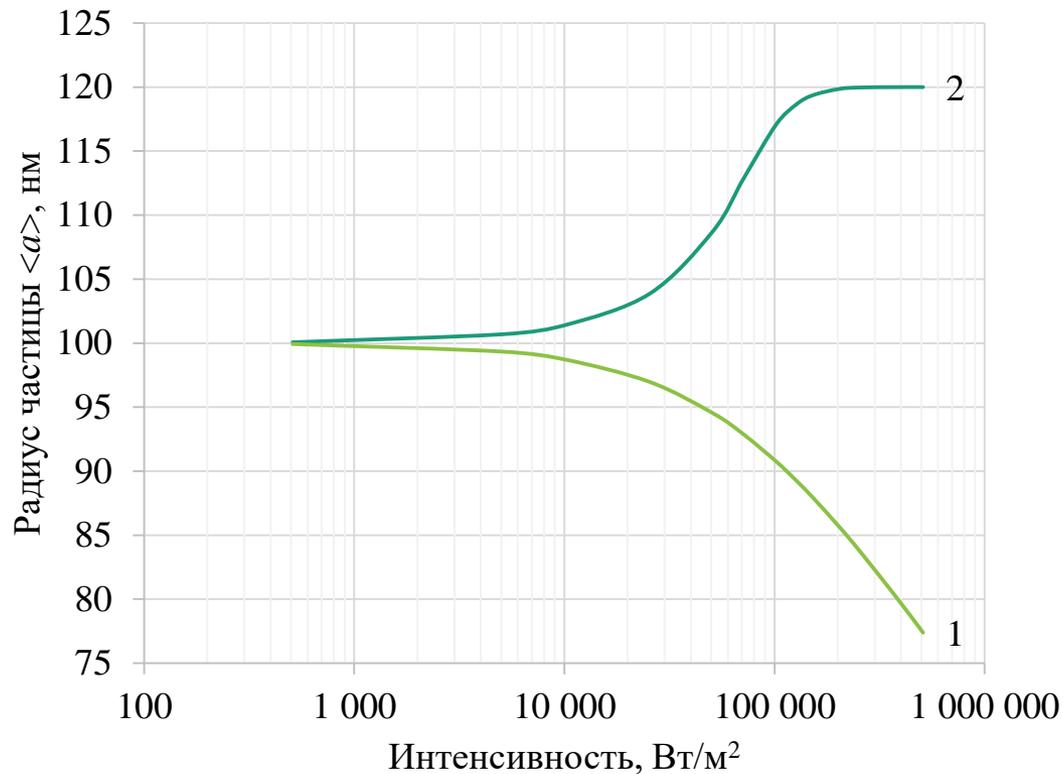
$$f(a) = \frac{\gamma}{\sigma} e^{-\frac{(a-\bar{a})^2}{2\sigma^2}}$$

где \bar{a} – размер частиц с максимальной концентрацией в начальном состоянии;
 σ^2 – дисперсия распределения;
 γ – коэффициент, определяемый из условия нормировки



