

НЕКОТОРЫЕ НЕЛИНЕЙНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЛАМИНАРНЫХ ТЕЧЕНИЙ ЖИДКОСТИ

А.И. Федюшкин

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

Одним из проявления нелинейности ламинарных течений является закономерность зависимости расслоения (температурного или концентрационного) от интенсивности перемешивания жидкости или газа, то есть существование максимума неоднородности в зависимости от безразмерных чисел, характеризующих интенсивность перемешивания той или иной задачи. Кроме эффекта максимума температурного (концентрационного) расслоения в данной работе рассмотрены результаты численного моделирования гидродинамики и тепломассопереноса и обсуждаются особенности ламинарных течений следующих задач:

1. О влиянии тепловой конвекции на образование различных стационарных структур течения с противотоками основному течению в длинных горизонтальных слоях.
2. Задача о нарушении симметрии стационарного течения в плоском диффузоре.
3. Влияние управляемых вибраций на толщины пограничных слоев.
4. Задача об изменении формы и положения границы раздела при термокапиллярной конвекции и влиянии ускорения силы тяжести.

1. Тепловая конвекция в горизонтальном слое подогреваемом сбоку

Рассматривается задача о тепловой конвекции несжимаемой жидкости в вытянутом по горизонтали слое в поле силы тяжести при боковом подводе тепла. Данная задача характеризуется тремя безразмерными числами Рэлея (Ra), Прандтля (Pr) и отношением сторон слоя ($L/H \gg 1$), а также граничными условиями. Схема геометрии, граничные условия и структура течения при малых числах Рэлея показана на рис.1. Численно показано, что нелинейные особенности стационарных течений тепловой конвекции могут заключаться, например, в образовании различных стационарных горизонтальных слоистых структур течения с противотоками внутри слоя (циркуляционные течения направленные навстречу основному), как показано на рис.2, либо в образовании крупномасштабной многоячейковой структуры с определенным волновым числом и периодом, например, таких как на рис.3. Причиной особенностей течений с противотоками являются, во-первых, нелинейный характер зависимости скорости течения от температуры, во-вторых, образование устойчивой стратификации температуры по вертикали слоя и в-третьих, влияние торцевых стенок. Результаты расчетов, полученные разными методами, сравнивались между собой, а также сравнивались с экспериментальными данными.

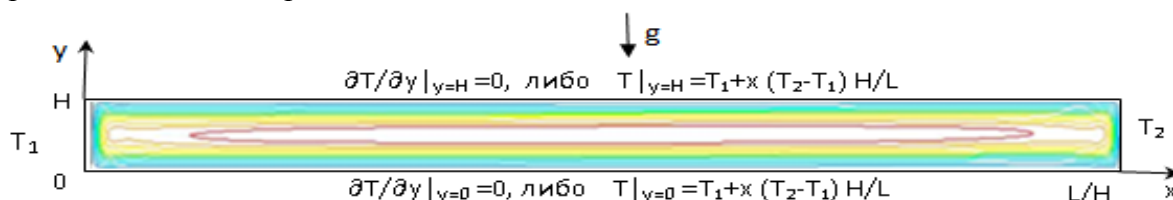


Рис.1. Схема расчетной области и изолинии функции тока ($Ra=2 \cdot 10^5$, $Pr=5.8$, $L/H=12.71$)



Рис. 2. Изолинии функции тока при $Ra=2 \cdot 10^5$, $Pr=5.8$, $L/H=12.71$



Рис. 3. Изолинии функции тока ($Ra=2 \cdot 10^5$, $Pr=0.01$, $L/H=12.71$)

Если горизонтальная граница свободная, это сказывается на симметричности течения в слое, но не оказывает влияния на появление вторичных таких течений, как на рис.2. Результаты показывают, что противотoki существуют и при наличии свободной границы и в жидкостях с малыми числами Прандтля.

2. Влияние вибраций на толщину пограничного слоя

Вибрации могут интенсифицировать перемешивание, тепломассоперенос в расплаве, а также уменьшать толщины пограничных слоев (динамического, температурного и концентрационного). Последний факт очень важен при выращивании кристаллов, так как влияет на производительность и на совершенство кристаллов.

На рис. 4 показаны изотермы, а на рис.5 профили температуры в расплаве NaNO_3 ($Pr=5.43$ – число Прандтля) с погруженным вибратором (на рис.4 справа – без вибраций, слева - с вибрациями $Re_{vibr}=200$, где $Re_{vibr}=A\omega R/\nu$ - число Рейнольдса вибрационное, A – амплитуда, $\omega=2\pi f$ и f - частоты, ν - кинематическая вязкость, R – радиус кристалла).

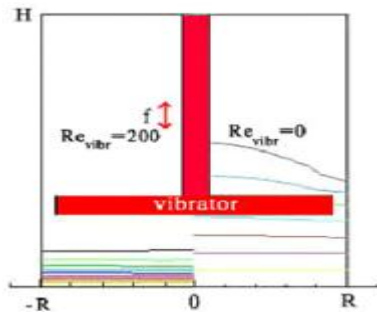


Рис. 4. Изотермы.

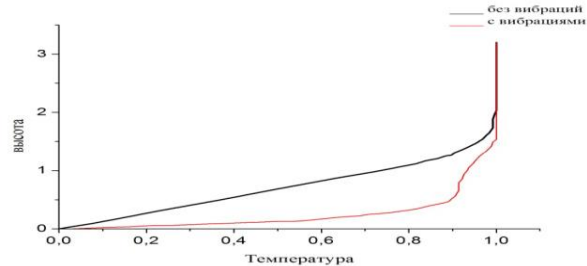


Рис. 5. Вертикальные профили температуры в сечении $R/2$.

