

УДК 532.783; 532.5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНВЕКЦИИ МАРАНГОНИ В НАНОЖИДКОСТЯХ

Г.С. ГЕВОРГЯН*, К.А. ПЕТРОСЯН, Р.С. АКОПЯН, Р.Б. АЛАВЕРДЯН

Ереванский государственный университет, Ереван, Армения

*e-mail: g.gevorgyan@ysu.am

(Поступила в редакцию 14 апреля 2017 г.)

Экспериментально исследовано возникновение регулярной конвекции, обусловленной температурной зависимостью коэффициента поверхностного натяжения, в слое обогащенной наночастицами изотропной (анизотропной) жидкости с одной свободной поверхностью при поглощении световой волны с гауссовым распределением интенсивности. Показано, что наночастицы существенно увеличивают теплопроводность смеси, что приводит к снижению скорости конвективных движений. Исследована зависимость скорости гидродинамических движений от интенсивности лазерного излучения и концентрации наночастиц.

1. Введение

Первое систематическое исследование конвективных движений в жидкостях со свободными границами было проведено в работах Бенара [1, 2], в которых они объяснялись температурной зависимостью плотности жидкости (гравитационный механизм). Тот же механизм был в основе теоретической модели, предложенной Рэлеем [3]. В дальнейшем [4] было показано, что при используемых Бенаром толщинах слоя (~1 мм) имеет место термокапиллярный механизм возбуждения конвективных движений, обусловленных температурной зависимостью коэффициента поверхностного натяжения (конвекция Марангони). Первые работы, посвященные исследованию термокапиллярной конвекции, вызванной тепловым действием лазерного излучения, появились в 1970-х годах [5, 6]. Пучок лазера, частично отражаясь от свободной поверхности жидкости, деформированной термокапиллярной конвекцией, несет полную информацию о ее форме, которая зависит от протекающих конвективных процессов внутри жидкости, что позволяет определять ряд физических характеристик жидкости (вязкость [7] и теплопроводность [8]) и параметры ее слоя (толщину [9] и кривизну свободной поверхности [10, 11]). Причем, вид получаемой информации – оптическое изображение (термокапиллярный отклик) – легко поддается обработке, в том числе автоматизированной.

Наножидкости – это жидкости, обогащенные частицами с характерными размерами от 1 до 100 нм. Обычно, в качестве базовых жидкостей используют воду, органические жидкости, полимерные растворы и жидкие кристаллы (ЖК), а в качестве твердых наночастиц выступают частицы химически устойчивых металлов и их окислы. Недавно реализованные эксперименты показали [12, 13], что наножидкости имеют сравнительно высокую теплопроводность и, следовательно, более слабые гидродинамические свойства, чем их базовые жидкости.

В настоящей работе наблюдается регулярная конвекция, обусловленная температурной зависимостью коэффициента поверхностного натяжения, в слое изотропной жидкости, обогащенной наночастицами, с одной свободной поверхностью при поглощении световой волны с гауссовым распределением интенсивности в плоскости слоя. Показано, что благодаря увеличению теплопроводности смеси наночастицами существенно снижается скорость конвективных движений.

2. Экспериментальное исследование конвекции в наножидкостях

Для исследования конвекции в наножидкостях была собрана экспериментальная установка, схема которой приведена на рис.1. Пучок квазинепрерывного Nd:YAG лазера (1) с гауссовым распределением пучка, длиной волны излучения $\lambda = 1.06$ мкм и шириной пучка 1.7 ± 0.1 мм на полувисоте распределения интенсивности проходит через стекло (2), отражается от зеркала (3) и падает на ячейку с наножидкостью (4). Лазерное излучение падает на ячейку, находящуюся в горизонтальном положении, перпендикулярно плоскости ячейки. Поглощение лазерного излучения приводит к возникновению градиента распределения

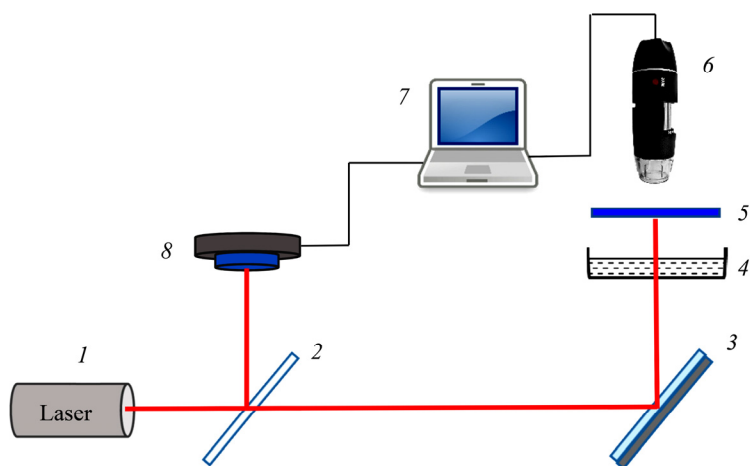


Рис.1. Схема экспериментальной установки: 1 – Nd:YAG лазер, 2 – стекло, 3 – зеркало, 4 – ячейка с наножидкостью, 5 – ИК фильтр, 6 – цифровой микроскоп, 7 – компьютер и 8 – измеритель мощности.