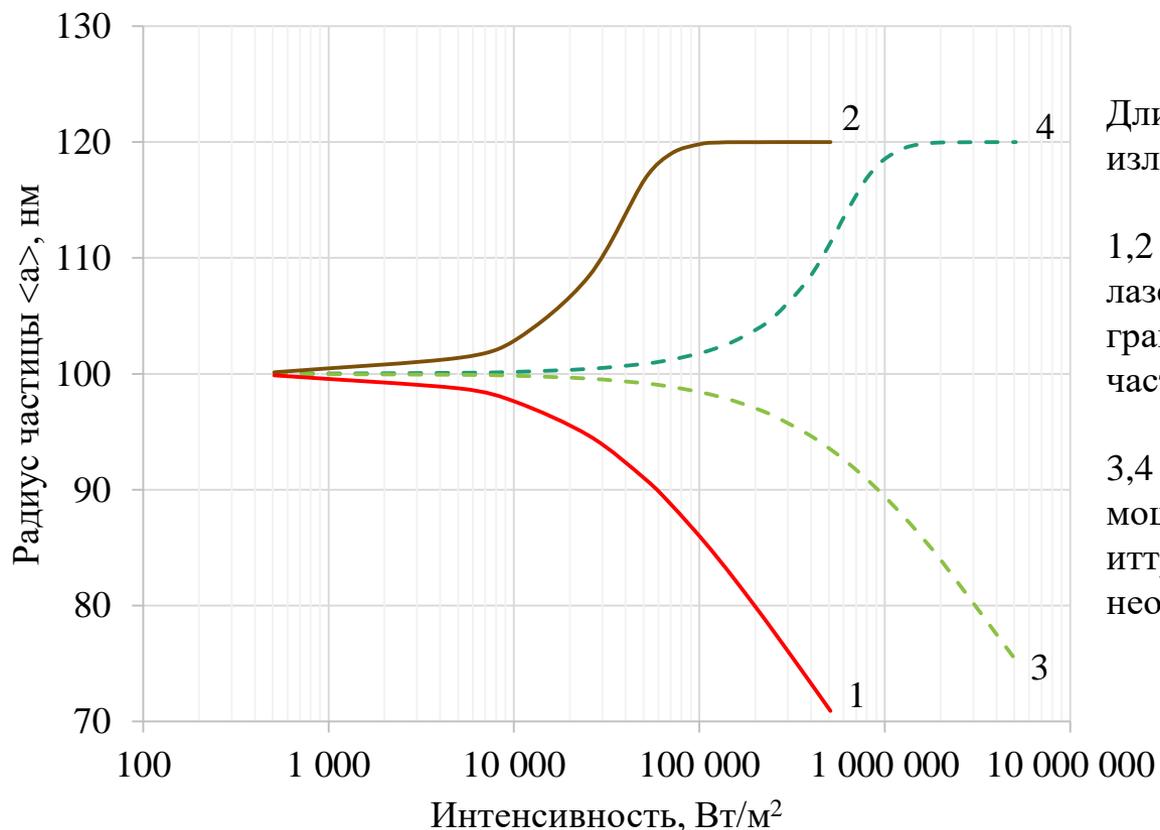
Графические изображения зависимостей: 1 – начальное распределение частиц по размерам $f(a)$; 2 – относительная концентрация частиц χ_0 вблизи облучаемой поверхности; 3 – относительная концентрация частиц на дне кюветы χ_l . Интенсивность лазерного излучения $I_0 = 5 \cdot 10^4$ Вт/м². $\lambda = 632$ нм.

ИЗМЕНЕНИЕ РАЗМЕРА ЧАСТИЦ С МАКСИМАЛЬНОЙ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ



Влияние интенсивности лазерного излучения на радиус частиц $\langle a \rangle$, обладающих максимумом концентрации (1) наверху ($z = 0$) и (2) на дне кюветы ($z = l$). $\lambda = 632$ нм.

ИЗМЕНЕНИЕ РАЗМЕРА ЧАСТИЦ С МАКСИМАЛЬНОЙ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ



Длина волны лазерного излучения:

