УДК 535.214; 544.77

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДА ЛАЗЕРНОЙ СЕПАРАЦИИ**

**ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ**

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

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск

E-mail: [pyachin@mail.ru](mailto:pyachin@mail.ru)

*В работе представлены результаты анализа эффективности метода разделения крупных частиц от мелких в жидкости, которая облучается лазерным потоком. Метод основан на сильном различии скорости движения частиц в зависимости от их размеров в условиях действия силы светового давления, которое приводит к ускоренному осаждению более крупных частиц. Проведено сравнение седиментации частиц в вязкой жидкости с учетом гравитационного поля. На примере диоксида кремния показано, что эффективность светоиндуцированной сепарации проявляется преимущественно для частиц радиусом более 0,5 мкм, поэтому метод лазерной сепарации имеет ограничения по применению.*

В нанотехнологических операциях часто возникает необходимость контролируемого перемещения частиц, например для адресной доставки, сборки конструкций или разделения смесей. Применяемые способы манипуляций нанобъектами весьма разнообразны и основаны на воздействии внешних полей различной физической природы [1]. Среди них лазерные методы обладают рядом преимуществ: дистанционным воздействием, простотой управления положением луча, широким диапазоном по энергетическим параметрам [2]. Возникающие в области лазерного облучения физические явления, такие как световое давление, градиентные силовые поля, электрокалорический эффект, фотофорез, тепловой нагрев и т.п., сопровождаются образованием тепловых потоков и переносом вещества. Известные экспериментальные работы по светоиндуцированному дрейфу наночастиц интерпретируются в рамках какого-либо одного преобладающего эффекта [3, 4]. В случае прозрачной среды преобладающим является световое давление или градиентные силы. Для поглощающих сред главным эффектом считается термодиффузия.

Особый интерес представляет разработка метода лазерной сепарации частиц в полидисперсных системах, основанный на эффекте различия скоростей движения частиц в жидкостях в условиях облучения лазерном потоком в зависимости от их размеров. Это позволяет отделять более крупные частицы от мелких. Математическая модель разделения наночастиц по размерам при освещении прозрачной суспензии потоком лазерного излучения подробно описана в работе [5]. Из точного решения нестационарной задачи фотоиндуцированного массопереноса в дисперсной системе вытекает, что изменение концентрации, стимулированной светом, определяется резкопадающей зависимостью скорости перемещения от радиуса частицы. Однако в данной статье не было учтено естественное движение частиц в поле гравитации Земли при осаждении в жидкости. Цель данных исследований заключалась в сравнении процессов массопереноса частиц в жидкости под действием гравитационной силы и дополнительной силы светового давления, а также установлении эффективности светоиндуцированной сепарации и границ его применения.

Изменение объемной концентрации частиц *C*(*z*,*t*) в такой суспензии можно определить на основе решения одномерного диффузионного уравнения с учетом дополнительного потока, возникающего под действием сил светового давления,

. (1)

где *v* – скорость равномерного движения частиц; *D* – коэффициент диффузии.

Начальные условия определены из исходного равномерного распределения частиц во всем объеме жидкости

*С*(*z*,0) = *C*0.

Краевые условия заданы уравнением

Скорость осаждения частицы в вязкой жидкости в поле действия только гравитации можно найти согласно выражению

(2)

где *ρ*1 и *ρ*2 – плотности жидкости и материала частицы соответственно; *g* – ускорение свободного падения; *η* – вязкость жидкости.

Коэффициент диффузии частицы определяется вязкостью жидкости *η*, температурой среды *Т* и радиусом частиц *a*. Его можно вычислить на основе соотношения Эйнштейна как

, (3)

где *k* – постоянная Больцмана. Для упрощения предполагаем, что частицы при движении в жидкости не взаимодействуют друг с другом.

Если на дисперсную систему действует лазерное излучение таким образом, что сила светового давления сонаправлена с силой тяжести, то скорость перемещения частиц будет больше

, (4)

где – скорость светоиндуцированного перемещения частиц, которая зависит от длины волны *λ* и интенсивности лазерного излучения *I*0, скорости света *с*, показателей преломления дисперсионной и дисперсной среды *n*1 и *n*2 соответственно [6].

Все реальные дисперсные системы имеют разброс по размерам частиц, которые можно описать функцией распределения *f*(*r*). Для примера, на рис. 1 показана плотность распределения частиц кварца, полученных методом механического измельчения, в зависимости от их радиуса. Как видно, наблюдается широкий разброс частиц по размерам, но радиусы большинства из них лежат в диапазоне от 200 до 700 нм. Наибольшее количество частиц имеют радиус около 400 нм.

