

УДК 621.384.6:620.198

Андреева О.Л., Борц Б.В., Костиков А.О., Ткаченко В.И.

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТАРНОЙ КОНВЕКТИВНОЙ ЯЧЕЙКИ С ТВЕРДЫМИ И СМЕШАННЫМИ ГРАНИЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ СЛОЕ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ**

Большой научный и практический интерес представляет изучение физических процессов, связанных с формированием конвективных ячеек в слоях подогреваемой снизу жидкости, в условиях, когда границы слоя контактируют с жидкими или газообразными средами (свободные границы) или твердыми теплоотводящими массивами (твердые границы). В таких слоях при определенных геометрических размерах и параметрах жидкости возможно образование конвективных ячеистых структур. Процесс образования таких пространственно-временных структур обусловлен неспособностью среды обеспечить необходимый перенос тепла с нижней границы на верхнюю только за счет тепловой диффузии, в следствие чего возникает упорядоченное конвективное движение жидкости обусловленное силой плавучести – разностью архимедовой силы и силы тяжести [1].

Тепловая конвекция – явление массопереноса вещества в поле силы тяжести и градиента температуры, встречается как в природе [2], так и во многих технологических процессах [3]. Конвективный массоперенос воздушных масс, например, эффективно используется в сельском хозяйстве [4]. Явление конвекции также применяется в сложных процессах выращивания кристаллов для микроэлектроники [5].

Поэтому целью настоящей работы является экспериментальное исследование зарождения и развития устойчивых конвективных структур в подогреваемом снизу горизонтальном слое вязкой, несжимаемой жидкости с твердыми или смешанными (верхняя граница свободная, нижняя – твердая) граничными условиями.

Для экспериментального исследования зарождения и развития конвективных ячеек с твердыми или смешанными граничными условиями необходимо жидкости придать свойства однофазной суспензии [6], что позволяет визуализировать процесс. Однофазность суспензии необходима для того, чтобы пограничный слой жидкости на нижней границе не являлся свободной дисперсионной средой и, в некотором смысле, не являлся смазкой для второй фазы – суспензии, а имел такие же свойства, что и основная масса жидкости. Это условие накладывает определенные требования на параметры частиц дисперсной фазы [6]:

– либо размер частиц дисперсной фазы должен быть достаточно малым (порядка толщины поверхностной пленки жидкости), сводя, таким образом, толщину прослоек свободной дисперсионной среды к минимуму;

– либо объемное содержание твердых частиц дисперсной фазы должно быть значительно меньше их предельного объемного содержания, обеспечивая максимальную толщину прослоек свободной дисперсионной среды.

В експериментах первое требование реализации твердых или смешанных граничных условий было выполнено за счет использования в качестве однофазной вязкой среды вакуумного масла ВМ-5 с добавлением в него, для визуализации процесса, определенного количества (50–100 мг) масляной краски белого цвета. Размер частиц такой краски достаточно мал – менее 15 мкм (ГОСТ 11826-77), что меньше толщины пограничного слоя масла и способствует формированию однофазной жидкости.

Второе требование может быть выполнено добавлением в вакуумное масло алюминиевой пигментной пудры ПАП-1, которая представляет собой тонкоизмельченные частицы алюминия пластинчатой формы, средняя толщина пластин которой составляет приблизительно 0,25–0,50 мкм, а средний линейный размер 20–30 мкм (ГОСТ 5494–95) в таких малых количествах, что визуализация еще возможна, а вязкость суспензии соответствует вязкости дисперсионной среды.

На Рис. 1, 2 приведены микрофотографии вакуумного масла ВМ-5 с добавлением в 2 мл масла масляной краски в количестве 0,05 гр (рис. 1) или алюминиевой пигментной пудры ПАП-1 в количестве 0,005 г (рис. 2), выполненные на микроскопе МБС-9.



Рисунок 1 – Распределение частиц масляной краски в вакуумном масле, увеличение  $\times 42$

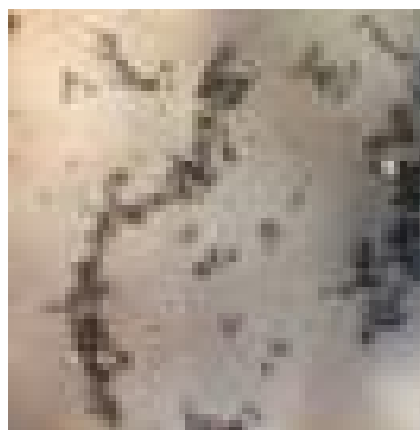


Рисунок 2 – Распределение частиц алюминиевой пудры в вакуумном масле, увеличение  $\times 42$

Анализ рисунков указывает на то, что в случае добавленной в вакуумное масло масляной краски прослойки в виде свободной дисперсионной среды отсутствуют (рис. 1), в то время, как в пространственном распределении частичек алюминиевой пудры наблюдаются прослойки свободной дисперсионной среды толщиной порядка 0,3–0,5 мм (рис. 2).