температуры в наножидкости, что, в свою очередь, приводит к возникновению конвекции Марангони. Прошедший через ячейку лазерный пучок поглощается с помощью ИК фильтра (5). Гидродинамические движения (конвекция Марангони) наблюдались с помощью цифрового микроскопа с внутренним освещением (6), подключенного к компьютеру (7). Визуализация гидродинамических движений производилась путем добавки в наножидкость алюминиевого порошка (размеры частиц $\sim 15\text{--}20$ мкм) с концентрацией $\sim 10^{-3}$ вес%. Оптическое поглощение наножидкости на длине волны $\lambda = 1.06$ мкм составляет $\alpha \approx 0.01$ см $^{-1}$. Скорость гидродинамических движений определялась как скорость движения алюминиевых частиц. Мощность отраженного от стекла (2) лазерного пучка измерялась с помощью измерителя мощности (8). Пересчет мощности лазерного пучка, падающего на ячейку, производился по измерению мощности отраженного пучка.

В эксперименте использовались горизонтально установленные ячейки с машинным маслом и нематическим жидким кристаллом (НЖК) E7, в которые были добавлены наночастицы ВаTiO $_3$. В случае машинного масла концентрация наночастиц составляла 0, 0.1, 0.5 и 1%, а в случае НЖК – 0.01, 0.05 и 0.075%. Толщина ячеек составляла 0.25 мм. Верхняя граница ячеек была свободна и соприкасалась с воздухом. Эксперименты проводились при комнатной температуре.

В процессе исследований измерялось среднее значение скорости конвективных движений. На рис.2а,б представлены зависимости скорости конвективных движений от мощности падающего излучения при различных концентрациях наночастиц в машинном масле и НЖК E7, соответственно. Погрешность значений скоростей не превышала 15% от среднего значения. Такая большая величина

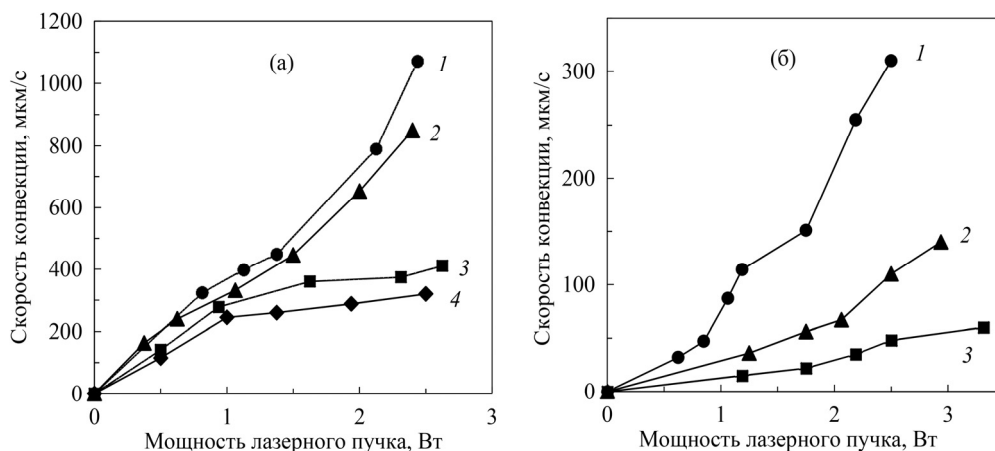


Рис.2. Зависимость скорости конвективных движений от мощности падающего излучения при различных концентрациях наночастиц (а) в машинном масле: 1 – 0%, 2 – 0.1%, 3 – 0.5%, 4 – 1% и (б) в НЖК E7: 1 – 0%, 2 – 0.05%, 3 – 0.075%.

погрешности, а также нерегулярность приведенных кривых обусловлены неоднородностью размеров алюминиевых частиц и наночастиц. Из приведенных кривых отчетливо видно, что в обоих случаях скорость конвекции увеличивается при увеличении мощности лазерного излучения и уменьшается при увеличении концентрации наночастиц. Последнее обусловлено тем, что наночастицы увеличивают теплопроводность смеси, что приводит к уменьшению температурного градиента и, соответственно, к уменьшению скорости конвективных движений. Экспериментально показана возможность повышения теплопроводности наножидкостей и обусловленное этим снижение тепловых конвекции Марангони и Рэлея-Бенара, возбужденных лазерным излучением с градиентным распределением интенсивности в плоскости слоя. Полученные результаты качественно совпадают с теоретическими предсказаниями работы [14].

Заметим, что наблюдаемый эффект существенно отличается от классических задач Рэлея-Бенара и Марангони. Во-первых, кроме вертикального градиента температуры здесь имеется также горизонтальный градиент, определяемый гауссовой формой лазерного пучка. Поэтому, эффект не имеет порогового характера по интенсивности и возникает при сравнительно низких уровнях мощности лазерного излучения. Во-вторых, оказывается возможным создавать любые структуры конвективных движений, соответствующие поперечному распределению интенсивности лазерного излучения.