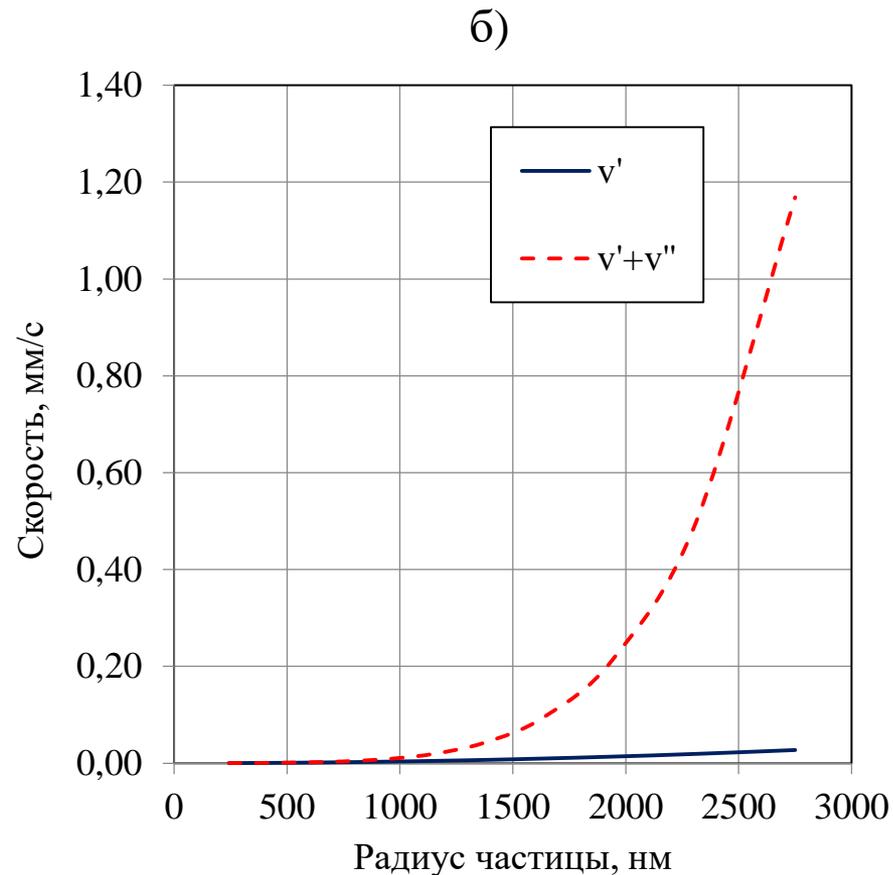
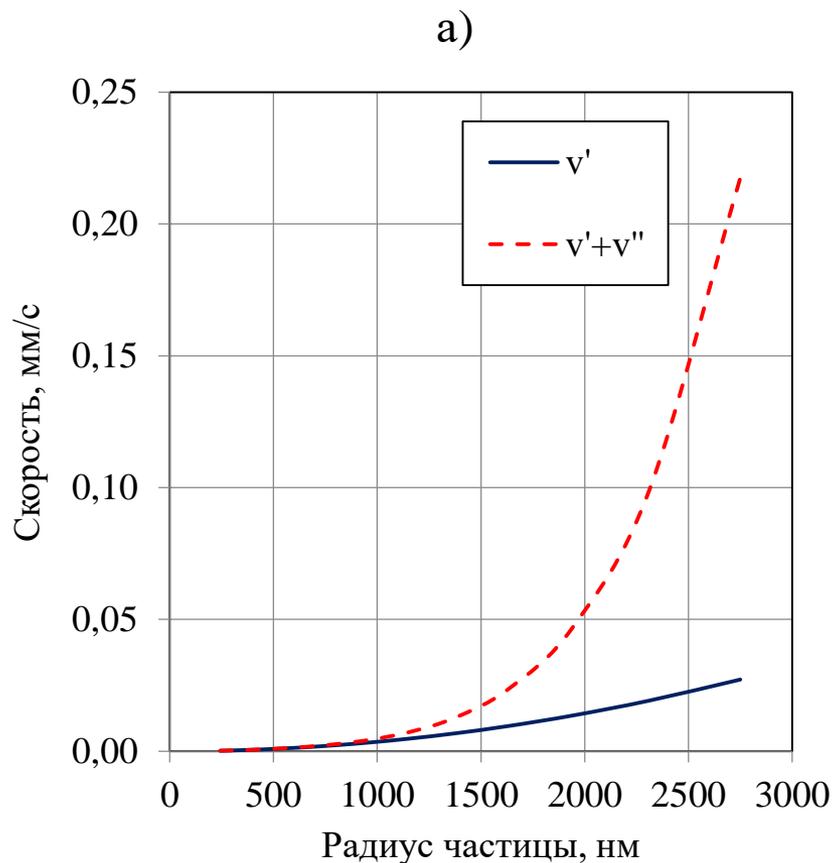
1,2 – $\lambda = 532$ нм (твердотельный лазер на иттрий-алюминиевом гранате с неодимом утроенной частоты (FD:YAG));

3,4 – $\lambda = 1064$ нм (инфракрасный мощный твердотельный лазер на иттрий-алюминиевом гранате с неодимом (ND:YAG))

Радиус частиц $\langle a \rangle$, обладающих наибольшей концентрации (1,3) наверху ($z = 0$) и (2,4) на дне кюветы ($z = l$) в зависимости от интенсивности светового потока.

