

Влияние конвекции и угла смачивания на положение свободной поверхности жидкости в условиях невесомости и на Земле

А.И. Федюшкин

ФГБУН Институт проблем механики им. А.Ю. Иилинского РАН,

В данной работе на основе численного моделирования показано влияние термокапиллярной, гравитационной конвекций и краевого угла смачивания на нагревателе на деформацию границы раздела в двухслойной системе "воздух-вода" при внезапном нагреве.

1. Постановка задачи

Рассмотрены две задачи о влиянии внезапного нагрева двухслойной системы «воздух-вода»:

- 1) Задача об изменении формы границы раздела при термокапиллярной конвекции (при ускорении силы тяжести $g=0$ и $g \neq 0$) в квадратной полости с границами без трения (с проскальзыванием). Схема модели представлена на рис. 1а.)
- 2) Задача о влиянии на форму границы раздела краевого угла на твердой стенке нагревателя. Схема модели представлена на рис. 1б.

В первой задаче рассмотрена термокапиллярная конвекция (при $g=0$) на границе «воздух-вода» и рассмотрено стабилизирующее влияние на положение границы раздела тепловой конвекции ($g \neq 0$). При моделировании первой задачи (рис.1а) краевой угол на всех границах области задавался постоянным $\theta = 90^\circ$.

Во второй задаче рассматривается цилиндрическая область радиуса R и высотой $H=0.5R$, заполненная наполовину жидкостью рис.1б. На оси в центре цилиндра находится нагреватель, имеющий форму небольшого цилиндра радиуса $r=0.05R$ и высотой $H_q=2r$. На стенках нагревателя задана температура T_1 , на боковой стенке цилиндра задана температура T_2 , все остальные стенки теплоизолированы. Предполагается, что на нагревателе угол смачивания может меняться. На свободной поверхности жидкости возможно наличие капиллярной конвекции, так как предполагается, что коэффициент поверхностного натяжения линейно зависит от температуры.

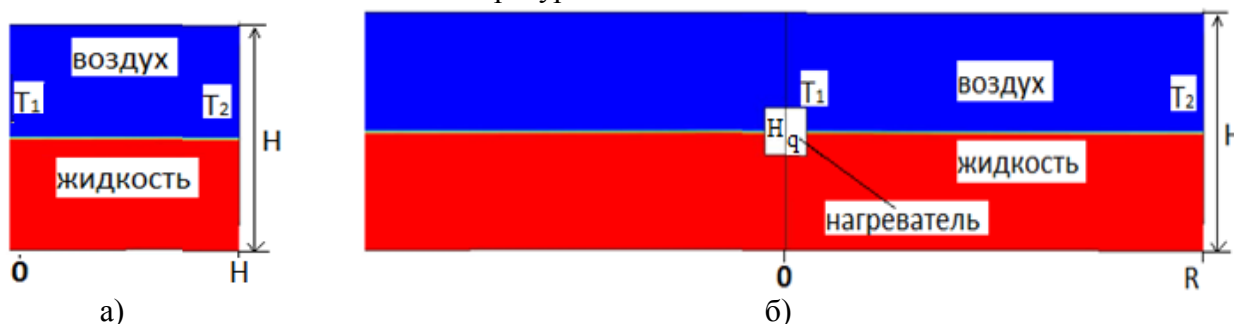


Рис.1 Схема расчетной области и начальное распределение фаз.

- а) задача 1- квадратная область с границами без трения,
б) задача 2- цилиндрическая область с нагревателем в центре.

Математическая модель основана на системе уравнений Навье-Стокса для двухфазной системы «газ- жидкость» (рис.1). Граничные условия на поверхности раздела «вода - воздух» в виде равновесия поверхностных сил и давления. Моделирование изменения формы границы раздела «газ-жидкость» выполнялось, используя модель жидких объемов (*VOF – Volume Of Fluid method*). Подробнее, используемая математическая модель, описана в работе [1].

При наличии на границе точки «газ- твердое тело – жидкость» вводится угол смачивания θ (рис. 2), который определяется по формуле $\cos\theta = (\sigma_s - \sigma_{SL}) / \sigma_L$, где в тройной точке «воздух- твердое тело – вода» коэффициенты поверхностного натяжения следующие: σ_s - между твердым телом и воздухом, σ_{SL} - между воздухом и водой, σ_L - между твердым телом и водой.

