

ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЙ МАССОПЕРЕНОСА В БИНАРНЫХ СРЕДАХ ТЕРМОГРАФИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Иванова Г.Д.¹, Кирыюшина С.И.¹, Кузин А.А.¹

¹ФГБОУ ВПО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», Хабаровск, Россия (680021, Хабаровск, ул. Серышева 47.), e-mail: kuzin@festu.kv.ru

Предложена комплексная экспериментальная методика исследования явлений массопереноса в бинарных средах, включающая видеорегистрацию, фотоабсорбционный и термографический методы. Описана экспериментальная схема, в которой использованы источник лазерного излучения (мощность излучения 60 мВт, длина волны 0.63 мкм), термограф ИРТИС-2000. Методом пробной частицы измерены скорости светоиндуцированной конвекции в тонком (0.4÷0.8 мм) слое жидкости с поглощающими излучение микрочастицами. Зарегистрирована динамика образования центрального радиального конвективного потока. Показано, что скорость движения пузырьков на поверхности жидкости по направлению и величине соответствует термокапиллярному эффекту и в условиях эксперимента в 5-10 раз превышает скорость конвективного массопереноса. Описано образование на поверхности жидкости динамического пузырькового кластера, характеризующегося упорядоченной структурой.

Ключевые слова: массоперенос в бинарных средах, термографический метод, термокапиллярный дрейф микрочастиц, светоиндуцированная конвекция.

THE MASS TRANSPORT PHENOMENA INVESTIGATIONS IN BINARY MEDIA BY THE THERMOGRAPHIC METHOD

Ivanova G.D.¹, Kiryushina S.I.¹, Kuzin A.A.¹

¹Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia (680021, Khabarovsk, Serysheva street, 47), e-mail: kuzin@festu.khv.ru

The complex experimental method for mass transport phenomena investigations of binary media including video, photoabsorbing and thermographic methods is proposed. The experimental scheme with used the laser source (light power 60 mW, wavelength 0. 63 μm) and thermograph IRTIS-2000 is described. The light induced convection velocities in thin (0.4÷0.8 mm) liquid film with light absorbing microparticles are measured by a probe particle method. The central radial convective flow dynamic is registered. It is showed the liquid surface bubbles velocity direction and value correspond thermocapillary drift, which is for 5÷10 times more than light induced convection velocity. The dynamical bubble cluster foundation on the liquid surface is described.

Keywords: mass transport in the binary media, thermographic method, microparticle thermocapillary drift, light induced convection

Введение

Многокомпонентные дисперсные среды (жидкофазные смеси, суспензии, эмульсии) характеризуются наличием целого ряда специфических механизмов светоиндуцированного массопереноса, которые отсутствуют в однокомпонентных средах. К термоиндуцированным механизмам дрейфа частиц в неоднородном температурном поле относятся термодиффузия (термофорез) в газах, суспензиях, эффект Соре в жидкофазных бинарных смесях [3-9]. При этом при определенных условиях, например, термокапиллярное действие лазерного излучения может быть эффективнее светового давления, радиометрического эффекта, светореактивного и т.д. [1-3]. 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) [2].

Цель исследования

В данной работе исследован термокапиллярный механизм дрейфа микрочастицы в жидкофазной среде в условиях развитой конвекции с использованием комплексной экспериментальной методики, включающей термографический метод.

Экспериментальная методика и результаты

В экспериментальной установке (рис. 1) использовался гелий-неоновый лазер, малогабаритная IP видеочкамера AVIOSYS АК9060 и термограф.

