



Колебательная конвекция в квадратной полости, подогреваемой сбоку

Федюшкин А.И.

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

Для многих технологических приложений большое значение имеет знание закономерностей характера перемешивания при термо-концентрационной конвекции, распределения температуры и примесей, а также формирования температурного и концентрационного расслоения в объёме жидкости с целью управления этими неоднородностями. При умеренных определяющих параметрах конвективное течение может приобретать колебательный характер, оставаясь при этом ламинарным. В данной работе приведены результаты численного моделирования тепловой и термо-концентрационной конвекции в квадратной полости, заполненной газовой смесью и подогреваемой сбоку. Схема расчётной области и граничные условия для термо-концентрационной конвекции показана на Рис. 1, а.

Математическая модель основана на численном решении нестационарных двумерных уравнений Навье–Стокса для несжимаемой жидкости в приближении Буссинеска, Задача характеризуется безразмерными числами Прандтля (Pr), Грасгофа (Gr), Грасгофа концентрационного (Gr_c), Шмидта (Sc), граничными условиями и направлением век-

тора силы тяжести [1]. Вектор силы тяжести направлен навстречу оси Oy и перпендикулярен векторам потоков тепла и массы (Рис. 1). Граничные условия следующие: для скорости — условиями прилипания на всех стенках, для температуры задаются условия первого рода на всех стенках, условия для концентрации: не протекания на горизонтальных стенках и первого рода на вертикальных (Рис. 1, а). Рассматриваются бинарные смеси с концентрацией лёгкой компоненты. Рассмотрены диапазоны безразмерных параметров: $0 < Gr < 10^8$, $Pr = 0.7$, $0 < Gr_c < 10^8$, $10^{-2} < Sc < 10^2$, соответствующие ламинарной стационарной и колебательной конвекции. Описания методов решения указанных задач приведено в работах [1–3]. Вертикальное расслоение оценивалось величинами производных от температуры ($\partial T/\partial y$) и концентрации ($\partial C/\partial y$) по вертикальной координате y .

На Рис. 1 для установившегося периодического течения показаны картины течения (в виде изолиний функции тока и изотерм) для разных моментов времени на одном периоде. Картины течения, изображенные на Рис. 1 повторяются с постоянной периодичностью, о чём также говорят временные зависимости значений производной от температуры по вертикальной координате ($\partial T/\partial y$) (максимальных, минимальных и средних значений по пространству), изображенных на Рис. 2. Эти зави-

