

УДК 532.5; 532.6

УСТОЙЧИВОСТЬ И СТРУКТУРА КОНВЕКТИВНЫХ ТЕЧЕНИЙ, ИНДУЦИРОВАННЫХ ЛОКАЛЬНОЙ НЕОДНОРОДНОСТЬЮ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНОГО ВЕЩЕСТВА ВБЛИЗИ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА

© 2011 г.

А.И. Мизёв

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

alex_mizev@icmm.ru

Поступила в редакцию 24.08.2011

Представлены результаты экспериментального и теоретического исследования задачи о возникновении и устойчивости конвективного течения, индуцированного локальной неоднородностью распределения поверхностно-активного вещества (ПАВ) вблизи свободной поверхности. Показано, что в зависимости от величины концентрационного динамического числа Бонда взаимодействие гравитационной и концентрационно-капиллярной конвекции может приводить к возникновению как стационарного, так и колебательного режима конвекции. Период колебаний наблюдаемого течения существенно зависит от соотношения чисел Грасгофа и Марангони и от соотношения геометрических размеров задачи (глубина погружения и размер источника). Также представлены результаты экспериментального исследования развития конвективного движения при наличии стока ПАВ вблизи границы раздела.

Ключевые слова: межфазная поверхность, концентрационно-капиллярная конвекция Марангони, массоперенос, устойчивость течения, поверхностно-активные вещества.

Эксперименты проводились в ячейке Хеле–Шоу размерами $9 \times 4.5 \times 0.38$ см, параллельные стенки которой образуют ячейку интерферометра Физо, собранного по автоколлимационной схеме. Интерференционная картина, отражающая распределение концентрации ПАВ в объеме жидкости, наблюдалась в отраженном свете. Добавление светорассеивающих частиц (полые стеклянные посеребренные сферические частицы размером 10 мкм) и применение стандартной методики светового ножа позволяло визуализировать поле скорости в ячейке. Специально разработанный анемометрический датчик малого размера позволял измерять скорость конвективного течения в выделенной точке кюветы. В качестве окружающей жидкости использована вода высокой степени очистки. Капли одноатомных спиртов, членов одного гомологического ряда (от бутанола до гептанола), расположенные под поверхностью воды, выполняли роль источника ПАВ. Капля формировалась на конце тонкой иглы, помещаемой в ячейку через специальное отверстие в дне. В ходе проведения эксперимента задавался размер капли и глубина ее погружения и проводились наблюдения и измерения распределения концентрации ПАВ и скорости конвективного течения.

Теоретически в двумерной постановке рассмотрена задача о концентрационной конвекции

в плоском горизонтальном слое со свободной верхней границей, на дне которого находится локализованный источник растворимого ПАВ, имеющего меньшую по сравнению с окружающей жидкостью плотность. Поверхностное натяжение на свободной границе и плотность жидкости линейно зависят от концентрации ПАВ. Движение жидкости опишем в переменных функции тока ψ , вихря φ и концентрации ПАВ c , используя приближение Буссинеска:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial \varphi}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial \varphi}{\partial y} = \Delta \varphi - Gr \frac{\partial c}{\partial x},$$

$$\Delta \psi = -\varphi, \quad \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial c}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial c}{\partial y} = Sc^{-1} \Delta c,$$

$$y = 0: \quad \psi = 0, \quad \frac{\partial \psi}{\partial y} = 0, \quad c = \sqrt{6/\pi} \exp\left(-\frac{3x^2}{2r^2}\right);$$

$$x = \pm L: \quad \psi = 0, \quad \frac{\partial \psi}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial c}{\partial x} = 0;$$

$$y = 1: \quad \psi = 0, \quad \varphi = MaSc^{-1} \frac{\partial c}{\partial x}, \quad \frac{\partial c}{\partial y} = 0;$$

$$Gr = \frac{g\beta C_0 h^3}{\nu^2}, \quad Sc = \frac{\nu}{D}, \quad Ma = \frac{\sigma_1 C_0 h}{\rho \nu D}.$$

Нестационарная краевая задача решалась методом конечных разностей на квадратных сетках $200 \times 40 - 800 \times 160$ по неявной схеме Кранка –

Николсона. Решение уравнения Пуассона для функции тока находилось методом последовательной верхней релаксации.

Результаты лабораторного и численного экспериментов показывают, что в зависимости от соотношения интенсивности гравитационной и капиллярной конвекции наблюдаются как стационарный, так и колебательный режимы конвекции. По аналогии с тепловыми задачами можно ввести концентрационное динамическое число Бонда $Bo_{dyn}^c = \rho g \beta_c h^2 / \sigma_c$, показывающее соотношение этих двух сил. Обнаружено, что при относительно малых значениях числа Бонда (в экспериментах соответствует высшим спиртам – от гексанола и выше) в системе наблюдается только колебательный режим конвективного движения. Рисунок 1 иллюстрирует изменение скорости конвективного потока со временем, полученное в экспериментах (рис. 1а, ПАВ – гексанол) и при численном счете (рис. 1б, $Ma = 10^7$, $Gr = 500$).

