

## ВЛИЯНИЕ КОНВЕКЦИИ МАРАНГОНИ НА ПОЛОЖЕНИЕ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЖИДКОСТИ

*А.И. Федюшкин*

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия*

В данной работе на основе численного моделирования показано влияние термокапиллярной и гравитационной конвекций на деформацию и положение границы раздела в двухслойной системе "воздух-вода" при внезапном боковом нагреве.

**Постановка задачи.** Рассмотрены задача о влиянии внезапного нагрева двухслойной системы «воздух-вода» в квадратной полости с границами без трения (с проскальзыванием) на форму границы раздела при термокапиллярной конвекции без гравитационной конвекции (ускорение силы тяжести  $g=0$ ) и с наличием гравитационной конвекции ( $g \neq 0$ ). Схема модели представлена на рис. 1.)

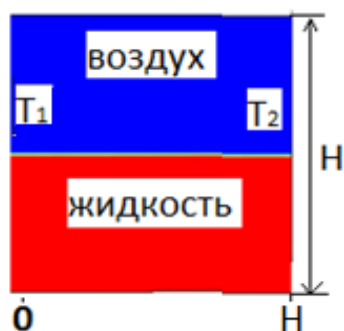


Рис.1 Схема расчетной области и начальное распределение фаз.

Математическая модель основана на системе уравнений Навье-Стокса для двухфазной системы «воздух- вода». В начальный момент граница раздела плоская и горизонтальная. Вода занимает половину области, как показано на рис.1. Граничные условия на поверхности раздела «вода - воздух» в виде равновесия поверхностных сил и давления. Моделирование изменения формы границы раздела «воздух-вода» выполнялось, используя VOF-модель жидких объемов

(VOF – Volume Of Fluid метод).

Точность определения границы ограничивается размером ячеек сетки и методами решения, поэтому использовалась подробная динамическая сетка по обе стороны интерфейса. Численное моделирование проводилось на основе решения нестационарных уравнений Навье-Стокса для двухфазной несжимаемой системы «воздух-вода» с использованием методов второго и третьего порядка точности по пространству и второго по времени с неявным матричным (совместным - couple) решением уравнений. Задача характеризуется геометрическими параметрами, относительными величинами свойств данной двухслойной системы и следующими

безразмерными числами: Марангони  $Ma = -\frac{\partial \sigma}{\partial T} \frac{H \Delta T}{\nu \rho a}$ , Рэлея  $Ra = g \beta \Delta T H^3 / \nu a$ ,

Прандтля  $Pr = \nu/a$ , где  $\sigma, \beta, \nu, a$  - коэффициенты поверхностного натяжения, теплового расширения, кинематической вязкости и теплопроводности,  $H, \Delta T$  - масштабы геометрии и температуры. Число Прандтля изменялось от 1 до 7.

**Результаты математического моделирования.** Рассмотрим случай только с

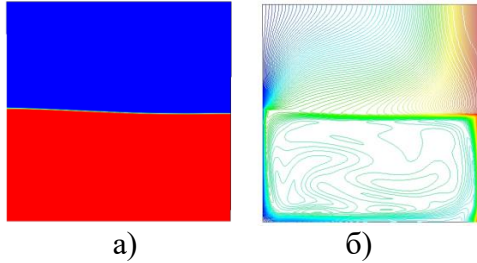


Рис.2. Положение границы «воздух - вода» (а) и изотермы (б) (задача 1, момент времени  $t=5$  сек,  $Ma = 10^6$ ,  $Ra=0$ ).

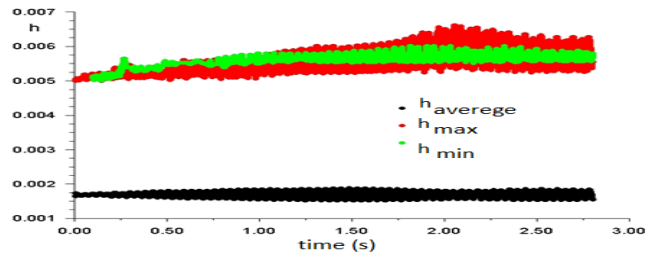


Рис. 3. Временные зависимости максимального и минимального отклонений интерфейса от начального горизонтального положения ( $Ma = 10^6$ ,  $Ra=0$ ).