Таким образом, описанные выше способы подготовки жидких, вязких сред могут быть использованы для реализации твердых или смешанных граничных условий при моделировании конвективных процессов в слоях подогреваемой снизу вязкой, несжимаемой жидкости.

В опытах использовалось 2 мл вакуумного масла ВМ-5 с добавлением масляной краски в количестве 0,05 гр., или алюминиевой пигментной пудры в количестве 0,005 гр.

Цилиндрическая емкость заполнялась маслом, толщина слоя которого выбиралась эмпирически и равнялась 1,0 мм, после чего емкость накрывалась стеклянной крышкой так, чтобы крышка соприкасалась с маслом. Дно емкости равномерно подогревалось электрической печью, в результате чего его температура поднималась до уровня  $140 \pm 1$  °С.

В ходе проведения экспериментов показано, что в тонком слое масла при подогреве снизу начинают образовываться обособленные ячейки цилиндрической формы, которые по аналогии с [7, 8] будем называть элементарными. Внутри каждой ячейки масло поднималось вверх по центру ячейки, и опускалось вниз по ее внешней границе.

На рис. 3. показаны фотографии цилиндрических конвективных ячеек в вакуумном масле с добавлением масляной краски. Их количество с увеличением температуры дна цилиндрической емкости от 82 °С до 110 °С растет, начиная от одной-двух ячеек и заканчивая плотной упаковкой в емкости с изменением цилиндрической формы на призматическую (на поверхности масла образуются многоугольники, формирующие в конце концов упорядоченную гексагональную структуру в виде ячеек Бенара. Измеренный диаметр конвективных ячеек варьировался в интервале 2,4–2,5 мм.

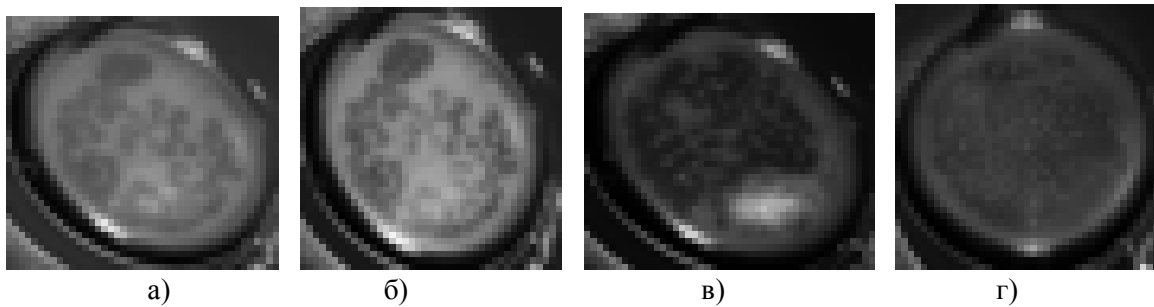


Рисунок 3 – Изменение количества ячеек в масле с добавлением масляной краски при варьировании температуры дна емкости:

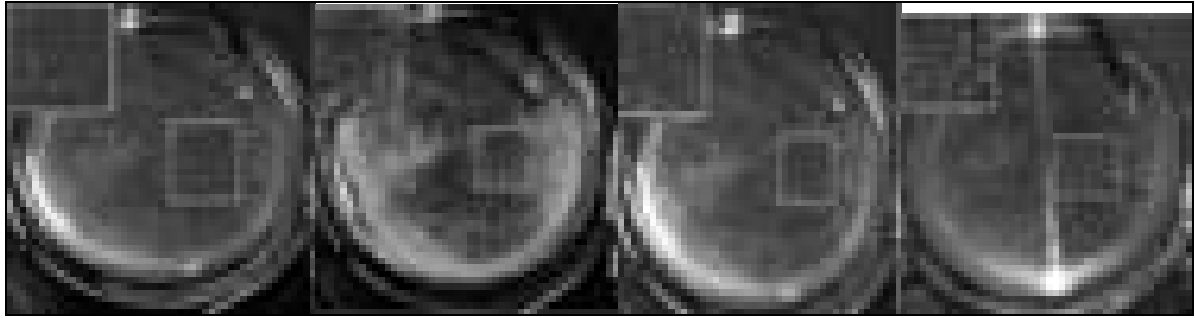
температура верхней границы масла и дна ёмкости соответственно

а) 81 и 91 °С, б) 85 и 96 °С, в) 92 и 110 °С, г) 97 и 110 °С

В экспериментах с алюминиевой пигментной пудрой цилиндрическая емкость заполнялась маслом, толщина слоя которого выбиралась эмпирически и равнялась  $h=1$  мм. Равномерный подогрев дна емкости осуществлялся электрической печью и поднималась до уровня  $130 \pm 1$  °С. В этих экспериментах также, как и в случае с добавлением масляной краски, зарождались элементарные конвективные ячейки. Динамика жидкости внутри каждой ячейки, и их переход в упорядоченную конвективную структуру повторяли динамику предыдущего эксперимента.

