

УДК 53.087, 538.93

СВЕТОКАПИЛЛЯРНЫЙ МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ПУЗЫРЬКОВЫХ КЛАСТЕРОВ

Кузин А.А., Иванова Г.Д., Кирюшина С.И., Мяготин А.В.

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

Экспериментально исследован светоиндуцированный механизм образования пузырьковых кластеров в жидкофазной среде. В почти горизонтальной закрытой кювете (угол отклонения от горизонтали не более 20°) происходит накопление пузырьков в кластер. Форма и размеры кластера соответствуют модовой структуре лазерного пятна. Природа явления основана на существовании термокапиллярных сил, втягивающих пузырьки в нагретую область, а также адгезионных сил. В случае свободной поверхности жидкости также образуются светоиндуцированные пузырьковые кластеры. Зафиксирована динамика образования упорядоченных кластеров на поверхности жидкости в световом пучке. Показано, что наличие неоднородного нагрева излучением, эффективного взаимодействия пузырьков друг с другом (в случае свободной поверхности) и с поверхностью твердого тела (для закрытой кюветы) может приводить к образованию устойчивых пузырьковых кластеров в условиях развитой конвекции.

Ключевые слова: массоперенос в бинарных средах, термокапиллярный дрейф микрочастиц, пузырьковый кластер, светоиндуцированная конвекция

THE LIGHT INDUCED MECHANISM OF THE BUBBLE CLUSTERS FORMATION

Kuzin A.A., Ivanova G.D., Kiryushina S.I., Myagotin A.V.

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

The light induced mechanism of bubble clusters formation has been investigated experimentally. It was detected the accumulation of bubbles in the cluster in the light field in almost horizontal closed cell (the horizontal skew angle was not more than 20°). The shape and dimensions of the cluster match the mode structure of the laser spot. The nature of the phenomenon is based on the existence of the thermocapillary forces, which push a suspension of bubbles in a heated area, as well as there are the adhesion forces. The light induced bubble clusters are formed in the case of free-surface liquids also. The dynamical bubble cluster foundation is described on the liquid surface. It is shown that the presence of inhomogeneous heat radiation, effective interaction of bubbles with each other (in the case of free surface) and with the surface of a solid body (closed cells) may lead to the formation of stable bubble clusters at the developed convection.

Keywords: mass transport in the binary media, microparticle thermocapillary drift, bubble cluster, light induced convection

Исследование светоиндуцированных процессов тепло- и массопереноса в жидкофазных средах имеет важное значение для передовых микроэлектронных технологий, биомедицинских приложений, а также для различных областей науки и техники [1–15]. Однако на эффекты массопереноса может оказывать значительное и трудно контролируемое влияние термоиндуцированная конвекция. Возникновение конвективных течений в жидкости может быть обусловлено как наличием температурного градиента на поверхности (термокапиллярная конвекция), так и наличием градиента концентрации ПАВ (концентрационно-капиллярная конвекция). При наличии конвекции процессы массопереноса в гетерофазных жидкостях в неоднородном тепловом поле могут приводить к образованию упорядоченных динамических структур [1–5]. Такие процессы представляют особый интерес для реализации разнообразных технологических приемов самосборки или самоорганизации.

Цель исследования. В данной работе исследован термокапиллярный механизм пузырькового кластерообразования в жидкофазной среде в условиях развитой конвекции с использованием комплексной экспериментальной методики, включающей термографический метод.

В экспериментальной установке использовались источники лазерного излучения различного спектрального состава, малогабаритная IP видекамера AVIOSYS AK9060 и термограф.

В экспериментах по взаимодействию излучения непрерывного CO_2 -лазера (мощность излучения $P_{\text{изл}} = 6$ Вт, длина волны $\lambda_{\text{ген}} = 10$ мкм) с органическими жидкостями было обнаружено, что всплывающие под действием архимедовой силы пузырьки газа могут левитировать в области лазерного пятна. При этом поднимающийся пузырек «застраивает» в области, которая нагревается излучением, несмотря на развитую тепловую конвекцию жидкости в вертикальной кювете. При почти горизонтальной кювете (угол отклонения

от горизонтали не более 20°) происходит накопление пузырьков в кластер. Форма и размеры кластера соответствуют модовой структуре лазерного пятна (рис. 1). Толщина слоя жидкости в кювете составляет 130 мкм. Размеры пузырьков также лежат в диапазоне 50–100 мкм. Нагрев жидкости в кювете в центре лазерного пятна достигал 60°C .