Показано, что результаты уменьшения толщин пограничных слоев для метода Бриджмена (рис. 4, 5), имеют место для разных вариантов вибрационного воздействия, разных конфигураций расположения вибратора методов выращивания кристаллов, свойств жидкостей, что говорит об общей закономерности данного факта.

3. Нарушение симметрии стационарного течения в плоском диффузоре

Рассматривается ламинарное течение вязкой несжимаемой жидкости в плоском диффузоре (задача Джеффри–Гамеля). Целью данного численного моделирования является определение диапазонов существования несимметричных стационарных течений. Моделирование задачи осуществляется на основе численного решения системы нестационарных уравнений Навье–Стокса для несжимаемой вязкой жидкости. Геометрическая модель диффузора следующая: угол раствора диффузора равен $\beta=4^\circ$, входная граница имеет форму дуги l_{in} , выходная граница имеет форму в виде дуги l_{out} , длина диффузора составляет $L=r_{out}-r_{in}=0.495$ м. В качестве граничных условий, на входе в диффузор l_{in} , задан постоянный положительный расход Q , на выходе l_{out} задано давление $P=0$, на верхней и нижней границах для скорости ставится условие прилипания $V=0$. Начальные значения скорости и давления были нулевыми. Число Рейнольдса на входе в диффузор определено, как $Re=U_{in}l_{in}/\nu$, где l_{in} – длина дуги, а U_{in} – скорость на входе в диффузор, направленная по нормали к границе, соответствующая расходу Q . Численные расчеты показали, что для угла

раствора $\beta = 4^\circ$ течение в диффузоре перестает быть симметричным, оставаясь стационарным в узком диапазоне чисел Рейнольдса $299 > Re > 279$.

На рис. 6 представлены стационарные изолинии горизонтальной компоненты вектора скорости ($Re = 279$), показывающие нарушение симметрии течения. Следует отметить, что изменение направления вектора скорости от радиального происходит в основном только в пристеночных областях и вдали от входа в диффузор (рис. 6).

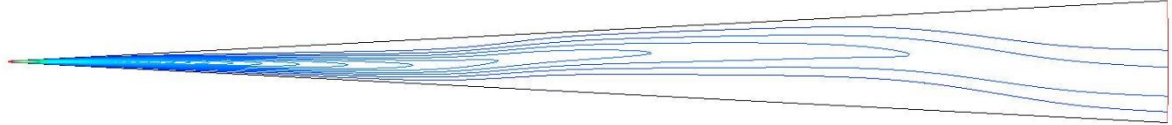


Рис. 6. Изолинии горизонтальной компоненты скорости $Re = 279$

4. Изменение границы раздела при термокапиллярной конвекции

В работе на основе численного моделирования показано влияние термокапиллярной, гравитационной конвекций на деформацию границы раздела в двухслойной системе "воздух-вода" при внезапном нагреве. Математическая модель основана на системе уравнений Навье-Стокса для двухфазной системы «газ- жидкость» (рис. 7а). Моделирование изменения формы границы раздела «газ-жидкость» выполнялось, используя модель жидких объемов (*VOF – Volume Of Fluid method*) с использованием подробных динамических сеток.

При мгновенном изменении разницы температур между вертикальными стенками, на поверхности раздела возникает термокапиллярная конвекция. На рис. 7а показаны положение границы «воздух - вода» в момент времени $t=5$ сек ($Ma = 10^6$, $Ra=0$). Вследствие этого поверхность раздела искривляется и осциллирует во времени. Воздух и вода прогреваются. 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. 7б,в показаны изменения поверхности на квазистационарном режиме в моменты времени: б) $t=13$ сек, в) $t=15.9$ сек.

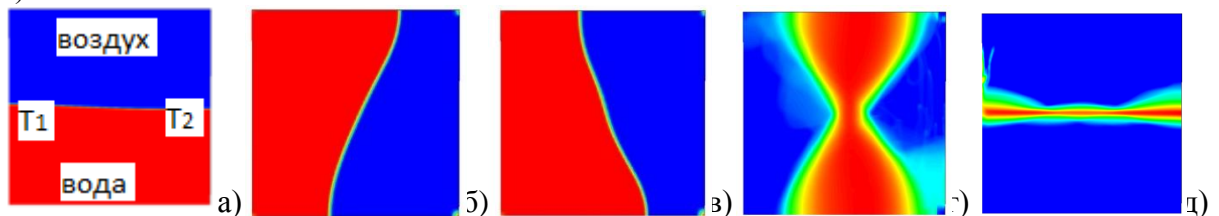


Рис. 7. а) Схема расчетной области и форма интерфейса «воздух-вода» в разные моменты времени ($Ma = 10^6$, $Ra=0$): а) $t=5$ сек б) $t=13$ сек, в) $t=15.9$ сек; г-д) - изолинии осреднённых по времени максимумов среднеквадратичных отклонений от среднего положения интерфейса: (г) $Ra = 0$, $t=15$ сек,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

Следует отметить, что гравитационная конвекция ($Ra = 10^7$) при наличии термокапиллярной конвекции ($Ma = 10^6$), обладает стабилизирующим фактором для положения свободной границы. На рис. 7г,д показаны статистические данные в виде изолиний максимальных по пространству среднеквадратичных отклонений изменения поверхности раздела от среднего для двух случаев: г) - $Ra = 0$ и д) - $Ra = 10^7$ (осреднённые по времени за первые 15сек (а) и 5 сек (б), соответственно). На рис. 7г,д видны диапазоны отклонений поверхности от среднестатистических положений поверхности раздела.