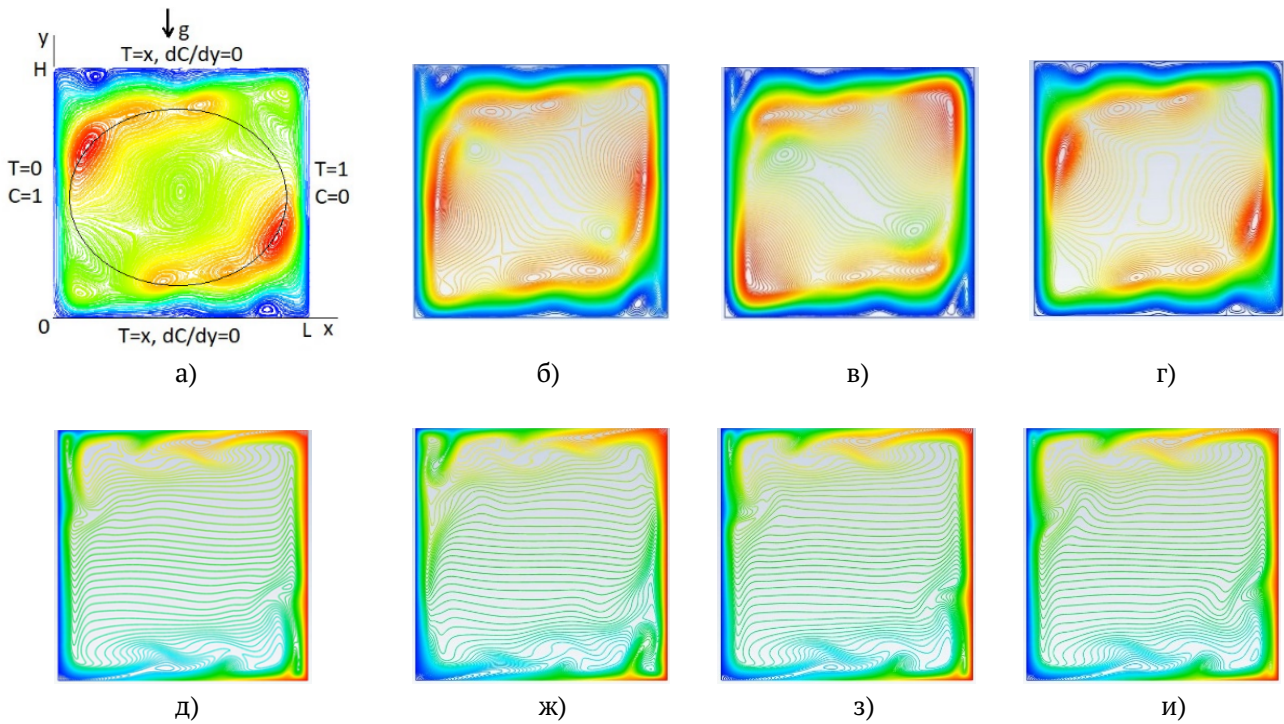


Рис. 1. Расчётная область и граничные условия (а). Показаны значения изолиний функции тока (а–г) и изотермы (д–и) при колебательной тепловой конвекции $Gr = 10^7$, $Pr = 0.7$, $L/H = 1$ в разные моменты времени, приблизительно на одном периоде колебаний

симости показывают наличие максимумов температурного и концентрационного расслоения в зависимости от числа Грасгофа центре области [4].

После превышения числом Грасгофа значения $Gr > 10^6$ ламинарное течение становится периодически — колебательным, в следствие того, что вторичные крупномасштабные вихри (вихри, которые до чисел $Gr = 10^6$ известные, как cat's eyes) начинают увлекаться основным течением, двигаясь против часовой стрелки, меняя свою интен-

сивность, дробясь и объединяясь, из-за чего возникают термики у горячей и холодной стенок (на стенках происходит срыв пограничного слоя, появляются мелкие, растущие по мере продвижения вдоль стенок вихри, образующие на твёрдых стенках волны Толмина–Шлихтинга) (Рис. 1).

На Рис. 3 представлены картины конвективных течений в виде изолиний функции тока, изотерм и линий равной концентрации при разных числах Шмидта ($Sc = 0.01, 0.1, 0.7, 10, 100$) при колебательной тепловой конвекции $Gr = 10^7$, $Gr = 10^8$, $Pr = 0.7$ и при термо-концентрационной конвекции $Gr = 10^7$, $Pr = 0.7$, $Gr_c = 10^7$, $Sc = 0.7$.

При $Gr = 10^8$ течение является периодически-колебательным, но менее упорядоченным, чем при $Gr = 10^7$. Интенсивность термо-концентрационной периодически-колебательной конвекции ($Gr = 10^7$, $Pr = 0.7$, $Gr_c = 10^7$, $Sc = 0.7$, $L/H = 1$) ниже, чем в случае только тепловой ($Gr = 10^7$, $Pr = 0.7$, $Gr_c = 0$), но структура течения состоит из двух основных, противоборствующих и оппозитно вращающихся вихрей (концентрационная конвекция по часовой стрелке; тепловая конвекция — против), чем и определяется периодичность течения при данной термо-концентрационной конвекции.