Для интерпретации описанного явления рассмотрим термокапиллярный механизм образования пузырьков кластеров в поле излучения. Простейшая оценка силы, удерживающей пузырек в нагретой области, основана на существовании термокапиллярной «силы», направленной вдоль градиента температуры [15]. Данная сила зависит от коэффициента поверхностного натяжения σ , который является функцией температуры:

$$F_{\text{тн}} = \pi R^2 \frac{d\sigma}{dT} \frac{dT}{dx}, \quad (1)$$

где T – температура; R – радиус пузырька; x – координата вдоль слоя жидкости.

Приравнивая эту силу к выталкивающей силе Архимеда F_A , получаем условие левитации:

$$\frac{dT}{dx} > \rho g R \left(\frac{d\sigma}{dT} \right)^{-1}, \quad (2)$$

где ρ – плотность жидкости; $g = 9,8 \text{ мс}^{-2}$.

Например, подставляя следующие значения параметров для воды $\rho = 10^3 \text{ кгм}^{-3}$, $\frac{d\sigma}{dT} \cdot 10^{-4} \text{ Нм}^{-1}\text{К}^{-1}$, получаем

$$\frac{dT}{dx} > 10^5 \text{ Км}^{-1}.$$

Наклоном кюветы можно уменьшить продольную составляющую F_A практически до нуля, и таким образом градиента $10^3\text{--}10^4 \text{ Км}^{-1}$ (что соответствует условиям эксперимента) достаточно, чтобы пузырек не всплывал. Поскольку кювета почти горизонтальна, существенное значение имеет адгезионная сил, «закрепляющая» пузырек на верхней поверхности окна кюветы в области лазерного пятна и частично компенсирующая стоксову силу вязкости в конвективном потоке.

Таким образом, полученные результаты демонстрируют эффективность термокапиллярного действия лазерного излучения, а также возможность светоиндуцированного образования устойчивого пузырькового кластера.

Для исследования термокапиллярного движения пузырьков на свободной поверхности жидкости в световом поле была проведена отдельная серия экспериментов.

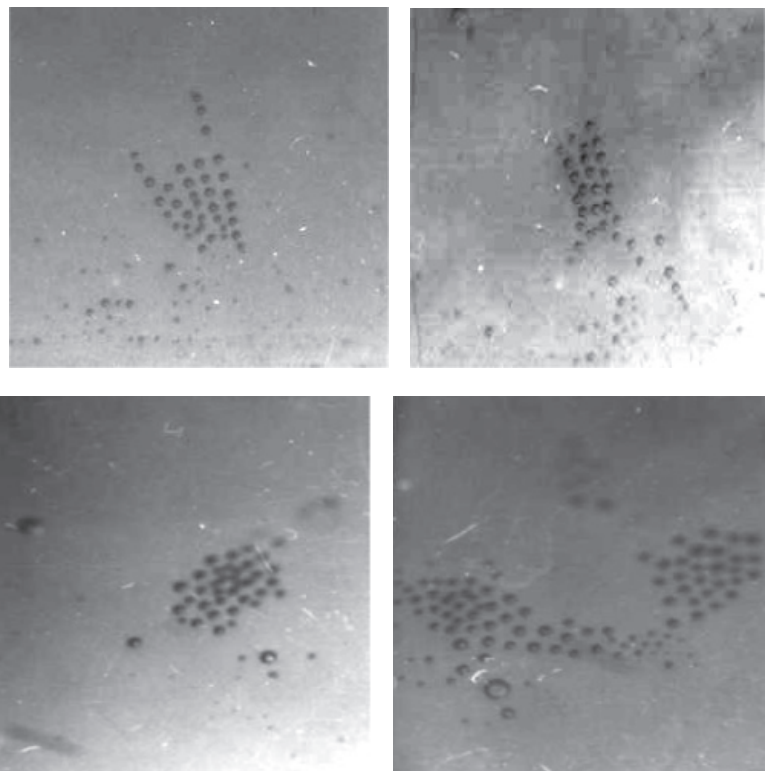


Рис. 1. Фотографии, демонстрирующие образование пузырьков кластеров в закрытой кювете, форма которых соответствует пространственному распределению интенсивности излучения в лазерном пятне

На предметный столик установки помещалась горизонтальная кювета без верхнего окна с жидкостью, толщина слоя которой составляла 0,4–0,8 мм. На поверхность исследуемой жидкости (дистиллят с добавлением поглощающего излучение компонента) фокусировался пучок лазерного излучения, источником которого являлся гелий-неоновый лазер (мощность излучения $P_{\text{изл}} = 60$ мВт, длина волны $\lambda_{\text{ген}} = 0,6$ мкм).