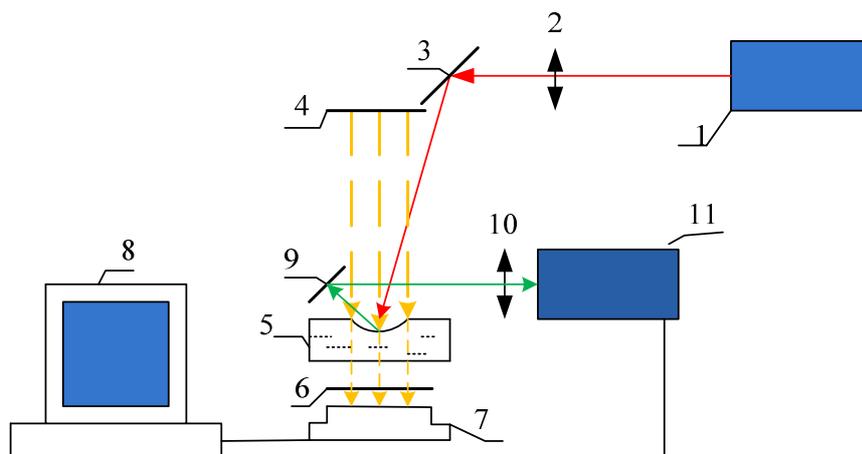


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – гелий-неоновый лазер, 2,10 – фокусирующая линза, 3,9 – зеркало, 4 – опорное излучение, 5 – кювета с исследуемой жидкостью, 6 – светофильтр, 7 – видеочкамера 9060АК, 8 – персональный компьютер, 11– термограф ИРТИС 2000

Исследуемая жидкость (5) помещалась в кювету на предметный столик. Для создания локального источника тепла в центральную область кюветы фокусировался пучок лазерного излучения, источником которого являлся гелий-неоновый лазер ГН-5 (1), мощность излучения $P = 60 \text{ мВт}$, длина волны $\lambda = 0,63 \text{ мкм}$. Распределение температуры на поверхности жидкости фиксировалось термографом ИРТИС-2000 (11). Спектральный диапазон измерений – $(8 \div 12) \text{ мкм}$, диапазон измерений – $-60 \div 300^\circ\text{C}$, погрешность измерения абсолютной температуры – $\pm 1^\circ\text{C}$, размер изображения – 640×480 , время формирования кадра – не более 1,6 сек. Для наблюдения и фиксации термоиндуцированных конвекционных течений снизу кюветы помещалась видеочкамера (7). Спецификация камеры – Image Pickup Device: 1/3" Hi-CMOS, 0.8 Lux/F1.4; глубина цвета – 24 бит; формат изображения – JPEG одиночные кадры или Motion-JPEG (AVI), 3 уровня сжатия; поддерживаемые разрешения – 160×120 , 320×240 , 640×480 .

На предметный столик установки помещалась чашка Петри (диаметр $D=35\text{мм}$) с жидкостью, толщина слоя которой составляла $0,4\pm 0,8\text{ мм}$. На поверхность исследуемой жидкости (дистиллированная вода с добавлением поглощающего излучение компонента) фокусировался пучок лазерного излучения. Для наблюдения процессов, происходящих в жидкости, в вертикальной плоскости под кюветой помещался объектив с цифровой видеокамерой, изображения с которой записывались на компьютер. Контроль распределения температурного поля осуществлялся с помощью термографа, на который с помощью оптической системы проецировался верхний слой жидкости. Данные с термографа также обрабатывались на компьютере.

На рис. 2 показано сформированное лазерным пучком квазистационарное радиально симметричное распределение температуры на поверхности жидкости (раствор туши в дистиллированной воде).

С помощью видеокамеры наблюдался термокапиллярный дрейф пузырьков в область максимума температуры жидкости, обусловленный температурной зависимостью коэффициента межфазного натяжения. Пузырьки образовывались на центрах поглощения (микрочастицах туши) в жидкости при ее нагреве падающим излучением. Для количественного сравнения экспериментальных значений скорости и скорости термокапиллярного дрейфа необходимо учесть влияние конвективного движения жидкости.