На рис. 4. показаны фотографии цилиндрических конвективных ячеек в вакуумном масле с добавлением алюминиевой пудры. Измеренный диаметр конвективных ячеек варьировался в интервале 2,6–2,7 мм.

На рис. 4. прямоугольниками выделены области, в которых наблюдается зарождение цилиндрических ячеек: сначала 3–5, затем 5–6, а на последних снимках – от 10–12 до 20. Видно, что ячейки имеют цилиндрическую форму, и разделены прослойками неподвижного масла определенной толщины.



а) б) в) г)

Рисунок 4 – Изменение количества ячеек в масле с добавлением алюминиевой пудры при варьировании температуры дна емкости:  
температура верхней границы масла и дна ёмкости соответственно  
а) 84 и 113 °С, б) 87 и 118 °С, в) 92 и 122 °С, г) 95 и 126 °С

Исходя из результатов экспериментов, можно сделать вывод, что при определенной температуре дна емкости в слое масла с добавкой такого небольшого количества масляной краски или алюминиевой пудры, что реализуются твердые граничные условия (верхнюю часть емкости накрывали стеклом), появляются обособленные элементарные конвективные ячейки цилиндрической формы. С увеличением температуры дна емкости количество элементарных цилиндрических конвективных ячеек увеличивается вплоть до полного заполнения ими объема масла с переходом в упорядоченную структуру в виде ячеек Бенара. Независимо от вида добавленной дисперсной фазы (масляная краска или алюминиевая пудра), отношение диаметра элементарных конвективных ячеек к толщине слоя варьируется от 2,65 до 2,83, т.е. безразмерный диаметр ячеек со смешанными граничными условиями меньше диаметра элементарной конвективной ячейки со свободными границами, который примерно равен 3,4 [7, 8].

### Заключение

Экспериментальные исследования формирования конвективных ячеек в горизонтальном, подогреваемом снизу слое вакуумного масла для смешанных граничных условий (верхняя граница свободная, нижняя – твердая) проведены для двух вариантов визуализации процесса.

Первый вариант реализации смешанных граничных условий заключался в использовании в качестве однофазной вязкой среды вакуумного масла ВМ–5 с добавлением в него, для визуализации, небольшого количества (50–100 мг) масляной краски белого цвета, размер частиц которой достаточно мал – менее 15 мкм.

Второй вариант заключался в добавлении в масло небольшого количества алюминиевой пудры (5 мг). Микроскопическими исследованиями показано, что малые количества добавленной алюминиевой пудры не изменяют вязкость и плотность масла. Таким образом, масло представляет собой однофазную среду, в которой реализуются граничные условия на твердой стенке. В экспериментах показано, что при определенной температуре дна емкости в слое масла с добавкой небольшого количества масляной краски или алюминиевой пудры появляются обособленные ячейки цилиндрической

форми. С увеличением температуры дна емкости количество ячеек увеличивается вплоть до полного заполнения ими объема масла с переходом в упорядоченную структуру в виде ячеек Бенара. Независимо от вида добавленной дисперсной фазы, безразмерный (отнесенный к толщине слоя масла) диаметр ячеек варьируется в пределах от 2,65 до 2,83.

#### Литература

1. Chandrasekhar S. Hydrodynamic and hydromagnetic stability / S. Chandrasekhar. – Oxford University Press, 1970. – 657 p.
2. Неклюдов И.М. Прикладная гидромеханика / И.М Неклюдов, Б.В Борц., В.И.Ткаченко – ХНУ им. В.Н. Каразина, Том. 14(86), № 2,2012 – С. 29–40.
3. Щука А.А. Нанoeлектроника / А.А. Щука. – М.: Физматкнига, 2007. – 464 с.
4. Сажин Б.С. Сушка и промывка текстильных материалов: теория, расчет процессов / Б.С. Сажин, В.А. Реутский – М. : Легпромбытиздат, 1990. – С. 17–66.
5. Мюллер Г. Выращивание кристаллов из расплава. Конвекция и неоднородности / Г. Мюллер; [пер. с англ. В. Бунэ]. – М.: Мир, 1991. – 143 с.
6. Ходаков Г.С. Реология суспензий. Теория фазового течения и ее экспериментальное обоснование / Г. С. Ходаков // Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева). – 2003. Том. XLVII. № 2. с. 33–44.
7. Bozbey L.S. Elementary convective cell in the layer of incompressible, viscous liquid and its physical properties / L.S. Bozbey, A.O. Kostikov, V.I. Tkachenko // International conference MSS-14 «Mode conversion, coherent structures and turbulence». – Space Research Institute, Moscow, 2014. – P. 322–328.
8. Experimental study of liquid movement in free elementary convective cells / L. Bozbiei, B. Borts, Yu. Kazarinov, A. Kostikov, V. Tkachenko // Energetika. – 2015. – Т 61, № 2. – P. 45–56.