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 «газ-жидкость» с использованием методов второго и третьего порядка точности по пространству и второго по времени с неявным матричным (совместным - couple) решением уравнений.

Данные задачи характеризуются для двухслойной системы «воздух-вода» 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

$Ra = g\beta\Delta TH^3 / \nu a$, Прандтля $Pr = \nu / a$, где σ, β, ν, a - коэффициенты поверхностного натяжения, теплового расширения, кинематической вязкости и температуропроводности, $H, \Delta T$ - масштабы геометрии и температуры. В данных расчетах число Прандтля изменялось от 1 до 7.

2. Результаты математического моделирования

Влияние конвекции. Рассмотрим задачу 1 только с термокапиллярной конвекцией ($g=0$) рис.1а. В начальный момент температура одинаковая. При мгновенном изменении разницы температур между вертикальными стенками, на поверхности раздела возникает термокапиллярная конвекция. На рис. 3 показаны положение границы «воздух - вода» (рис.3а) и изотермы (рис.3б) для задачи 1 в момент времени $t=5$ сек ($Ma = 10^6, Ra=0$). Вследствие этого поверхность раздела искривляется и осциллирует во времени. Воздух и вода прогреваются. На рис. 4 показаны изменения поверхности на квазистационарном режиме. Следует отметить тот факт, что данный режим является неустойчивым и поскольку отсутствуют сила тяжести и сила напряжения на всех боковых стенках области, то при малейших возмущениях поверхность раздела может изменить положение (от горизонтального до вертикального). На рис. 5, где показаны положения границы раздела в моменты времени: а) $t=12.3$ сек, б) $t=13$ сек, в) $t=15.9$ сек, г) $t=16.2$ сек.

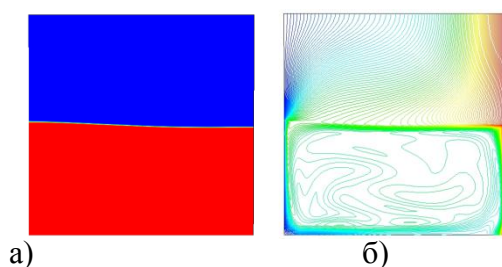


Рис.2. Положение границы «воздух - вода» (а) и изотермы (б) (задача 1, момент времени $t=5$ сек, $Ma = 10^6, Ra=0$).

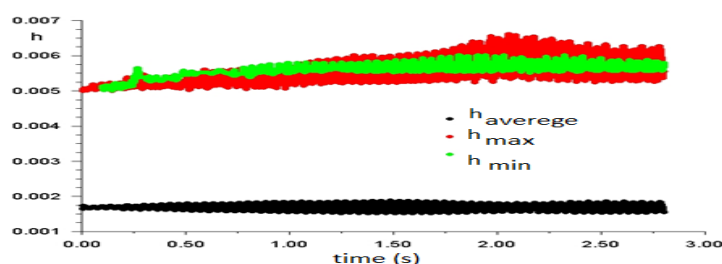


Рис. 3. Осциллирующие зависимости от времени среднего, максимального и минимального отклонений интерфейса от начального горизонтального положения ($Ma = 10^6, Ra=0$).