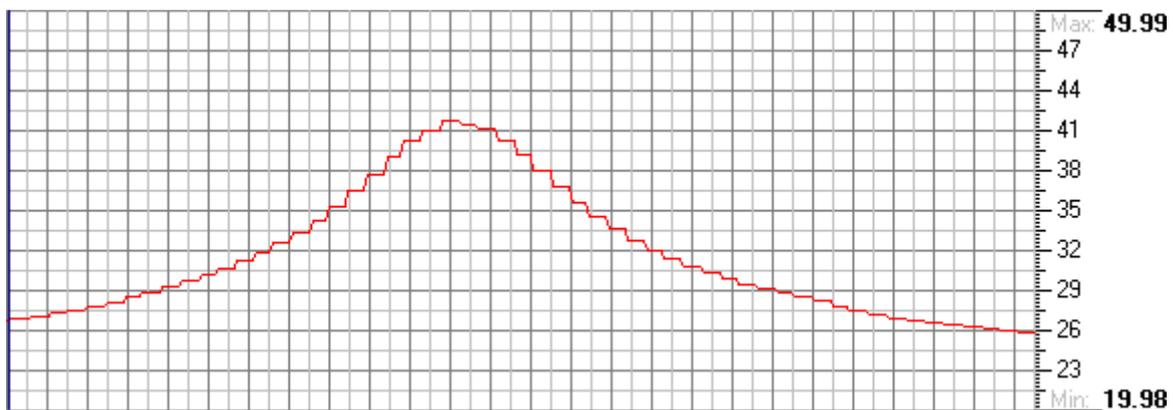


Рис. 2. Распределение температуры на поверхности жидкости; $t=100\text{с}$.

Для исследования интенсивности конвективного массопереноса в открытой кювете использовался метод пробной частицы. На рис. 3 приведены изображения, демонстрирующие перемещение выделенной (кружок) пробной частицы в горизонтальной плоскости (кадры приведены с интервалом 6 с).

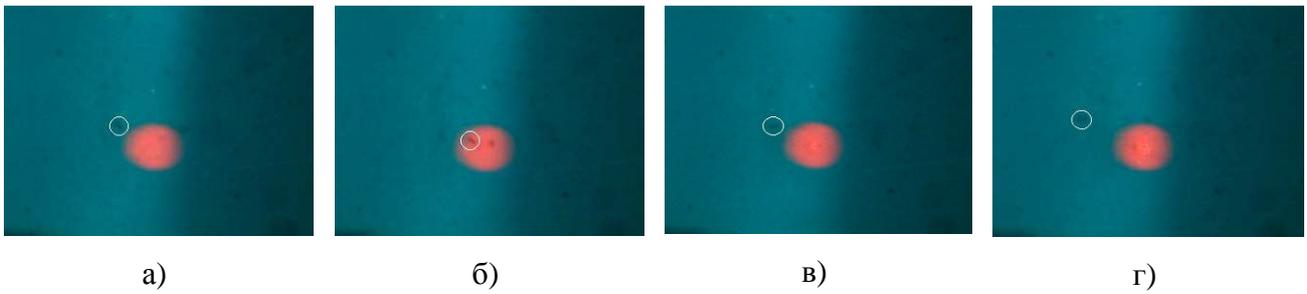
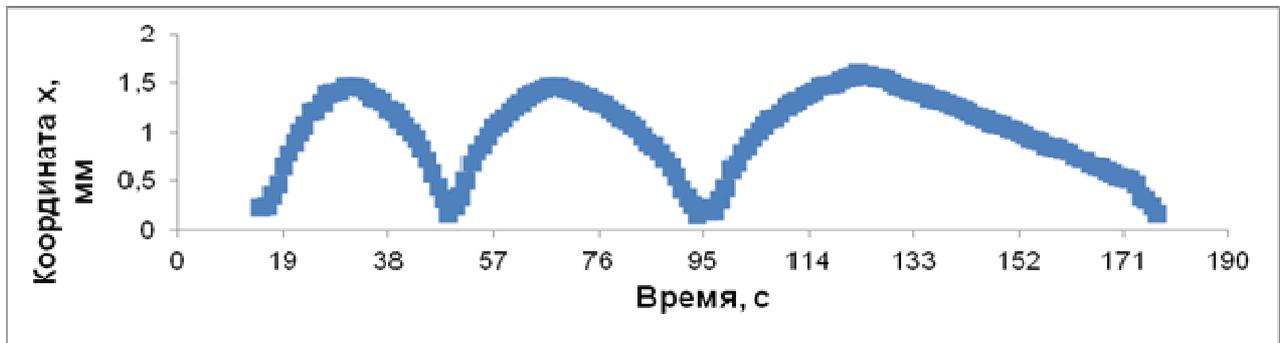
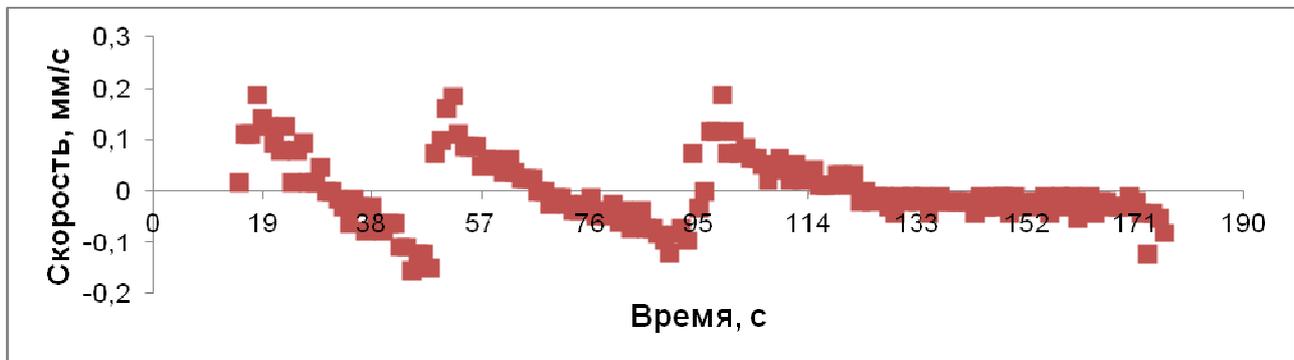