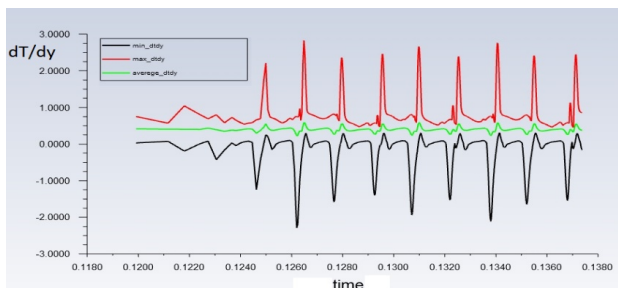


Рис. 2. Временные зависимости производной от температуры по вертикальной координате dT/dy (максимальных, минимальных и средних значений по пространству) при колебательной тепловой конвекции

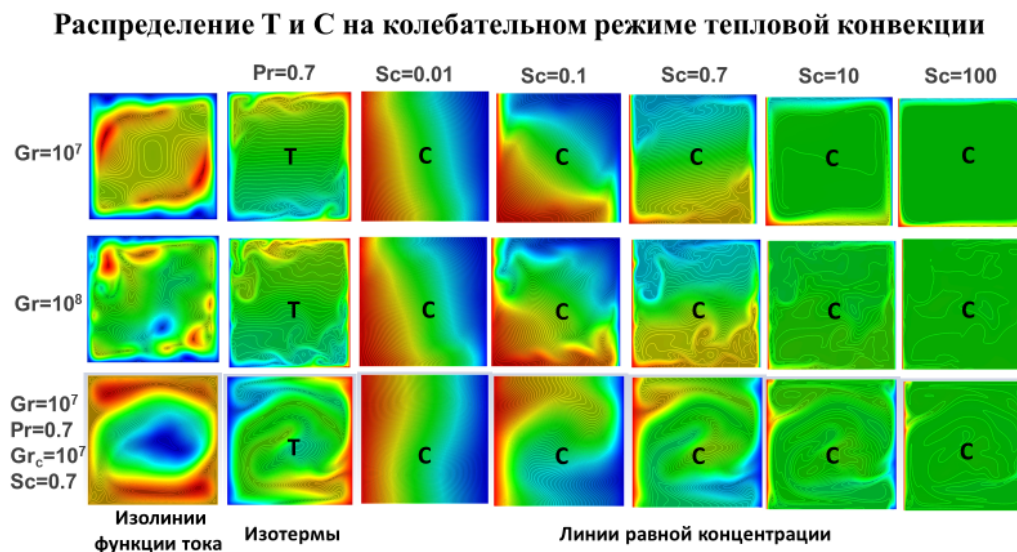


Рис. 3. Изолиний функции тока (1-й столбец), изотермы (2-й столбец) и линии равной концентрации 3-5 столбцы для чисел Шмидта ($Sc = 0.01, 0.1, 0.7, 10, 100$) при колебательной тепловой конвекции $Gr = 10^7$, $Pr = 0.7$ (1-я строка), $Gr = 10^8$, $Pr = 0.7$ (2-я строка) и при термо-концентрационной конвекции $Gr = 10^7$, $Pr = 0.7$, $Gr_c = 10^7$, $Sc = 0.7$ (3-я строка)

Заключение

Показана динамика и различия в природе формирования колебательных течений в квадратной области при тепловой и термо-концентрационной конвекции. Приведены детали образования противотоков внутри квадратной области с направлением противоположным основному конвективному течению. Найдены немонотонные зависимости величины температурного (концентрационного) расслоения в центре квадратной области от числа Грасгофа.

Список литературы

- [1] Полежаев В.И., Белло М.С., Везуб Н.А., и др. Конвективные процессы в невесомости. -М., Наука, 1991. 240 с.
- [2] Fedushkin A. I. Stratification and segregation under laminar convection // *Advanced Hydrodynamics Problems in Earth Sciences* (eds. Chaplina T.). Springer: Switzerland, 2023. P. 153–169. https://doi.org/10.1007/978-3-031-23050-9_14.
- [3] Федюшкин А. И. Влияние чисел Рэлея, Прандтля и граничных условий на конвективные течения жидкости в горизонтальных слоях // *Математическое моделирование и численные методы*. 2020. № 1. С. 28–44.
- [4] Федюшкин А. И. Конвективное расслоение температуры и концентрации. Мат-лы XXIII Межд. конф. по Вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2023), Дивноморское. Изд-во МАИ, Москва. 2023 г. С. 435–437.