II. СРАВНЕНИЕ С ОБЫЧНОЙ СЕДИМЕНТАЦИЕЙ

СРАВНЕНИЕ СКОРОСТЕЙ ЧАСТИЦ



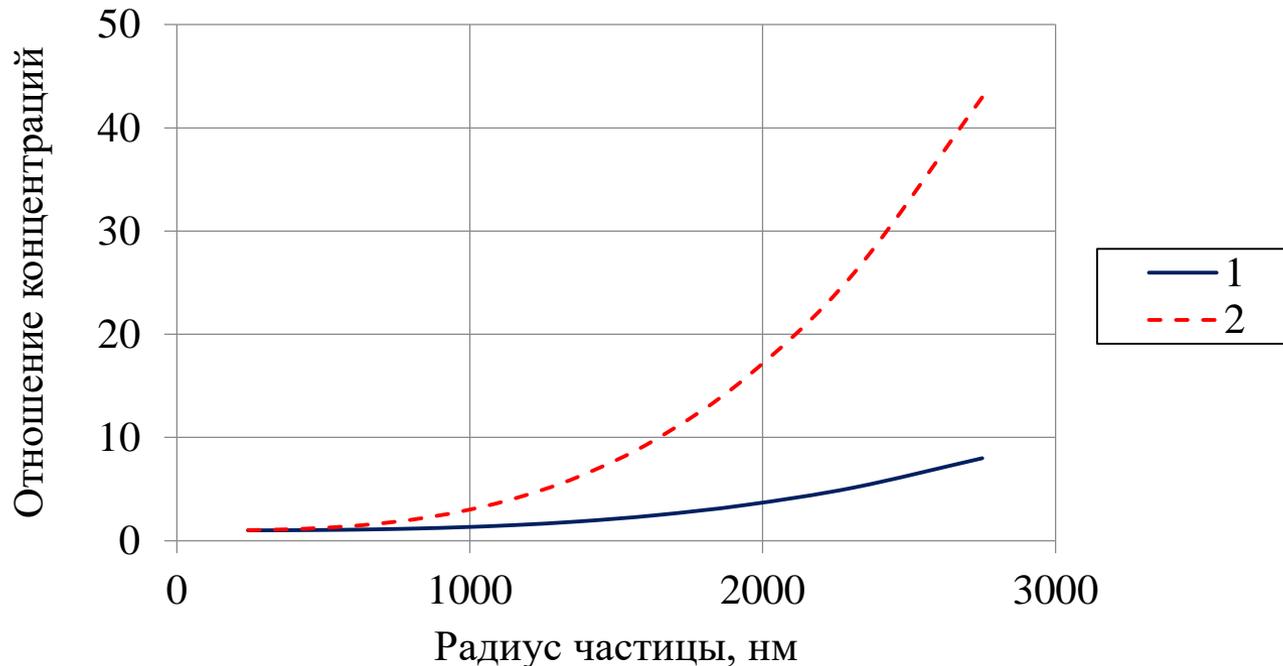
Скорости движения частиц под действием силы гравитации v' , а также силы светового давления $v'+v''$. Интенсивность лазерного излучения:

а) $I_0 = 2,6 \text{ кВт/м}^2$; б) $I_0 = 15,3 \text{ кВт/м}^2$.

КОНЦЕНТРАЦИЯ ЧАСТИЦ ВОЗЛЕ ДНА КЮВЕТЫ

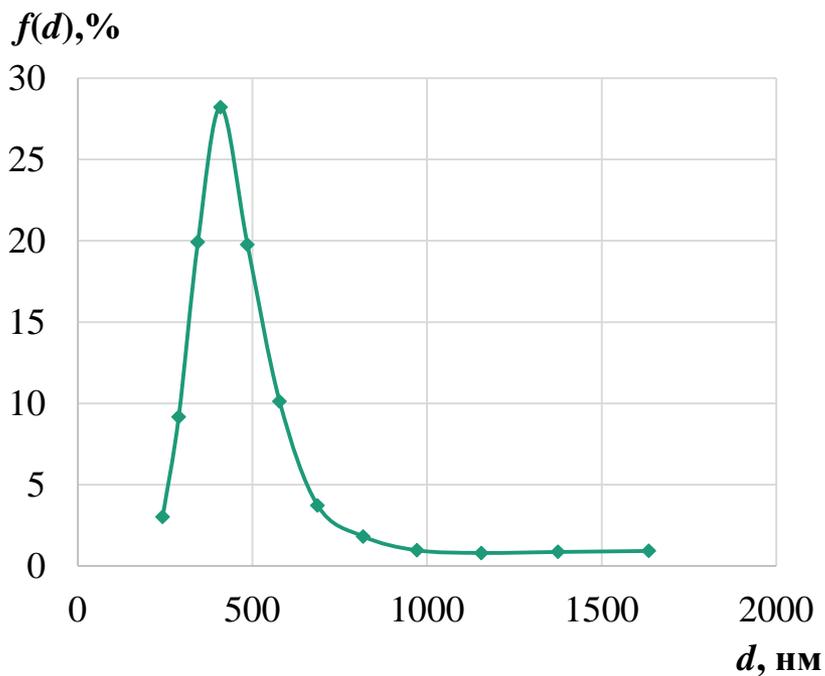
$$\chi = \frac{v'' \exp\left(\frac{v''z}{D}\right) \left(\exp\left(\frac{v'l}{D}\right) - 1\right)}{v' \exp\left(\frac{v'z}{D}\right) \left(\exp\left(\frac{v'l}{D}\right) - 1\right)}$$

