

УДК 532.5; 532.6

## КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ КОНЦЕНТРАЦИОННОЙ КОНВЕКЦИИ И ОСОБЕННОСТИ ПОСТАНОВКИ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ НА МЕЖФАЗНЫХ ГРАНИЦАХ

© 2011 г.

*Р.В. Бирих*

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

rbirikh@mail.ru

*Поступила в редакцию 16.05.2011*

Концентрационная конвекция в связи с большим диффузионным временем обладает рядом существенных отличий от тепловой конвекции [1, 2], которые усиливаются при наличии границ раздела жидких фаз. Объемная достаточно медленная гравитационная конвекция поставляет поверхностно активное вещество (ПАВ) к межфазной поверхности, вызывая тем самым вспышки интенсивной конвекции Марангони. Как показывают эксперименты, одновременное существование концентрационной гравитационной и капиллярной конвекции обычно приводит к возникновению колебательного режима. Демонстрируются несколько систем, в которых экспериментально наблюдались колебательные режимы концентрационной конвекции. Другая особенность концентрационной конвекции при наличии межфазных границ связана с тем, что выход молекул ПАВ на границу имеет механизм, отличный от формирования возмущения температуры поверхности. На свободной границе жидкости образуется поверхностная фаза, в которой концентрация ПАВ определяется конкуренцией адсорбционного и десорбционного процессов. Поэтому концентрационная конвекция Марангони возникает по другой схеме, чем термокапиллярная конвекция, и начинается, как показывают эксперименты, при достижении на поверхности некоторого конечного градиента концентрации ПАВ [3]. Величина критического градиента ПАВ зависит от степени предварительной очистки жидкости, но в наших экспериментах не удавалось довести ее до нуля. Это заставляет при численном моделировании поверхностной фазы приписывать ей «бингамовские» свойства – элементы поверхностной фазы приходят в движение при превышении касательными напряжениями некоторого предельного значения.

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

### Конвекция около пузырьков и капель

В случае концентрационно-капиллярной конвекции, несмотря на сходство движущих сил с тепловой конвекцией, характер течения жидкости оказывается другим. Отличие, в первую очередь, связано с тем, что время диффузии ПАВ превышает времена диффузии тепла на 2–3 порядка. Соответственно, концентрационные неоднородности оказываются «вмороженными» в линии тока, переносятся с жидкостью и существуют значительно дольше тепловых возмущений. В приводимых экспериментах демонстрируется, как конкуренция медленной гравитационной конвекции с интенсивной конвекцией Марангони приводит к возникновению колебательного режима.

На рис. 1 показаны интерферограммы поля концентрации ПАВ в горизонтальном узком канале, перекрытом каплей хлорбензола, в который под влиянием гравитационной конвекции втекает водный раствор изопропилового

спирта (светлые линии – линии постоянной концентрации).

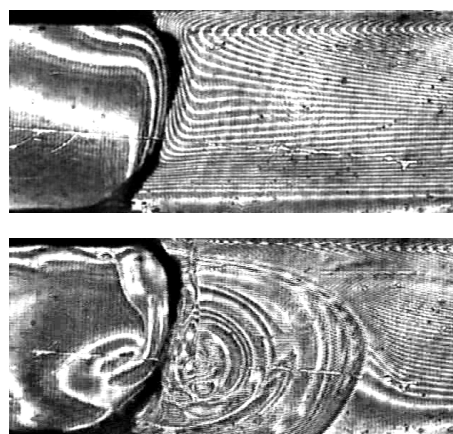


Рис. 1

Интервал времени между кадрами составляет 1 с. Хорошо видно, как вспыхнувшая конвекция Марангони перемешивает жидкость (правый кадр), разрушая созданное гравитаци-

онной конвекцией поле концентрации. Аналогичными свойствами обладает конвективное течение, вызванное затопленными под межфазной поверхностью источниками ПАВ.

Отличие концентрационной конвекции от тепловой при наличии межфазных поверхностей обуславливается еще тем, что механизм выхода молекул ПАВ на поверхность отличается от механизма формирования возмущения температуры поверхности. На межфазной границе образуется поверхностная фаза, в которой концентрация ПАВ определяется конкуренцией адсорбционного и десорбционного процессов. Перенос ПАВ в объемной фазе определяет лишь концентрацию ПАВ вблизи поверхностной фазы. Поэтому концентрационная конвекция Марангони возникает по другой схеме, чем термокапиллярная конвекция, и начинается, как показывают эксперименты, при достижении на поверхности некоторого конечного градиента концентрации ПАВ. Такая задержка хорошо видна на левом кадре рис. 1. На границе жидкостей виден градиент концентрации ПАВ, но конвекция Марангони не возникает. При малых касательных напряжениях граница раздела фаз ведет себя подобно твердой поверхности, и только при достижении касательными напряжениями некоторого порога начинается движение границы. Величина критического градиента ПАВ зависит от степени предварительной очистки жидкости, но в наших экспериментах не удавалось довести ее до нуля. Это заставляет при моделировании поверхностной фазы приписывать ей «бингамовские» свойства – элементы поверхностной фазы приходят в движение при превышении касательными напряжениями некоторого предельного значения.