3. Заключение

Экспериментально показана возможность возбуждения регулярных конвективных движений термокапиллярного происхождения в изотропных (машинное масло) и анизотропных (НЖК) жидкостях, обогащенных наночастицами BaTiO_3 , вызванных лазерным излучением с гауссовым распределением интенсивности. Показано, что наночастицы могут существенно увеличить теплопроводность смеси и снизить скорость конвективных потоков.

Таким образом, поскольку применение наножидкостей всегда связано с тем или иным их течением, то определяющую роль в последних играют конвективные движения, индуцированные лазерным излучением. По сравнению с базовыми жидкостями (например, масло, вода или ЖК) наножидкости обладают сильными теплофизическими свойствами, такими как высокая теплопроводность, большие коэффициенты теплодиффузии, вязкости и конвективной теплопередачи. Все эти факторы надо учитывать при теоретических расчетах конвекции наножидкостей.

Работа выполнена при финансовой поддержке ГКН МОН Армении в рамках научного проекта 15Т-1С099.

ЛИТЕРАТУРА

1. **H. Benard.** Revue Generale des Sciences, Pares at Appliquees, **11**, 1261; 1309 (1900).
2. **H. Benard.** Ann. Chem. Phys., **23**, 62 (1901).
3. **Reyleigh.** Phil. Mag., **32**, 529 (1916).
4. **J.R.A. Pearson.** J. Fluid Mech., **4**, 489 (1958).
5. **Б.А. Безуглый, Е.А. Галашин, Г.Я. Дудкин.** Письма в ЖЭТФ, **22**, 76 (1975).
6. **G. Da Costa, J. Calatrony.** Appl. Opt., **17**, 2381 (1978).
7. **Б.А. Безуглый, А.А. Федорец.** Патент РФ № 2201587. Безконтактный способ измерения вязкости. Бюл. 9. Изобретения – 2003.
8. **Б.А. Безуглый, О.А. Тарасов, С.И. Чемоданов.** Труды межотраслевого научного и методического семинара «Теплофизика, гидрогазодинамика, теплотехника», Тюмень, ТюмГУ, 47 (2002).
9. **Б.А. Безуглый, А.А. Федорец.** Письма в ЖТФ, **27(9)**, 20 (2001).
10. **Р.С. Акопян, Р.Б. Алавердян, А.Г. Аракелян, С.Ц. Нерсисян, К.М. Саркисян, Ю.С. Чилингарян.** Изв. НАН РА, Физика, **39**, 44 (2004).
11. **М.Р. Акопян, Р.Б. Алавердян, Ю.С. Чилингарян, Р.С. Акопян.** Изв. НАН РА, Физика, **49**, 230 (2014).
12. **S. Sarkar, S. Ganguly, G. Biswas.** Int. J. Heat and Mass Transfer, **71**, 328 (2014).
13. **I. Rashidi, O. Mahian, G. Lorenzini, C. Biserni, S. Wongwises.** Int. J. Heat and Mass Transfer, **74**, 391 (2014).
14. **М.Р. Акопян, Р.С. Акопян.** Изв. НАН Армении, Физика, **52**, 16 (2017).

ՄԱՐԱՆԳՈՆԻ ԿՈՆՎԵԿՑԻԱՅԻ ՓՈՐՉԱՐԱՐԱԿԱՆ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ
ՆԱՆՈՀԵՂՈՒԿՆԵՐՈՒՄ

Գ.Ս. ԳԵՎՈՐԳՅԱՆ, Կ.Ա. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ, Ռ.Ս. ՀԱԿՈԲՅԱՆ, Ր.Յ. ԱԼԱՎԵՐԴՅԱՆ

Փորձարարական ճանապարհով ուսումնասիրվել է ինտենսիվության գաուսյան բաշխմամբ լուսային փնջի կլանման հետևանքով կանոնավոր կոնվեկցիայի առաջացումը նանոմասնիկներով հարստացված բաց մակերևույթով իզոտրոպ և անիզոտրոպ հեղուկներում: Կոնվեկցիայի առաջացումը պայմանավորված է մակերևութային լարվածության գործակցի ջերմաստիճանային կախվածությամբ: Ցույց է տրվել, որ նանոմասնիկներն էապես մեծացնում են խառնուրդի ջերմահաղորդականությունը, որը բերում է կոնվեկտիվ շարժումների արագության նվազման: Ուսումնասիրվել է հիդրոդինամիկ շարժումների արագության կախվածությունը լազերային ճառագայթման ինտենսիվությունից և նանոմասնիկների կոնցենտրացիայից:

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE MARANGONI CONVECTION IN NANOFUIDS

G.S. GEVORGYAN, K.A. PETROSYAN, R.S. HAKOBYAN, R.B. ALAVERDYAN

Onset of regular convection in the nanoparticle doped isotropic and anisotropic fluids with one free surface under absorption of light with Gaussian distribution of intensity due to temperature dependence of surface tension coefficient is experimentally studied. It is shown that nanoparticles essentially increase the thermal conductivity of the mixture, which leads to decrease of the velocity of convective motion. Dependence of velocity of hydrodynamic motions on intensity of laser beam and concentration of nanoparticles is also studied.