

УДК 532.516;532.68

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИОННО-КАПИЛЛЯРНОЙ КОНВЕКЦИИ В ВОДЕ И ЕЕ РАСТВОРАХ

© 2011 г.

М.О. Денисова

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

maria.denisova@icmm.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

Использование интерферометрии позволило объяснить пороговый характер развития конвекции Марангони – эффект, неоднократно наблюдаемый в экспериментах, но противоречащий традиционным представлениям о возникновении движения в ньютоновских жидкостях. Оказалось, что необходимость создания определенного градиента поверхностного натяжения для развития конвекции Марангони обусловлена наличием на свободной границе жидкости адсорбированного слоя неконтролируемых примесей [1]. Разрушение структуры этого слоя происходит только при появлении перепада концентрации поверхностно-активного вещества (ПАВ) в несколько процентов. Обсуждаются результаты экспериментального изучения развития конвекции Марангони на свободной поверхности воды при локальном введении водных растворов ПАВ. В качестве ПАВ использовались одноатомные спирты, образующие гомологический ряд. В результате серии опытов найдены пороговые значения перепада концентрации и определен порядок критических чисел Марангони. Обнаружено, что высота порога быстро убывает не только с возрастанием длины молекулы ПАВ, но и с увеличением характерных размеров свободной поверхности.

Ключевые слова: интерферометрические методы, поверхностно-активные веществ, поверхностные явления, конвекция Марангони.

Как было установлено в ряде экспериментальных работ, капиллярное движение на поверхности ньютоновских жидкостей начинается только при достижении определенного перепада поверхностного натяжения [2, 3]. Наблюдаемый эффект противоречит традиционным представлениям, согласно которым свободная поверхность ньютоновских жидкостей приходит в движение при появлении сколь угодно малых напряжений сдвига.

Для выяснения причин этого эффекта исследовано развитие конвекции Марангони в вертикальных ячейках Хеле–Шоу с толщиной b от 1.2 до 20 мм. Капиллярное движение вызывалось локальным введением микродозы (~ 5 мкр) водного раствора контролируемого ПАВ с концентрацией C_d на свободную поверхность воды или водного раствора этого же ПАВ с меньшей концентрацией C_s . В качестве ПАВ использовались спирты из одного гомологического ряда. Возникшее в приповерхностном слое воды концентрационное поле визуализировалось интерференционным методом. Благодаря значительному преобладанию характерных диффузионных времен над вязкими (числа Шмидта $Sc \sim 1200-2000$) изолинии поля концентрации были «вморожены» в движущийся объем жидкости, что позволяло судить о структуре течения в объеме жидкости.

Эксперимент показал, что развитие конвекции Марангони при локальном введении ПАВ на свободную горизонтальную поверхность воды действительно имеет пороговый характер (рис. 1).

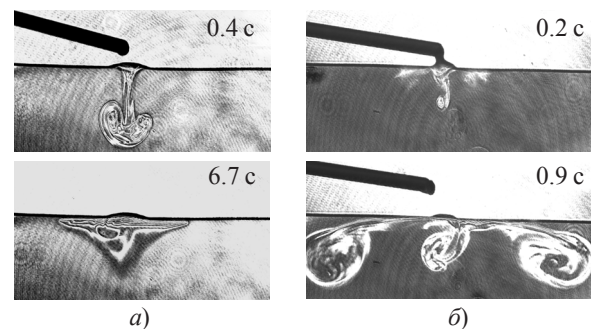


Рис. 1. Внесение капли раствора изопропилового спирта с $C_d = 2\%$ (а) и $C_d = 3\%$ (б) на свободную поверхность воды в ячейке $b = 1.2$ мм

Аналогично было обнаружено, что величина пороговой концентрации ПАВ ΔC ($\Delta C = C_d - C_s$) быстро уменьшается с увеличением концентрации спирта как в капле, так и в базовой жидкости. Величина порога по концентрации уменьшается с увеличением толщины ячейки (рис. 2). В обоих случаях нулевого значения порога достигнуть не удается. Как видно из рис. 2, высота порога существенно зависит от степени предварительной

очистки воды. Полученные результаты подтверждают гипотезу о том, что причиной порогового развития капиллярной конвекции является наличие пленки из неконтролируемых примесей, адсорбированных на свободной поверхности жидкости. Предварительное растворение спирта в воде, заполняющей ячейку Хеле–Шоу, частично разрушает пленку примесей, облегчая ее деформацию при внесении спирта в виде капли.