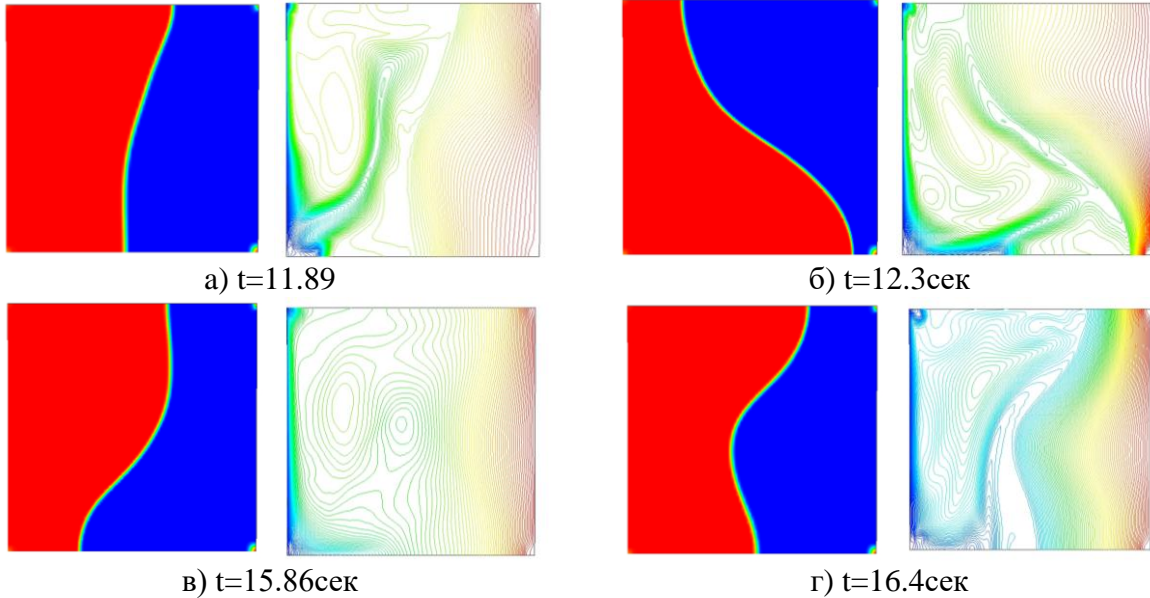


Рис. 4. Мгновенные положения интерфейса «воздух-вода» и изотермы ( $Ma = 10^6$ ,  $Ra=0$ )

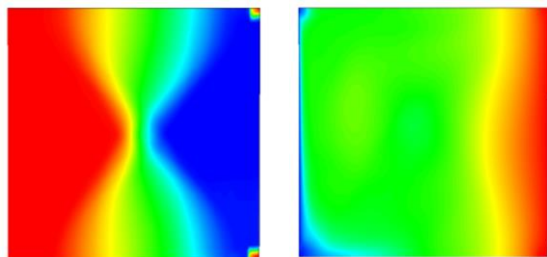


Рис. 5. Изотермы (справа) и изолинии значений объёмной доли воды (слева), усредненные по времени на интервале от  $t=0$  до  $t=15.86$  сек ( $Ma = 10^6$ ,  $Ra=0$ )

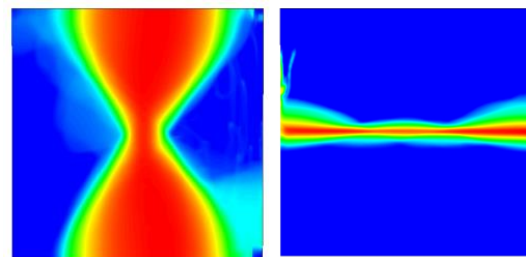


Рис.6 Изолинии отклонений от среднего положения интерфейса усреднённые по времени на интервале от  $t=0$  до  $t=5$ сек ( $Ma = 10^6$  (слева -  $Ra = 0$ , справа -  $Ra = 10^7$ ))

термокапиллярной конвекцией ( $g=0$ ) рис.1. В начальный момент температура одинаковая. При мгновенном изменении разницы температур между вертикальными

стенками, на поверхности раздела возникает термокапиллярная конвекция. На рис. 2 показаны положение границы «воздух - вода» (рис.2а) и изотермы (рис.2б) для момента времени  $t=5$  сек ( $Ma=10^6$ ,  $Ra=0$ ). Вследствие этого поверхность раздела искривляется и осциллирует во времени. Воздух и вода прогреваются. На рис. 3 показаны временные зависимости среднего, максимального и минимального отклонений интерфейса от начального горизонтального положения ( $Ma=10^6$ ,  $Ra=0$ ). Следует отметить тот факт, что колебательный режим является неустойчивым и поскольку отсутствуют сила тяжести и сила натяжения на всех боковых стенках области, то при малейших возмущениях поверхность раздела может изменить положение (от горизонтального до вертикального). На рис. 4 представлены мгновенные положения интерфейса «воздух-вода» и изотермы для четырех моментов времени, а)  $t=11.89$ сек, б)  $t=12.3$ сек, в)  $t=15.86$ сек, г)  $t=16.4$ сек. Видно, что интерфейс после потери устойчивости около горизонтального положения совершает колебания около вертикали. Изотермы после прогрева приобретают преимущественно вертикальное направление и интерфейс, поворачиваясь на 90 градусов, принимает энергетически выгодное преимущественно вертикальное положение (подстраиваясь вдоль изотерм). Это подтверждается средними полями температуры и положения интерфейса. На рис.5 показаны изотермы (справа) и изолинии значений объемной доли жидкости (слева), осредненные по времени на интервале от  $t=0$  до  $t=15.86$  сек ( $Ma=10^6$ ,  $Ra=0$ ). Интерфейс совершает колебания. На рис.6 показаны изолинии отклонений от среднего положения интерфейса усреднённые по времени на интервале от  $t=0$  до  $t=5$ сек ( $Ma=10^6$ , слева -  $Ra=0$ , справа -  $Ra=10^7$ ). Гравитационная конвекция (при числе Рэлея  $Ra=10^7$ ), даже при наличии термокапиллярной конвекции ( $Ma=10^6$ ), обладает стабилизирующим фактором для положения свободной границы, то есть граница при наличии гравитационной конвекции остается преимущественно горизонтальной (тяжелая вода – внизу).

**Выводы.** При боковом нагреве двухслойной системы «воздух-вода» в объеме со свободными стенками, граница раздела за счет термокапиллярной конвекции может поворачиваться на  $90^\circ$  и принимать устойчивое (энергетически выгодное) положение, параллельное нагреваемой стенке (изотермам). Гравитационная конвекция (даже при наличии термо-капиллярной конвекции) обладает стабилизирующим фактором для горизонтального положения свободной границы.