#### Bibliography (transliterated)

1. Chandrasekhar S. Hydrodynamic and hydromagnetic stability / S. Chandrasekhar Oxford University Press, 1970. – 657 p.
2. Neklyudov I.M. Prikladnaya gidromehanika / I.M Neklyudov, B.V Borts., V.I.Tkachenko – HNU im. V.N. Karazina, Tom. 14(86), № 2,2012. – P. 29–40.(in Russian).
3. Schuka A.A. Nanoelektronika / A.A. Schuka fizmatkniga,ucheb.posobie dlya vuzov, 2007. – 464 p. (in Russian).
- 4.Sazhin B.S. Sushka i promyivka tekstilnyih materialov: teoriya, raschet protsessov / B.S. Sazhin, V.A. Reutskiy – M. : Legprombytizdat, 1990. – P. 17–66. (in Russian).
5. Myuller G. Vyirashivanie kristallov iz rasplava. Konvektsiya i neodnorodnosti / G. Myuller; [per. s angl. V. Bune]. – M.: Mir, 1991. – 143 p. (in Russian).
6. Hodakov G.S. Reologiya suspenziy. Teoriya fazovogo techeniya i ee eksperimentalnoe obosnovanie / G.S. Hodakov // Ros. him. zh. (Zh. Ros. him. ob-va im. D.I. Mendeleeva). –2003. Tom. XLVII. № 2. p. 33–44. (in Russian).

7. Bozbey L.S. Elementary convective cell in the layer of incompressible, viscous liquid and its physical properties / L.S. Bozbey, A.O. Kostikov, V.I. Tkachenko // International conference MSS-14 «Mode conversion, coherent structures and turbulence». – Space Research Institute, Moscow, 2014. – P. 322–328.

8. Experimental study of liquid movement in free elementary convective cells / L. Bozbiei, B. Borts, Yu. Kazarinov, A. Kostikov, V. Tkachenko // Energetika. – 2015. – Т 61, № 2. – P. 45–56.

УДК 621.384.6:620.198

Андреева О.Л., Борц Б.В., Костіков А.О., Ткаченко В.І.

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕМЕНТАРНОЇ КОНВЕКТИВНОЇ КОМІРКИ З ТВЕРДИМИ І ЗМІШАНИМИ ГРАНИЧНИМИ УМОВАМИ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМУ ШАРІ В'ЯЗКОЇ НЕСТИСКУВАНОЇ РІДИНИ**

Наведено результати експериментальних досліджень формування конвективних комірок із змішаними граничними умовами у вакуумній оливі. Показано, що малі кількості доданої дисперсної фази (алюмінієва пудра) не змінюють в'язкість і щільність олива, і в таких умовах застосовні граничні умови на твердій стінці для швидкості рідини.

Andreeva O.L., Borts B.V., Kostikov A.O., Tkachenko V.I.

**EXPERIMENTAL STUDY OF FORMATION ELEMENTARY CONVECTION CELL IN THE HORIZONTAL LAYER OF VISCOUS INCOMPRESSIBLE LIQUID WITH RIGID AND MIXED BOUNDARY CONDITIONS**

The result of experimental study of convection cells formation of vacuum oil with mixed boundary conditions was presented. The adding small amounts of dispersed phase (aluminum powder) the viscosity and density of the oil didn't change and under such conditions the boundary conditions for liquid velocity on a rigid boundary can be applied was shown. The experiments demonstrated that exceeding the certain temperature of the container bottom cells of cylindrical shape start to appear in the oil layer with small addition of dispersed phase (oil paint or aluminum powder). The process of appearing of cells finished when the number of cells increases up to the complete filling of oil volume. When amount of the added dispersed phase are small regardless of the its type a rigid boundary conditions can be applied for the lower boundary, i.e. the mixed boundary conditions are present in the layer was shown. The diameter of cells with the mixed boundary conditions varies from 2,65 to 2,83 mm, which is less than the diameter of a cell with free boundary conditions.