Пузырьки образовывались на центрах поглощения (микрочастицах туши) в жидкости при ее нагреве падающим излучением. С помощью видеокамеры зафиксирован дрейф пузырьков в область максимума температуры жидкости.

В ходе проведения исследования наблюдался эффект образования пузырькового кластера в жидкофазной среде в световом пятне. При этом кластер имеет динамическую структуру (пузырьки не прикасаются друг к другу) и характеризуется упорядоченной структурой (рис. 2–3).

скорость конвективного поверхностного движения (которая в условиях эксперимента составляла всего 5–10% от дрейфовой).

Таким образом, термокапиллярный дрейф пузырьков на свободной поверхности жидкости может также определять их динамику даже в условиях развитой конвекции.

Выводы

Приведенные в данной работе данные демонстрируют, что массоперенос в двухфазной жидкости, обусловленный термокапиллярным механизмом, может значительно превышать конвективный. Наличие неоднородного нагрева излучением, эффективного взаимодействия пузырьков друг с другом (в случае свободной поверхности) и с поверхностью твердого тела (для закрытой кюветы) может приводить к образованию устойчивых пузырьковых кластеров в условиях развитой конвекции.

Полученные результаты могут найти применение в различных задачах лазерной

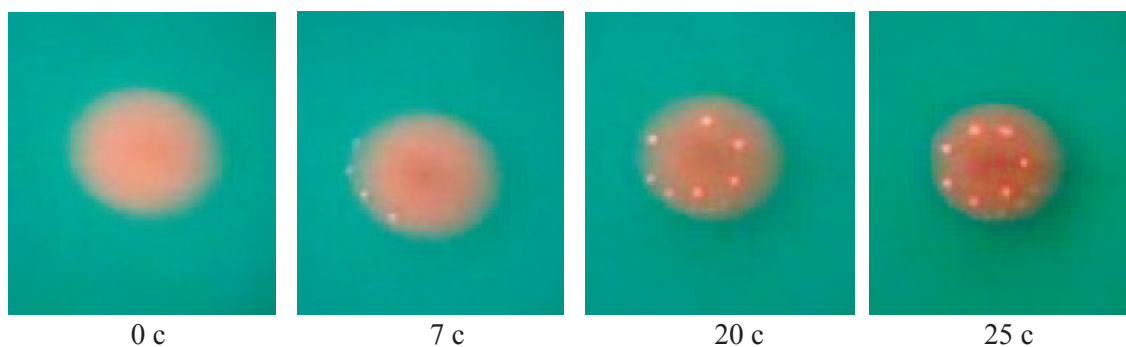


Рис. 2. Динамика образования пузырькового кластера на поверхности жидкости (указано время от начала воздействия светового излучения в секундах), размер изображения 1,8 мм, толщина слоя жидкости 0,4 мм

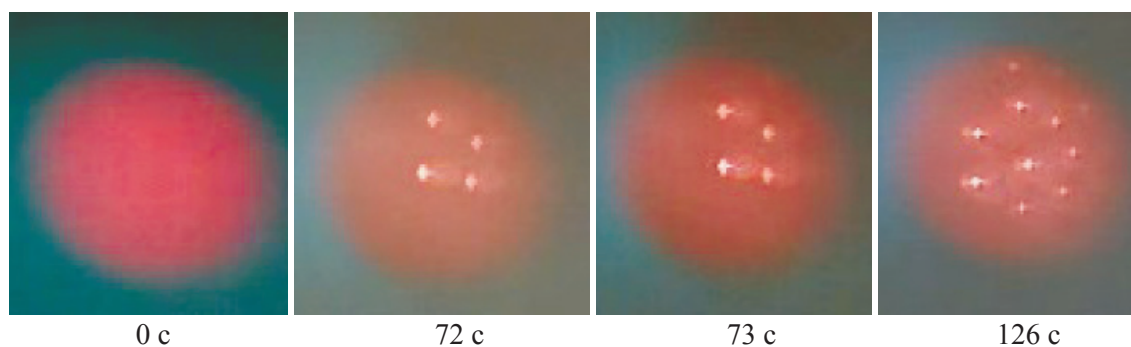


Рис. 3. Динамика образования пузырькового кластера на поверхности жидкости (указано время от начала воздействия светового излучения в секундах), размер изображения 1 мм, толщина слоя жидкости 0,6 мм

Как показали проведенные оценки на основе формул для скорости дрейфа пузырьков в объемной жидкости, скорость термокапиллярного дрейфа значительно превышает

обработки материалов, биомедицинских приложениях, а также представляют интерес для оптической диагностики многофазных сред [1–3, 8–14].