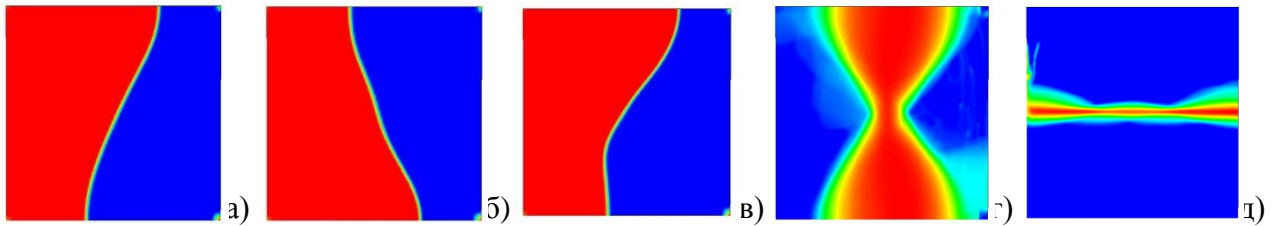


Рис. 4. Форма интерфейса «воздух-вода» в разные моменты времени ($Ma = 10^6$, $Ra=0$) а) $t=13$ сек, б) $t=15.9$ сек, в) $t=16.2$ сек.; г-д) - изолинии осреднённых по времени максимумов среднеквадратичных отклонений от среднего положения интерфейса ($Ma = 10^6$, г) $Ra = 0$ $t=15$ сек, д)) $Ra = 10^7$, $t=5$ сек).

Гравитационная конвекция (при числе Рэлея $Ra = 10^7$), при наличии термокапиллярной конвекции ($Ma = 10^6$), обладает стабилизирующим фактором для положения свободной границы, то есть граница имеет небольшие отклонения от горизонтальной и не опрокидывается при малых возмущениях, как при отсутствии гравитационной конвекции (рис. 6), т.е. остается преимущественно горизонтальной, хотя граница раздела осциллирует во времени (рис. 6). На рис. 6 показаны статистические данные в виде изолиний максимальных по пространству среднеквадратичных отклонений изменения поверхности раздела от среднего для двух случаев: а) - $Ra = 0$ и б) - $Ra = 10^7$ (осреднённые по времени за первые 15сек (а) и 5 сек (б), соответственно). На рис.6 видны диапазоны отклонений поверхности от среднестатистических положений поверхности раздела.

Влияние краевого угла смачивания. Для второй задачи (рис.1б) проведено моделирование капиллярной конвекции Марангони при внезапном нагреве «нагревателя» до температуры T_1 для разных свойств жидкостей (для разных углов смачивания θ).

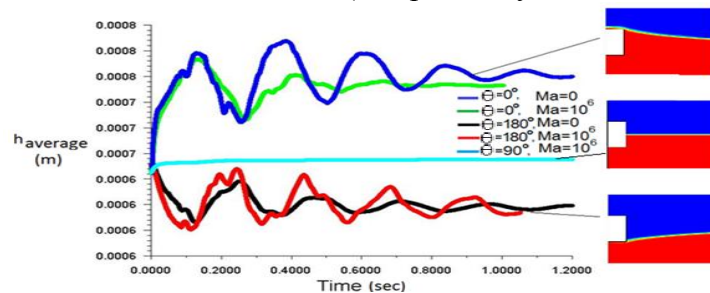


Рис.7. Зависимость средней по длине высоты свободной поверхности от времени для разных краевых углов на нагревателе с наличием и без капиллярной конвекции.

На рис.7 показано изменение средней по длине высоты свободной поверхности ацетона от времени для разных краевых углов смачивания ($\theta = 0^\circ$, 90° и 180°) на нагревателе при наличии (число Марангони $Ma = 10^6$) и без капиллярной конвекции при внезапном повышении температуры на нагревателе на $\Delta T = T_1 - T_2$ при $R = 0.01$ м. Справа на рис. 7 показано изменение свободной поверхности около нагревателя для разных углов смачивания. Результаты расчетов показали, что влияние капиллярной конвекции на деформацию свободной поверхности ацетона мало. Максимальное изменение уровня свободной поверхности может меняться по длине слоя из-за не одновихревой структуры течения конвекции Марангони. Были проведены расчеты для разных краевых углов смачивания при отсутствии термокапиллярной конвекции $Ma=0$ и при ее наличии $Ma = 10^6$, результаты показали, что для рассмотренной задачи влияние краевого угла смачивания на нагревателе гораздо сильнее влияния капиллярной конвекции и практически не меняется при наличии или отсутствии капиллярной конвекции.

Литература

1. Федюшкин А.И. Рожков А.Н. Коалесценция капель ньютоновской жидкости. Препринт ИПМех РАН, - №. 1087, - Москва, 2014, -27с. ISBN 978-5-91741-127-9.
http://www.ipmnet.ru/~fai/papers/Preprint_Coalescence.pdf