

УДК 532.5

**ТЕРМОВИБРАЦИОННАЯ КОНВЕКЦИЯ
БИНАРНОЙ СМЕСИ ЖИДКОСТЕЙ С ТЕРМОДИФФУЗИЕЙ**

© 2011 г.

Б.И. Мызникова

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

myz@icmm.ru

Поступила в редакцию 16.06.2011

Изучена структура нелинейных режимов течения и характеристики теплопереноса в слое бинарной смеси с термодиффузией при комбинированном воздействии механизмов гравитационной и вибрационной свободной конвекции.

Ключевые слова: свободная конвекция, волновые режимы, жидкостная бинарная смесь, эффект Соре, высокочастотная вибрация, численное моделирование.

В теории конвекции исследованию влияния эффекта Соре посвящена обширная литература. В частности, результаты детального изучения конвективной устойчивости равновесия и течения бинарной газовой смеси с термодиффузией в полости, помещенной в поле вибраций произвольной амплитуды и частоты, ось которых по-разному ориентирована относительно направления силы тяжести, представлены в [1–5]. В указанных публикациях рассмотрено взаимодействие обоих механизмов возбуждения конвекции – термогравитационного и термовибрационного – и установлена зависимость границ устойчивости основного состояния и характеристик критических возмущений от значений параметра термодиффузии.

В конвективной системе, изученной в настоящей работе, отсутствует поддерживаемая извне неоднородность концентрации легкого компонента смеси; градиент концентрации возникает благодаря термодиффузии, за счет приложенной разности температур. Влияние высокочастотных вибраций, ось которых перпендикулярна горизонтальным непроницаемым пластинам, ограничивающим слой, моделируется на основе системы уравнений термовибрационной конвекции смеси, полученной в [1] в рамках приближения Буссинеска с помощью метода осреднения в собственной системе отсчета, связанной с колеблющейся полостью. Математическая модель имеет вид следующей краевой задачи:

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v}\nabla)\mathbf{v} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \Delta \mathbf{v} + g(\beta_1 T + \beta_2 C)\boldsymbol{\gamma} + \\ + \frac{1}{2}b^2\Omega^2(\mathbf{w}\nabla)\times[(\beta_1 T + \beta_2 C)\mathbf{n} - \mathbf{w}],$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v}\nabla T = \chi\Delta T, \quad \frac{\partial C}{\partial t} + \mathbf{v}\nabla C = D(\Delta C + \alpha\Delta T),$$

$$\operatorname{div} \mathbf{v} = 0, \quad \operatorname{div} \mathbf{w} = 0, \quad \operatorname{rot} \mathbf{w} = \nabla(\beta_1 T + \beta_2 C) \times \mathbf{n};$$

$$z = 0: \quad \mathbf{v} = 0, \quad T = \theta, \quad w_z = 0, \quad \frac{\partial C}{\partial z} + \alpha \frac{\partial T}{\partial z} = 0.$$

$$z = h: \quad \mathbf{v} = 0, \quad T = 0, \quad w_z = 0, \quad \frac{\partial C}{\partial z} + \alpha \frac{\partial T}{\partial z} = 0.$$

Кроме общепринятых обозначений, задача содержит неизвестную переменную \mathbf{w} – соленоидальную часть вектора $(\beta_1 T + \beta_2 C) \times \mathbf{n}$, имеющую смысл медленно меняющейся со временем амплитуды пульсационной составляющей скорости, а также параметры b – амплитуда вибраций и Ω – циклическая частота. Применимость метода осреднения ограничена случаем высоких частот, когда период вибраций мал по сравнению с характерными временами процесса, но в то же время имеется ограничение по частоте сверху, связанное с использованием модели несжимаемой жидкости. Кроме того, амплитуда смещения должна быть в известном смысле мала.

В результате обезразмеривания представленная краевая задача имеет следующие определяющие параметры:

$$Ra = \frac{g\beta_1\theta h^3}{\nu\chi}, \quad Ra = \frac{(b\Omega\theta h\beta_1)^2}{2\nu\chi},$$

$$Pr = \frac{\nu}{\chi}, \quad Sc = \frac{\nu}{D}, \quad \varepsilon = -\frac{\alpha\beta_2}{\beta_1}, \quad Le = \frac{D}{\chi}.$$

После введения функций тока, связанных с компонентами средней и пульсационной скоростей, математическая модель преобразуется в соответствии с идеей двухполевого метода.

Решение задачи, обладающее периодичностью в горизонтальном направлении, найдено в прямоугольной области, горизонтальные границы которой совпадают с границами слоя, а вертикальные границы отстоят друг от друга на величину пространственного периода, который в расчетах выбирали близким к длине волны возмущения, наиболее опасного с точки зрения линейной теории устойчивости [2]. Численное моделирование колебательных режимов тепломассопереноса осуществлено с помощью метода конечных разностей. Использована неявная схема продольно-поперечной прогонки метода дробных шагов для расчета полей завихренности, температуры и концентрации. Значения функций тока на каждом шаге по времени рассчитаны с помощью итерационного метода последовательной верхней релаксации.

В результате серии вычислительных экспериментов выявлены области значений в пространстве параметров задачи, в которых существуют режимы регулярных и автомодулированных бегущих волн, а также стационарные конвективные течения. Совместное влияние гравитации, термической диффузии и высокочастотных вибраций определяет пространственно-временные свойства диссипативных структур, формирующихся в по-

токе в результате нелинейной эволюции.

Получены зависимости интенсивности конвекции от амплитуды вибрации. Исследованы гистерезисные переходы между режимами колебательной и стационарной конвекции. Результаты нелинейных расчетов сопоставлены с данными о границах устойчивости равновесия, найденными средствами линейной теории. Продемонстрирована стабилизация конвективных течений с помощью высокочастотных вибраций.

Автор выражает искреннюю признательность профессору Б.Л. Смородину за существенный вклад в содержание работы.

Список литературы

1. Gershuni G.Z., Kolesnikov A.K., Legros J.C., Myznikova B.I. // *J. Fluid Mech.* 1997. V. 330. P. 251–269.
2. Gershuni G.Z., Kolesnikov A.K., Legros J.C., Myznikova B.I. // *Int. J. Heat and Mass Transf.* 1999. V. 42, No 3. P. 547–553.
3. Мызникова Б.И., Смородин Б.Л. // *Журнал экспериментальной и теоретической физики.* 2005. Т. 128, № 6. С. 1299–1306.
4. Smorodin B.L., Myznikova B.I., Legros J.C. // *Physics of fluids.* 2008. V. 20, No 9. P. 094102.
5. Мызникова Б.И., Смородин Б.Л. // *Изв. РАН. Механика жидкости и газа.* 2009. №2. С. 80–91.

THERMOVIBRATIONAL CONVECTION OF A LIQUID BINARY MIXTURE WITH THERMAL DIFFUSION

B.I. Myznikova

The paper presents theoretical results on the characteristics of the nonlinear pattern formation and heat-mass transfer of natural convection in a horizontal, binary-mixture layer with thermal diffusion subjected to the combined influence of gravity and vibrations.

Keywords: natural convection, wave flow patterns, liquid binary mixture, the Soret effect, high-frequency vibrations, numerical modeling.