Рис. 3. Перемещение частицы в горизонтальной плоскости жидкофазной среды (а-б) – движение частицы к центру вблизи нижней границы слоя жидкости, (в-г) – движение частицы от центра вблизи поверхности жидкости

В результате анализа полученных данных были построены графики зависимости изменения горизонтального перемещения и скорости частицы от времени (рис. 4).



а)



б)

Рис. 4. Зависимость горизонтальной координаты пробной частицы от времени (а) и график изменения горизонтальной скорости частицы от времени (б)

На графиках видно, что скорость пробной частицы меняется циклично, что соответствует наличию конвективного потока соответствующего диаметра. При увеличении температуры жидкости амплитуда скорости и горизонтального перемещения пробной частицы увеличивается, что соответствует динамике центрального радиального конвективного потока.

Полученные данные позволили сравнить скорость термокапиллярного дрейфа пузырьков в конвекционном потоке и без него [1-3]. Как показал анализ данных, скорость поверхностного термокапиллярного дрейфа значительно превышает скорость конвективного поверхностного движения (которая в условиях эксперимента составляла всего 5-10 % от дрейфовой) и соответствует величинам, рассчитанным на основе формул для дрейфа пузырьков в объемной жидкости [6]. Таким образом, термокапиллярный дрейф микрочастиц, может определять массоперенос в микрогетерогенной среде даже в условиях развитой конвекции.

В ходе проведения исследования наблюдался эффект образования пузырькового кластера в жидкофазной среде в световом пятне. При этом кластер является динамическим (пузырьки не прикасаются друг к другу) и характеризуется упорядоченной структурой (рис. 5). Механизм образования и структура данного кластера во многом соответствуют таковым для воздушно-капельного кластера, описанного в недавней работе [10], и требуют отдельного детального исследования.