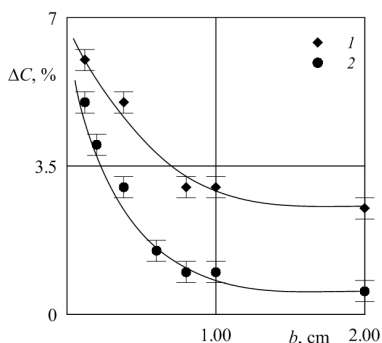


Рис. 2. Зависимость пороговой концентрации спирта в капле от толщины кюветы при разной очистке воды
1 – дистиллят; 2 – деионизированная вода

Применение различных спиртов позволило оценить влияние таких свойств, как поверхностная активность и растворимость ПАВ, на пороговое развитие капиллярной конвекции. Так, найдены критические значения перепада концентрации (рис. 3), определен порядок соответствующих чисел Марангони ($Ma \sim 10^7$) [4].

С помощью хроматографии было установлено, что в роли неконтролируемых поверхностно-активных примесей выступают высокомолекулярные органические соединения. Температура кипения данных веществ достаточно высока и они

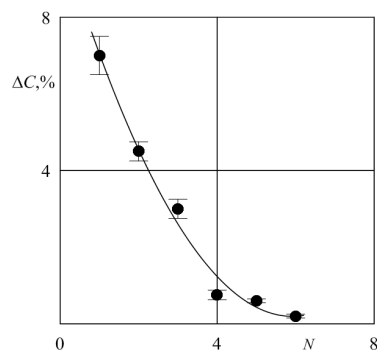


Рис. 3. Зависимость пороговой концентрации от количества групп CH_2 в молекуле ПАВ

не могут быть удалены из воды путем дистилляции и даже многократной деионизации. Однако результаты выполненного эксперимента показывают, что добавление малых количеств низкомолекулярных ПАВ в воду является эффективным способом управления величиной порога для развития капиллярного движения. Сделанное предположение подтверждается тестовыми опытами с другими жидкостями.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 09-01-00484), ФЦП (ГК № 14.740.11.0352) и Программы ОЭМПУ РАН № 09-Т-1-1005.

Список литературы

1. Денисова М.О., Костарев К.Г. // Конвективные течения. Вып. 4. ПГПУ. Пермь, 2009. С. 85–106.
2. Lewis J.B., Pratt H.R.C. // Nature. 1953. V. 171. P. 1155–1161.
3. Birikh R.V., Zuev A.L., Kostarev K.G., Rudakov R.N. // Fluid Dynamics. 2006. V. 41, No 4. P. 514–520.
4. Mizev A. et al. // Eur. Phys. J. ST. 2011 (in press).

DETERMINING THE CONDITIONS FOR THE INITIATION OF THE SOLUTO-CAPILLARY CONVECTION IN WATER AND WATER SOLUTIONS

M.O. Denisova

Interferometry has supplied a plausible explanation of the threshold development of the Marangoni convection - the effect repeatedly observed in experiments but contradictive to the traditional notions of motion initiation in the Newtonian fluids. It has been found that the appearance of a certain surface tension gradient required for initiation and development of the Marangoni convection is related to the formation of the adsorbed layer of uncontrolled impurities at the free surface of the fluid. Deformation of this layer occurs when the difference in the surfactant (surface-active substance) concentration reaches several percents. In this paper, we discuss the results of experimental investigation of the Marangoni convection initiated at the free surface of water by local injection of the aqueous solutions of the surfactants. For a surfactant we used monoatomic alcohols belonging to one homological series. A series of experiments have been carried out to define the threshold values of the concentration difference and the order of magnitude of the critical Marangoni numbers. It has been found that the threshold value decreases with increasing length of the surfactant molecules and characteristic dimensions of the free surface.

Keywords: interferometric methods, surface-active substances, surface phenomena, Marangoni convection.