

УДК 532.5:532.5.013.4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОЛЩИНЫ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ НА УСТОЙЧИВОСТЬ И СТРУКТУРУ ТЕЧЕНИЯ В ДВУХСЛОЙНОЙ СИСТЕМЕ ЖИДКОСТЬ — ГАЗ

А. И. Мизёв

Пермский государственный университет, 614990 Пермь
E-mail: mizev@psu.ru

Экспериментально исследована устойчивость двухслойной системы жидкость — газ при переменном соотношении толщин слоев фаз. Обнаружена зависимость критического значения числа Марангони и характерного размера конвективных структур от соотношения толщин газовой и жидкой фаз. Показано, что при соотношении, большем десяти, газовый слой можно рассматривать как бесконечный.

Ключевые слова: термокапиллярная конвекция, двухслойная система.

Введение. Известно, что неоднородное распределение температуры или плотности поверхностно-активных веществ на свободной поверхности жидкости или на границе двух однородных несмешивающихся жидкостей приводит к появлению касательных напряжений, вызывающих движение жидкости. История исследований этого явления восходит еще к пионерским работам Пирсона, Стерлинга и Скривена. Однако, несмотря на более чем столетнюю историю вопроса, интерес к изучению процессов, происходящих вблизи поверхностей раздела фаз, не только не угас, но и получил в последнее время новое, качественное развитие (подробные исторические обзоры содержатся в [1, 2]). Это объясняется тем, что рассматриваемые эффекты могут оказывать существенное влияние на интенсивность многих процессов тепло-массо-переноса через поверхности раздела гетерогенных веществ, используемых в химической, металлургической, энергетической и других отраслях промышленности. Особое значение исследования в данной области имеют в связи с развитием технологий космического материаловедения в силу негравитационного характера поверхностных эффектов. Кроме того, интерес к изучению явлений межфазной конвекции стимулирован современными достижениями в таких научных направлениях, как теория самоорганизации в неравновесных системах, синергетика, а также теория колебаний и динамика нелинейных систем.

Большинство работ посвящено исследованию неустойчивости Марангони в плоских слоях жидкости, что связано как с простотой реализации теоретических и экспериментальных методов исследований, так и с широким использованием устройств данной геометрии в технологических процессах. При этом обычно предполагается, что слой жидкости граничит с полубесконечным слоем газа, тепловыми и вязкими свойствами которого обычно пренебрегается. Учет свойств газовой фазы сводится к варьированию граничных условий для температуры на верхней границе слоя жидкости. Решение задачи в такой классической постановке [3–6] показывает, что наиболее опасны возмущения, приводящие

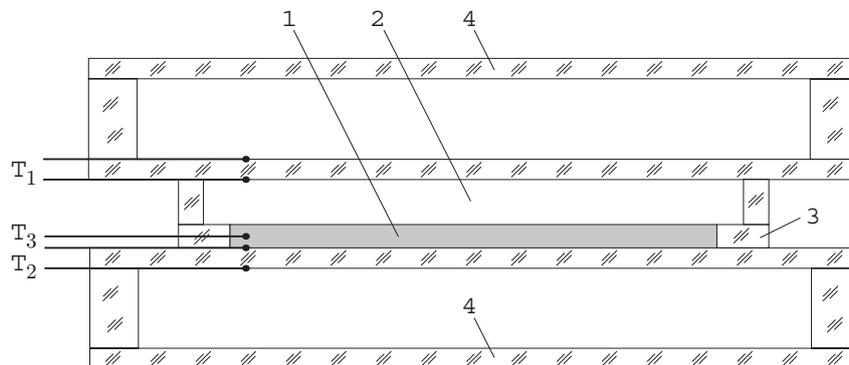


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — слой жидкости; 2 — слой газа; 3 — рамка; 4 — теплообменники

к возникновению гексагональной, ячеистой структуры течения, что подтверждается экспериментальными результатами.

Однако, как показывает обзор работ по данной тематике, имеется ряд экспериментальных исследований [7, 8], в ходе которых наблюдались и другие надкритические структуры течения. Авторами этих работ предложено несколько возможных причин расхождения с теорией, одна из которых предполагает необходимость учета характеристик газовой фазы. Это инициировало появление теоретических работ [9, 10], в которых изучалась устойчивость двухслойной системы жидкость — газ в условиях однородного вертикального градиента температуры. Оказалось, что на устойчивость влияют соотношение размеров и теплофизические параметры газовой и жидкой фаз. В [10] исследовалось влияние соотношения размеров и теплопроводностей газовой и жидкой фаз на порог устойчивости и пространственно-временные характеристики конвективных течений, возникающих в слое жидкости. В работе [10] сделан вывод об уменьшении критического числа Марангони при уменьшении толщины газовой фазы и смещении наиболее опасных возмущений в длинноволновую область, а также приведена карта устойчивости, иллюстрирующая области существования различных надкритических течений.