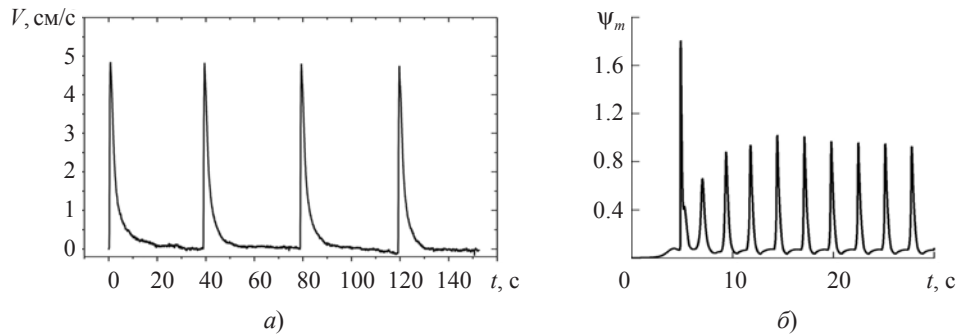


Рис. 1

Период колебаний существенно зависит от соотношения чисел Грасгофа и Марангони (в эксперименте – от используемого ПАВ) и от соотношения геометрических размеров задачи (глубина погружения h и размер источника D). Однако период колебаний, нормированный по числу Бонда, оказывается одинаковым для всех использованных в эксперименте ПАВ при фиксированном геометрическом соотношении.

На рис. 2 представлен график зависимости безразмерного периода колебаний (по вязкому времени), умноженного на число Бонда (параметр K), от соотношения размера источника к глубине его погружения для различных ПАВ (кривая 1 – гексанол, 2 – пентанол, 3 – бутанол). Здесь же для сравнения представлена аналогичная зависимость, полученная в численном эксперименте ($Ma = 10^8$, кресты на графике соответствуют $Gr = 100$, ромбы – $Gr = 200$).

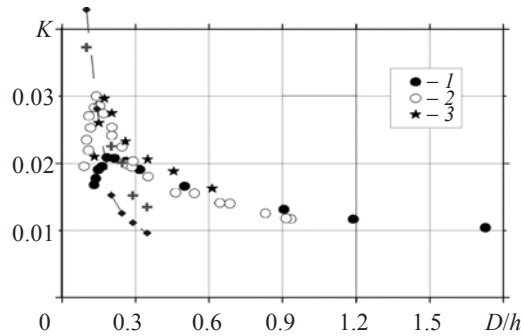


Рис. 2

Увеличение числа Бонда (увеличение вклада свободно-конвективного механизма по сравнению с концентрационно-капиллярным) приводит к появлению области существования стационарной конвекции, расширяющейся при дальнейшем увеличении этого управляющего параметра.

Экспериментально исследовано развитие конвективного движения при наличии стока ПАВ

вблизи границы раздела. Показано, что экспериментально такая ситуация аналогична источнику более легкого поверхностно-инактивного вещества (ПИАВ).

В качестве источника ПИАВ использованы капли воды, погруженные в хлороформ или бензиловый спирт. Обнаружена существенная разница в поведении изучаемой системы для случаев источника и стока поверхностно-активного вещества. В последнем случае ПИАВ не выходит на поверхность (что энергетически не выгодно системе), оставаясь в объеме. Конвекции Марангони при этом не возникает.

Соавторами работы являются Р.В. Бирих, Е.С. Мазунина, Р.Н. Рудаков.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 11-01-00524), совместного проекта институтов СО, УрО и ДВО РАН № 116 / 09-С-1-1005 и ФЦП (ГК № 14.740.11.0352).

STABILITY AND FLOW STRUCTURE OF CONVECTIVE MOTION INDUCED BY A LOCALIZED SURFACTANT DISTRIBUTION INHOMOGENEITY IN THE VICINITY OF THE INTERFACE*A.I. Mizev*

The paper presents the results of the experimental and theoretical study of the onset and stability of a solutal (buoyancy and Marangoni) convection induced by a localized source of surface-active substance in the vicinity of the interface. It was shown that, depending on dynamic Bond number value, the interaction between the buoyancy and solutocapillary convection can lead to the onset either of oscillatory convection or stationary one. The period of the observed oscillations appreciably depends on the relation of Grasshoff and Marangoni numbers and on the aspect ratio. Author presents also the results of the experimental study of the onset of convective motion induced by a sink of a surfactant placed under an interface.

Keywords: interface, solutocapillary Marangoni convection, mass transfer, flow stability, surface-active substance.