*Рис. 1.* Плотность распределения частиц SiO2 в зависимости от их радиуса

С учетом функции распределения частиц по размерам решение уравнения, приведенного в статье [5], следует выразить как

, (5)

где

Вычисления скоростей движения частиц кварца в воде согласно формулам (2) и (4) были выполнены для следующих параметров: диаметр луча – 5 мм; интенсивность *I*0 = 2,6 кВт/м2 при мощности лазера 50 мВт и интенсивность *I*0 = 15,3 кВт/м2 при мощности лазера 300 мВт; длина волны лазера *λ* = 532 нм (лазер LSR532NL-300), вязкость *η* = 1 мПа⋅с, *T* = 298 К, *n*1 = 1,33, *n*2 = 1,56, *ρ*1 = 1000 кг/м3 и *ρ*2 = 2650 кг/м3. Высота кюветы *l* = 30 мм. Результаты расчетов скоростей под действием сил гравитации и светового давления показаны на рис. 2. Видно, что особое отличие в значениях *v*’ и *v*’’ начинается для частиц, радиус которых превышает 1 мкм. Скорость частиц радиусом 2 мкм при лазерном облучении суспензии в 3,5 раз превышает скорость осаждении для обычной седиментации при плотности светового потока 2,6 кВт/м2 и в 16 раз при 15,3 кВт/м2 соответственно.

а)

б)

*Рис. 2.* Скорости движения частиц под действием сил гравитации *v*’, а также дополнительных сил светового давления *v*’+*v*’’. Интенсивность лазерного излучения:

а) *I*0 = 2,6 кВт/м2; б) *I*0 = 15,3 кВт/м2.

Проведенные оценочные расчеты показывают, что количество осажденных частиц на дне кюветы в установившемся режиме будет зависеть как от размеров частиц, так и интенсивности лазерного облучения. Используя выражение (5), можно оценить отношение объемных концентраций частиц для светоиндуцированной и обычной седиментации

Для области, близкой ко дну кюветы, с учетом, что , получаем

На рис. 3 показаны значения коэффициента *χ* для разных интенсивностей облучения. Видно, что сила светового давления позволяет повысить количество осажденных частиц радиусом более 500 нм. С ростом плотности светового потока эффективность осаждения более крупных частиц повышается более чем в 40 раз.

*Рис. 3*. Отношение концентраций осажденных частиц при светоиндуцированной и обычной 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.

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. Кроме того, в математической модели (1) не учитываются различные физические явления, которые могут возникать при облучении суспензии лазерным излучением. К таким явлениям можно отнести поглощение света средой с последующим тепловыделением, образование конвективных потоков из-за неравномерного нагрева, нелинейность диффузионных и теплофизических параметров веществ. Если интенсивность лазерного излучения будет слишком высока, то это будет приводить к кипению жидкости. Все эти факторы требуют учета и будут оказывать снижающее влияние на эффективность метода. Данные обстоятельства подтверждают результаты предварительных экспериментов [7], которые показали, что лазерное облучение суспензии в течение 1 часа приводит к повышению концентрация всех частиц на дне кюветы только в 1,2 раза по сравнению с режимом осаждения без светового воздействия. Это гораздо меньше оценочных значений.

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

**Л И Т Е Р А Т У Р А**

1. Евстрапов, А. А. Физические методы управления движением и разделением микрочастиц в жидких средах. I. диэлектрофорез, фотофорез, оптофорез, оптический пинцет / А.А. Евстрапов // Научное приборостроение. 2005. Т. 15. №. 1. С. 3–20.
2. Optical trapping with structured light: a review / Y. Yang, Y.-X. Ren, M. Chen, Y. Arita, C. Rosales-Guzmáne // Advanced Photonics. 2021. V. 3 (3). P. 034001–1–40.
3. 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.
4. Иванов, В. И. Сепарация частиц в полидисперсной наносуспензии в поле лазерного излучения / В. И. Иванов, С. А. Пячин // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2021. Вып. 13. С. 146–155.
5. 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. № 10. C. 286–290.
6. Хюлст Г. ван де. Рассеяние света малыми частицами. М.: Издательство иностранной литературы, 1961. 536 с.
7. Касьянов, И. А. Влияние лазерного облучения на седиментацию частиц в жидких средах / И. А. Касьянов, В. М. Петкевич, С. А. Пячин // В сборнике: Физика: фундаментальные и прикладные исследования, образование. Материалы XXI региональной научной конференции. Благовещенск, 2023. С. 168-172.