Экспериментальные исследования двухслойных систем проводились либо для случая двух жидких фаз, либо для систем жидкость — газ, но при этом вопрос о влиянии толщины воздушного слоя отдельно не рассматривался. Систематического экспериментального изучения устойчивости системы жидкость — газ в условиях сравнимых толщин фаз не проводилось.

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования устойчивости двухслойной системы жидкость — газ. Изучено влияние отношения толщин слоев на порог устойчивости и структуру конвективного течения.

Экспериментальная установка и методика измерений. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Конвективная камера, содержащая слои жидкости 1 и газовой фазы 2, ограничена с торцов прозрачной плексигласовой рамкой 3 с внутренними размерами 220×220 мм. Рамка состоит из двух частей, каждая из которых задает толщину фаз. Толщина слоя жидкости оставалась постоянной и равной 4 мм. В экспериментах использовались ограничивающие рамки с соотношением толщин жидкой и газовой фаз $1 : 1$, $1 : 2$, $1 : 3$, $1 : 4$, $1 : 10$, рассматривался также случай неограниченной газовой фазы. Сверху и снизу камера ограничена прозрачными плексигласовыми теплообменниками 4, температура которых поддерживалась постоянной с помощью двух водяных ультратермостатов.

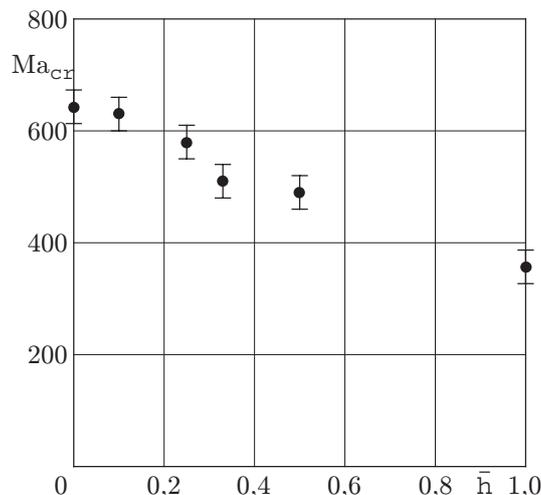


Рис. 2. Зависимость критического значения числа Марангони от отношения толщин жидкой и газовой фаз

В качестве рабочей жидкости использовался *n*-декан. Выбор данной жидкости обусловлен следующими соображениями. Коэффициент поверхностного натяжения жидкости не должен быть слишком большим для предотвращения появления на границе раздела адсорбированной пленки поверхностно-активного вещества, которая может ослабить или сделать невозможным возникновение термокапиллярной конвекции. Жидкость должна быть однородной, так как наличие примесей органических соединений с большей длиной углеродного радикала, имеющих, как правило, меньший коэффициент поверхностного натяжения, может приводить к образованию адсорбированных пленок. Наличие таких пленок может уменьшить интенсивность конвективных потоков на поверхности либо привести к их полной стабилизации. Зависимость коэффициента поверхностного натяжения от температуры должна быть достаточно сильной для достижения течений значительной интенсивности. Жидкость не должна быть сильно летучей, так как это может привести к заметному изменению толщины исследуемого слоя рабочей жидкости за время проведения эксперимента. Интенсивное испарение также может привести к появлению больших градиентов поверхностного натяжения, связанных с неоднородным испарением с поверхности. Указанным требованиям удовлетворяет *n*-декан с коэффициентом поверхностного натяжения 23,9 мН/м (при 20 °С) и температурным коэффициентом поверхностного натяжения 0,092 мН/(м·К).

В процессе проведения экспериментов дифференциальными медьконстантановыми термопарами измерялась температура горизонтальных границ полости (T_1 и T_2 на рис. 1), перепады температуры на горизонтальной стенке теплообменника со стороны жидкости (T_2) и на полутолщине жидкого слоя (T_3). Измерение отношения T_2/T_3 позволяет зафиксировать кризис теплового потока с целью определения критического градиента температуры, соответствующего возникновению конвективного течения в жидкости. Добавление в исследуемую жидкость малого количества светорассеивающих частиц (алюминиевой пудры) позволяет наблюдать структуры конвективных течений.