Список литературы

1. Доронин И.С. Термодиффузия наночастиц в жидкости / И.С. Доронин, Г.Д. Иванова, А.А. Кузин, К.Н. Окишев // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 6–2. – С. 238–242.
2. Иванов В.И. Микрогетерогенные среды для динамической голографии / В.И. Иванов, Г.Д. Иванова, С.И. Кирюшина, А.В. Мяготин // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 12–12. – С. 2580–2583.
3. Иванов В.И. Обращение волнового фронта при четырехволновом смешении непрерывного излучения в условиях сильного самовоздействия / В.И. Иванов, А.И. Илларионов, И.А. Коростелева // *Письма в журнал технической физики*. – 1997. – Т. 23. – № 15. – С. 60–63.
4. Иванов В.И., Иванова Г.Д., Хе В.К. Влияние термодиффузии на термолинзовый отклик в жидкофазной дисперсной среде // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов, межвуз. сб. науч. тр. / под общ. ред. В.М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова*. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2013. – Вып. 5. – С. 112–115.
5. Иванов В.И., Иванова Г.Д., Хе В.К. Тепловое самовоздействие излучения в тонкослойной жидкофазной среде // *Современные проблемы науки и образования*. – 2014. – № 6. URL: www.science-education.ru/120-17046.
6. Иванов В.И., Карпец Ю.М., Окишев К.Н., Ливашвили А.И. Термодиффузионный механизм просветления двухкомпонентной среды лазерным излучением // *Известия Томского политехнического университета*. – 2007. – Т. 311. – № 2. – С. 39–42.
7. Иванов В.И., Кузин А.А., Ливашвили А.И., Хе В.К. Динамика светондуплированной тепловой линзы в жидкофазной двухкомпонентной среде // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки*. – 2011. – Т. 4. – № 134. – С. 44–46.
8. Иванов В.И., Кузин А.А., Окишев К.Н. Оптическая левитация наночастиц: монография. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2008. – 105 с.
9. Иванов В.И., Ливашвили А.И. Эффект Дюфура в дисперсной жидкофазной среде в поле гауссова пучка // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов, межвуз. сб. науч. тр. / под общ. ред. В.М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова*. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2013. – Вып. 5. – С. 116–119.
10. Иванова Г.Д. Динамические голограммы в жидкофазной дисперсной среде / Г.Д. Иванова, С.И. Кирюшина, А.В. Мяготин // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 9–10. – С. 2164–2168.
11. Иванова Г.Д. Динамические голограммы в наносuspензии / Г.Д. Иванова, С.И. Кирюшина, А.В. Мяготин // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов, межвуз. сб. науч. тр. / под общ. ред. В.М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова*. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2014. – Вып. 6. – С. 122–125.
12. Иванова Г.Д. Исследование явлений массопереноса в бинарных средах термографическим методом / Г.Д. Иванова, С.И. Кирюшина, А.А. Кузин // *Современные проблемы науки и образования*. – 2014. – № 2. URL: www.science-education.ru/116-12579.
13. Ливашвили А.И., Иванова Г.Д., Хе В.К. Стационарный термолинзовый отклик наножидкости // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов, межвуз. сб. науч. тр. / под общ. ред. В.М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова*. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2014. – Вып. 6. – С. 227–230.
14. Окишев К.Н., Иванов В.И., Климентьев С.В., Кузин А.А., Ливашвили А.И. Термодиффузионный механизм нелинейного поглощения суспензии наночастиц // *Оптика атмосферы и океана*. – 2010. – Т. 23. – № 2. – С. 106–107.
15. Ivanov V.I., Karpets Yu.M. Thermocapillary mechanism of laser beam self-action in a two component medium // *Proc. SPIE*. – 2000. – Vol. 4341. – P. 210–217.