### Условия на межфазной границе

При численном моделировании концентрационной конвекции в свете приведенных экспериментальных фактов требуется специальное обсуждение граничных условий на межфазной границе. Для простоты рассмотрим в плоской постановке задачу о концентрационной конвекции около горизонтальной плоской поверхности, отделяющей жидкость от пассивного газа. Пусть  $x$  – координата, направленная вдоль поверхности, а  $y$  – поперечная координата. Будем считать, что переход молекул ПАВ из объемной фазы на свободную поверхность осуществляется адсорбционно-десорбционным процессом, и граница слоя рассматривается как отдельная фаза с поверхностной концентрацией ПАВ  $\Gamma$ .

Закон сохранения вещества на границе объемной и поверхностной фаз и в поверхностной фазе может быть записан в виде

$$-D \frac{\partial C}{\partial y} = k_1 C - k_{-1} \Gamma,$$

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (v_x \Gamma) = D_s \frac{\partial^2 \Gamma}{\partial x^2} + k_1 C - k_{-1} \Gamma.$$

Здесь  $D$  и  $D_s$  – коэффициенты объемной и поверхностной диффузии,  $k_1$  – коэффициент адсорбции,  $k_{-1}$  – коэффициент десорбции.

Уравнение для касательных напряжений с учетом конечности массы поверхностной фазы и поверхностной диффузии импульса запишем в виде динамического уравнения, описывающего движение элемента поверхностной фазы [4]:

$$\Gamma \left( \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) = \eta_s \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} - \eta \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial \sigma}{\partial x}.$$

Здесь  $\eta$  – объемная динамическая вязкость жидкости,  $\eta_s$  – поверхностная вязкость, величина которой зависит от касательного напряжения на поверхности.

Для простоты численной модели при вычислении поверхностной дивергенции от поверхностного тензора вязких напряжений пренебрегается дилатационной поверхностной вязкостью и производной от поверхностной вязкости по продольной координате.

Реологические свойства поверхностной фазы будем описывать, задавая вид функции  $\eta_s$  от касательного напряжения на межфазной поверхности. Названные выше эксперименты говорят, что при малых касательных напряжениях (малых градиентах концентрации ПАВ) поверхность остается неподвижной, т.е. ведет себя как твердая.

При достижении касательными напряжениями некоторого порога  $P_0$  квазитвердая поверхность разрушается, поверхностная вязкость резко уменьшается, и поверхностная фаза приходит в движение. Такие свойства поверхностной вязкости можно описать следующей функцией:

$$\eta_s = \eta_\infty / \{ \exp[(P - P_0)/a] + 1 \} + \eta_0,$$

$$P = | -\eta \partial v_x / \partial y + \partial \sigma / \partial x |.$$

Здесь  $P$  – текущее значение касательного напряжения,  $a$  – ширина области перехода по напряжениям от экстремально большого значения поверхностной вязкости  $\eta_\infty$  к ее минимальному значению  $\eta_0$ .

Реологическое уравнение описывает частный случай твердой поверхности при  $P_0 \rightarrow \infty$

и  $\eta_\infty \rightarrow \infty$  и случай «ньютоновской» поверхности при  $\eta_\infty \rightarrow 0$ .

Соавторами работы являются М.О. Денисова, К.Г. Костарев, Е.С. Мазунина, А.И. Мизев, Р.Н. Рудаков.

*Работа выполнена при финансовой поддержке проектов РФФИ № 08-01-00503 и № 09-01-00484, Интеграционного проекта СО, УрО и ДВО РАН и гранта МОН (№ госконтракта – 14.740.11.0352).*

#### Список литературы

1. Зуев А.Л., Костарев К.Г. // УФН. 2008. Т. 178, №10. С. 1065–1085.
2. Бушуева К.А. и др. // Коллоидный журнал. 2008. Т. 70, №4. С. 457–463.
3. Денисова М.О., Костарев К.Г. // Конвективные течения. Вып. 4. Пермь: ПГПУ. 2009. С. 85–106.
4. Братухин Ю.К., Макаров С.О. Межфазная конвекция. Пермь: ПГУ, 1994. 328 с.

## OSCILLATORY MODES OF SOLUTAL CONVECTION AND SPECIFIC FEATURES OF BOUNDARY CONDITIONS AT THE INTERFACES

*R.V. Birikh*

It is common knowledge that the sharp distinctions between the solutal and thermal convection are caused by large diffusion time of the former [1, 2]. These differences become more severe in the presence of the liquid–liquid interface. A deep and rather slow gravitational convection supplies a surfactant to the interface causing thereby intensive outbursts of the Marangoni convection. As experiments show, the coexistence of the solutal gravitational convection and capillary convection usually leads to the onset of the oscillatory mode. In this paper we investigate several systems, in which the development of the oscillator mode of the solutal convection was observed experimentally.

The other distinguishing feature of the solutal convection in the liquid system with the interface is attributed to the fact that diffusion of the surfactant molecules to the interface and formation of the surface temperature perturbations are governed by different mechanisms. In the surface phase generated at the free surface of a fluid, concentration of the surfactant is defined by a competition of adsorption and desorption processes. Therefore, the mechanism responsible for the onset of thermocapillary convection differs from that of the solutal Marangoni convection, which begins, as experiments show, after the formation of a certain finite gradient of surfactant concentration at the surface [3]. The value of the critical surfactant gradient depends on the degree of preliminary fluid purification. However, in our experiments we failed to reduce it to zero. Therefore in the numerical simulations the surface phase is assumed to exhibit Bingham properties – the elements of the surface phase are set into motion as soon as the tangential stresses exceed some limiting value.

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