Результаты экспериментального исследования. Эксперименты показали, что уменьшение толщины газовой фазы приводит к уменьшению критического вертикального градиента температуры, при котором возникает конвективное движение. На рис. 2 представлена зависимость критического числа Марангони от отношения \bar{h} толщин жидкой и газовой фаз. Случай $\bar{h} = 0$ соответствует бесконечно большой толщине газовой фазы.

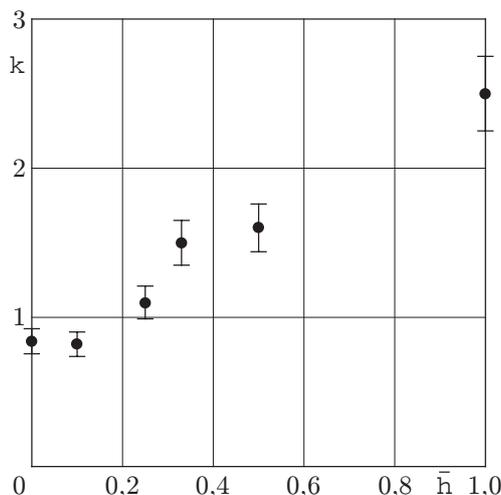


Рис. 3. Зависимость безразмерного волнового числа от отношения толщин жидкой и газовой фаз

Число Марангони вычислено по формуле

$$\text{Ma} = A\sigma_T h^2 / (\eta\chi),$$

где A — градиент температуры в слое жидкости; $\sigma_T = 0,092$ мН/(м·К) — температурный коэффициент поверхностного натяжения; h — толщина жидкого слоя; $\eta = 0,91$ Па·с — динамическая вязкость жидкости; $\chi = 5,6 \cdot 10^{-7}$ м²/с — температуропроводность жидкости.

На рис. 2 видно, что критическое значение числа Марангони перестает меняться, когда толщина газовой фазы примерно в десять раз больше толщины жидкого слоя. Таким образом, при большей толщине слой газа можно рассматривать как бесконечный.

Визуальные наблюдения структуры конвективного течения показывают, что течение жидкости имеет гексагональную структуру l -типа при любом соотношении толщин фаз жидкости. Жидкость поднимается в центре ячейки и опускается на ее краях. При этом с уменьшением толщины газового слоя изменяется характерный размер конвективных структур. На рис. 3 представлена зависимость безразмерного волнового числа от соотношения толщин жидкой и газовой фаз. Волновое число определялось по формуле

$$k = 2\pi h / \lambda,$$

где λ — характерный размер ячейки, в качестве которого выбрано расстояние между противоположными гранями гексагона. Видно, что с уменьшением толщины газового слоя размер конвективных структур уменьшается.

ЛИТЕРАТУРА

1. Герцуни Г. З., Жуховицкий Е. М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М.: Наука, 1972.
2. Гидромеханика межфазных поверхностей / Сост. Ю. А. Бувевич, Л. М. Рабинович. М.: Мир, 1984.
3. Palm E. On the tendency towards hexagonal cells in steady convection // J. Fluid Mech. 1960. V. 8. P. 183–192.
4. Busse F. H. Non-linear properties of thermal convection // Repts Progr. Phys. 1978. V. 41, N 12. P. 1929–1967.

5. **Busse F. H.** The stability of finite amplitude cellular convection and its relation to an extremum principle // J. Fluid Mech. 1967. V. 30, N 4. P. 625–649.
6. **Segel L. A., Stuart J. T.** On the question of the preferred mode in cellular thermal convection // J. Fluid Mech. 1962. V. 13, N 2. P. 289–306.
7. **Daniels P. G.** Roll-pattern evolution in finite-amplitude Rayleigh — Benard convection in a two-dimensional fluid layer bounded by distant sidewalls // J. Fluid Mech. 1984. V. 143. P. 125–152.
8. **Teschke O., Kleinke M., Tenan M., et. al.** Surface tension-induced convection as a particle aggregation mechanism // J. Colloid Interface Sci. 1992. V. 151. P. 477–484.
9. **Simanovskii I. B., Nepomnyashchy A. A.** Convective instabilities in systems with interface. London: Gordon and Breach, 1993.
10. **Golovin A. A., Nepomnyashchy A. A., Pismen L. M.** Pattern formation in large-scale Marangoni convection with deformable interface // Physica D. 1995. V. 81, N 1/2. P. 117–147.

*Поступила в редакцию 11/VIII 2003 г.,
в окончательном варианте — 8/XII 2003 г.*