Для области, близкой ко дну кюветы ($z \approx l$)

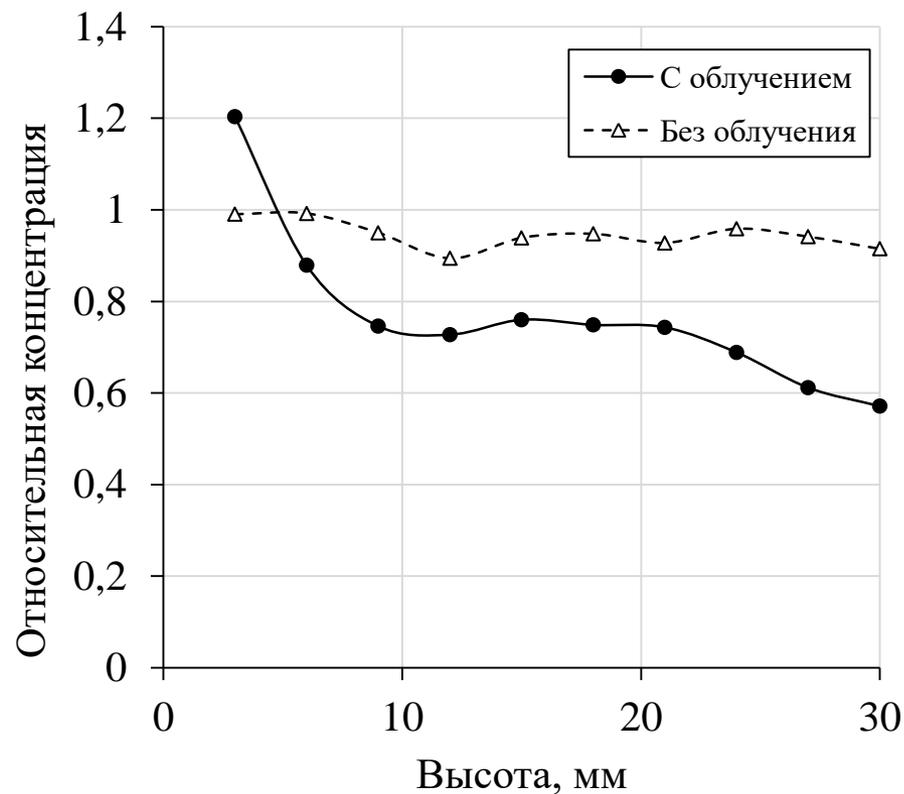


Отношение концентраций осажденных частиц при обычной светоиндуцированной седиментации в установившемся режиме в зависимости от радиуса частиц. Интенсивность лазерного излучения: 1 – $I_0 = 2,6$ кВт/м²; 2 – $I_0 = 15,3$ кВт/м².

III. НЕКОТОРЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ



Распределение частиц SiO_2 по размерам



Изменение относительной концентрации частиц на разных высотах после воздействия лазерного потока в течение 50 минут

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- 1) Максимум относительной концентрации частиц в жидкости вблизи облучаемой поверхности смещается в сторону более мелких частиц, а на дне кюветы – в сторону более крупных. Величина смещения этого максимума возрастает с увеличением интенсивности лазерного излучения.
- 2) Существует пороговое значение интенсивности излучения, при превышении которого средний радиус осаждаемых частиц перестает увеличиваться. Чем шире нормальное распределение по размерам, тем больше средний радиус частиц вблизи дна кюветы.
- 3) Использование лазерных источников с меньшей длиной волны излучения имеет преимущество, поскольку позволяет добиться эффекта разделения частиц в суспензии при меньших значениях плотности светового потока.
- 4) Таким образом, оценки показывают, что рассматриваемый метод может быть использован для сепарации частиц в полидисперсных системах, однако есть ограничения по размерам. Для частиц радиусом менее 500 нм существенного преимущества применения сил светового давления вряд ли удастся добиться.

Работа выполнена в рамках Соглашения о предоставлении из краевого бюджета грантов в форме субсидий № 98С/2024 от 28 июня 2024 г.

Спасибо за внимание!