References

1. Doronin I.S. Termodiffuzija nanochastic v zhidkosti / I.S. Doronin, G.D. Ivanova, A.A. Kuzin, K.N. Okishev // *Fundamentalnye issledovaniya*. 2014. no. 6–2. pp. 238–242.
2. Ivanov V.I. Mikrogeterogennye sredy dlja dinamicheskoj golografii / V.I. Ivanov, G.D. Ivanova, S.I. Kirjushina, A.V. Mjagotin // *Fundamentalnye issledovaniya*. 2014. no. 12–12. pp. 2580–2583.
3. Ivanov V.I. Obrashhenie volnovogo fronta pri chetyrehvolnovom smeshenii nepreryvnogo izlucheniya v uslovijah silnogo samovozdejstvija / V.I. Ivanov, A.I. Illarionov, I.A. Korosteleva // *Pisma v zhurnal tehnichekoj fiziki*. 1997. T. 23. no. 15. pp. 60–63.
4. Ivanov V.I., Ivanova G.D., He V.K. Vlijanie termodiffuzii na termolinzovyy otklik v zhidkofaznoj dispersnoj srede // *Fiziko-himicheskie aspekty izuchenija klasterov, nanostruktur i nanomaterialov, mezhvuz. sb. nauch. tr. / pod obshh. red. V.M. Samsonova, N.Ju. Sdobnjakova*. Tver: Tver. gos. un-t, 2013. Vyp. 5. pp. 112–115.
5. Ivanov V.I., Ivanova G.D., He V.K. Teplovoe samovozdejstvie izlucheniya v tonkoslojnoj zhidkofaznoj srede // *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2014. no. 6. URL: www.science-education.ru/120-17046.
6. Ivanov V.I., Karpec Ju.M., Okishev K.N., Livashvili A.I. Termodiffuzionnyj mehanizm prosvetlenija dvukomponentnoj sredy lazernym izlucheniem // *Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta*. 2007. T. 311. no. 2. pp. 39–42.
7. Ivanov V.I., Kuzin A.A., Livashvili A.I., He V.K. Dinamika svetoinducirovannoj teplovoj linzy v zhidkofaznoj dvukomponentnoj srede // *Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politehnicheskogo universiteta. Fiziko-matematicheskie nauki*. 2011. T. 4. no. 134. pp. 44–46.
8. Ivanov V.I., Kuzin A.A., Okishev K.N. Opticheskaja levitacija nanochastic: monografija. Habarovsk: Izd-vo DVGUPS, 2008. 105 p.
9. Ivanov V.I., Livashvili A.I. Jefferkt Djufura v dispersnoj zhidkofaznoj srede v pole gaussova puchka // *Fiziko-himicheskie aspekty izuchenija klasterov, nanostruktur i nanomaterialov, mezhvuz. sb. nauch. tr. / pod obshh. red. V.M. Samsonova, N.Ju. Sdobnjakova*. Tver: Tver. gos. un-t, 2013. Vyp. 5. pp. 116–119.
10. Ivanova G.D. Dinamicheskie gologrammy v zhidkofaznoj dispersnoj srede / G.D. Ivanova, S.I. Kirjushina, A.V. Mjagotin // *Fundamentalnye issledovaniya*. 2014. no. 9–10. pp. 2164–2168.
11. Ivanova G.D. Dinamicheskie gologrammy v nanosuspenszii / G.D. Ivanova, S.I. Kirjushina, A.V. Mjagotin // *Fiziko-himicheskie aspekty izuchenija klasterov, nanostruktur i nanomaterialov, mezhvuz. sb. nauch. tr. / pod obshh. red. V.M. Samsonova, N.Ju. Sdobnjakova*. Tver: Tver. gos. un-t, 2014. Vyp. 6. pp. 122–125.
12. Ivanova G.D. Issledovanie javlenij massoperenosa v binarnyh sredah termograficheskim metodom / G.D. Ivanova, S.I. Kirjushina, A.A. Kuzin // *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2014. no. 2. URL: www.science-education.ru/116-12579.
13. Livashvili A.I., Ivanova G.D., He V.K. Stacionarnyj termolinzovyy otklik nanozhidkosti // *Fiziko-himicheskie aspekty izuchenija klasterov, nanostruktur i nanomaterialov, mezhvuz. sb. nauch. tr. / pod obshh. red. V.M. Samsonova, N.Ju. Sdobnjakova*. Tver: Tver. gos. un-t, 2014. Vyp. 6. pp. 227–230.
14. Okishev K.N., Ivanov V.I., Klimentev S.V., Kuzin A.A., Livashvili A.I. Termodiffuzionnyj mehanizm nelinejnogo pogloshhenija suspenszii nanochastic // *Optika atmosfery i okeana*. 2010. T. 23. no. 2. pp. 106–107.
15. Ivanov V.I., Karpets Yu.M. Thermocapillary mechanism of laser beam self-action in a two component medium // *Proc. SPIE*. 2000. Vol. 4341. pp. 210–217.

Рецензенты:

Карпец Ю.М., д.ф.-м.н., профессор кафедры «Физика и теоретическая механика», ФГБОУ ВПО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», г. Хабаровск;
Криштоп В.В., д.ф.-м.н., профессор кафедры физики, проректор по учебной работе, ФГБОУ ВПО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» Министерства транспорта РФ, г. Хабаровск.