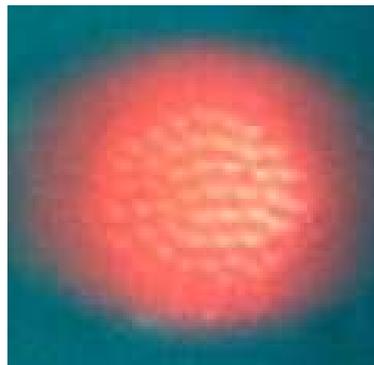


Рис. 5. Пузырьковый кластер на поверхности жидкости

Выводы

Методом пробной частицы измерены скорости светоиндуцированной конвекции в тонком слое бинарной жидкофазной смеси. Показано, что скорость движения пузырьков на поверхности жидкости по направлению и величине соответствует термокапиллярному эффекту и в условиях эксперимента в 5-10 раз превышает скорость конвективного массопереноса. Описано образование на поверхности жидкости динамического пузырькового кластера, характеризующегося упорядоченной структурой.

Приведенные в данной работе данные демонстрируют, что массоперенос в двухфазной жидкости, обусловленный термокапиллярным механизмом, может значительно превышать конвективный. Полученные результаты могут найти применение в области оптической

диагностики многофазных сред [4, 6], а также представляют интерес в связи с различными применениями мощных лазеров для обработки материалов (лазерная технология), поскольку термокапиллярная конвекция играет значительную роль в технологических процессах, связанных с использованием жидких материалов (например, расплавленных металлов) – сварке, резке, легировании [2, 3].

Список литературы

1. Бергер Н.К., Иванов В.И., Суходольский А.Т. О применении капиллярного термофореза в динамической голографии // Краткие сообщения по физике ФИ им. П.Н. Лебедева АН СССР. – 1988. - № 10. – С. 11-14.
2. Зуев А.Л., Костарев К.Г. Особенности концентрационно-капиллярной конвекции // Успехи физических наук. – 2008. – Том 178. - №10. – С. 1065-1085.
3. Иванов В.И. Термоиндуцированные механизмы записи динамических голограмм. – Владивосток: Изд-во Дальнаука. 2006. – 143 с.
4. Иванов В.И., Иванова Г.Д., Хе В.К. Термолинзовая спектроскопия двухкомпонентных жидкофазных сред // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2011. - № 4. – С. 39-44.
5. Иванов В.И., Кузин А.А., Ливашвили А.И. Термоиндуцированное самовоздействие гауссова пучка излучения в жидкой дисперсной среде // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Физика. – 2010. – Том 5. - № 1. – С. 5-8.
6. Иванов В.И., Кузин А.А., Окишев К.Н. Оптическая левитация наночастиц. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС. 2008. – 105 с.
7. Иванов В.И., Ливашвили А.И., Окишев К.И. Термодиффузионный механизм изменения оптического пропускания двухкомпонентной среды // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2008. – Том 51. - № 3. – С. 50-53.
8. Иванов В.И., Ливашвили А.И. Самовоздействие гауссова пучка излучения в слое жидкофазной микрогетерогенной среды // Оптика атмосферы и океана. – 2009. – Том 22. - № 8. – С. 751-752.
9. Иванов В.И., Окишев К.Н. Термодиффузионный механизм записи амплитудных динамических голограмм в двухкомпонентной среде // Письма в "Журнал технической физики". – 2006 – Т. 32. – № 22. – С. 22-25.
10. Федорец А.А. Капельный кластер // Письма в ЖЭТФ. – 2004. - № 8. – С. 457-459.

Рецензенты:

Карпец Ю.М., д.ф.-м.н., профессор по кафедре физики, профессор кафедры «Автоматика телемеханика и связь» ФГБОУ ВПО Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск.

Криштоп В.В., д.ф.-м.н., профессор по кафедре физики, профессор кафедры «Физика и теоретическая механика» ФГБОУ ВПО Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск.