

УДК 532.5.013.2
PACS 47.55.pd

Термоконцентрационная конвекция бинарных и трехкомпонентных смесей в квадратной полости при нагреве сверху

Н. А. Зубова^a, Т. П. Любимова^{a,b}

^a Институт механики сплошных сред УрО РАН – филиал ПФИЦ УрО РАН
614013, Пермь, ул. Акад. Королева, 1
email: zubova.n@icmm.ru

^b Пермский государственный национальный исследовательский университет
614990, Пермь, ул. Букирева, 15
email: lubimova@psu.ru

В настоящей работе исследована термоконцентрационная конвекция бинарных и трехкомпонентных смесей с отрицательными отношениями разделения в квадратной полости при нагреве сверху в поле тяжести. Параметры бинарных смесей совпадают с параметрами трехкомпонентной смеси в предельном случае равенства нулю отношения разделения одной из компонент, что позволяет проследить влияние добавления еще одной примеси к бинарной смеси. Анализ зависимостей интегральных характеристик конвекции бинарных и трехкомпонентных смесей от времени показывает, что рост величины отношения разделения бинарной смеси или суммарного отношения разделения трехкомпонентной смеси приводит к ускорению развития неустойчивости. Величина скачка интенсивности течения, который сопровождается наступлением неустойчивости, также увеличивается с ростом величины отношения разделения. Представлены зависимости времени наступления неустойчивости, максимального значения модуля функции тока, достигаемого при наступлении неустойчивости, и соответствующей этому моменту времени разности концентраций компонент в центрах горизонтальных границ от отношения разделения для бинарной смеси и отношения разделения второй компоненты при фиксированном отношении разделения первой для трехкомпонентной смеси. Прослежена временная эволюция структуры возникающего течения и полей концентрации примесей. Показано, что добавление к бинарной смеси еще одной примеси приводит к ускорению возникновения неустойчивости, увеличению интенсивности течения и уменьшению разности концентраций между горизонтальными границами.

Ключевые слова: бинарные смеси; трехкомпонентные смеси; диффузия; термодиффузия, отношение разделения

Поступила в редакцию 07.07.2017; принята к опубликованию 07.08.2017

Soret-induced convection of binary and ternary mixtures in square cavity heating from above

N. A. Zubova^a, T. P. Lyubimova^{a,b}

^a Institute of Continuum Media Mechanics UB RAS – Branch PFRC UB RAS, Akad. Koroleva St 1, 614013, Perm

email: zubova.n@icmm.ru

^b Perm State National Research University, Bukireva St. 15, 614990, Perm

email: lubimova@psu.ru

In the present work the Soret-induced convection of binary and ternary mixtures with negative separation ratios in a square cavity heating from above in the gravity field is investigated. The parameters of the binary mixtures coincide with the parameters of ternary mixture in the limiting case of the zero equality of the separation ratio of the one component, which allows one to observe the effect of adding one more solute to the binary mixture. Analysis of the temporal dependences of the integral characteristics of the convection of binary and ternary mixtures shows that an increase in the separation ratio of the binary mixture value or the net separation ratio of the ternary mixture value leads to an acceleration of the instability onset. The magnitude of the jump in the intensity of the flow that accompanies the instability onset also increases with the separation ratio modulus of the mixture. Dependences of the time of the instability onset, the maximum value of the modulus of the stream function attained at the moment of instability onset, and the corresponding to this time moment components concentration difference between the centers of horizontal boundaries on the separation ratio of the binary mixture and on the separation ratio of the second component at a fixed separation ratio of the first solute for the ternary mixture are presented. The temporal evolution of the structures of the emerging flow and the fields of solutes concentration are observed. It is shown that the adding of one more solute to the binary mixture leads to an acceleration of the instability onset, an increase in the intensity of the flow and a decrease in the concentration difference between the horizontal boundaries.

Keywords: binary mixtures; ternary mixtures; diffusion; thermal diffusion; separation ratio

Received 07.07.2017; accepted 07.08.2017

doi: 10.17072/1994-3598-2017-2-74-82

1. Введение

Многокомпонентные смеси (жидкости и газы) часто играют важную роль в природных и технологических процессах. В связи с этим в настоящее время проводится интенсивное исследование таких систем в рамках широкого спектра приложений [1–8].

Поведение многокомпонентных смесей осложняется наличием нескольких механизмов переноса тепла и массы (конвекция, теплопроводность, диффузия, термодиффузия). В смесях, состоящих из трех и более компонент, необходимо также учитывать перекрестные диффузионные эффекты.

В [9] рассмотрена задача о возникновении конвекции в плоском вертикальном слое бинарной смеси, на твердых границах которого заданы однородные вертикальные градиенты температуры и концентрации, при наличии эффектов термодиффузии и диффузионной теплопроводности. Показано, что в этом случае существуют монотонная и колебательная моды неустойчивости; получены выражения для границ областей их существования. В [10] аналогичная задача исследована для случая отсутствия потока вещества на границах, когда градиент концентрации возникает вследствие эффекта термодиффузии. В [11, 12] исследованы возникновение и нелинейные режимы конвекции смеси вода-изопропанол в квадратной и прямоугольной полостях при нагреве сверху.

В [13] в рамках линейного анализа устойчивости горизонтального слоя трехкомпонентной смеси вода-изопропанол-этанол, нагреваемого снизу, показано, что уравнения, не учитывающие пере-

крестные эффекты, остаются хорошим приближением для свободных идеально теплопроводных границ, а также для твердых адиабатических границ, по крайней мере, для сравнения с экспериментами [13].

В [14] исследована длинноволновая неустойчивость стационарного течения многокомпонентной смеси в вертикальном слое, границы которого поддерживаются при разных температурах. Для исключения из уравнений слагаемых, отвечающих за перекрестную диффузию, предложено линейное преобразование концентраций и отношений разделения. С использованием этого же преобразования в [15–17] исследованы возникновение и нелинейные режимы конвекции трехкомпонентной смеси в квадратной полости в поле тяжести при установившихся градиентах температуры и концентрации.

В настоящей работе численно исследованы нелинейные режимы конвекции бинарных и трехкомпонентных смесей в квадратной полости с твердыми границами при нагреве сверху. Безразмерные параметры смесей выбраны так, чтобы свойства бинарных смесей совпадали с параметрами трехкомпонентной смеси в предельном случае равенства нулю отношения разделения одной из компонент. Таким образом, рассмотрено влияние добавления еще одной примеси в бинарную смесь.

2. Постановка задачи

Рассмотрим термоконцентрационную конвекцию в квадратной полости с длиной стороны L , заполненной жидкой смесью из n компонент

(рис. 1). Полость имеет твердые, непроницаемые для вещества границы. На горизонтальных границах поддерживаются постоянные разные температуры T_1 и T_2 , соответствующие нагреву сверху ($T_2 > T_1$), вертикальные границы теплоизолированы. Оси декартовой прямоугольной системы координат выбраны так, как показано на рис. 1.

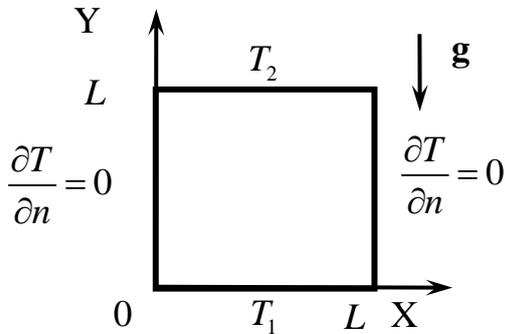


Рис. 1. Геометрия задачи

Будем считать, что отклонения температуры T и концентраций компонент C_i ($i=1, \dots, n-1$) от некоторых значений T_0 и C_{i0} , принимаемых за начало отсчета, малы, так что вызываемые ими отклонения плотности смеси от значения $\rho_0 = \rho(T_0, C_{i0})$ также малы и можно считать плотность линейно зависящей от температуры и концентраций компонент:

$$\rho = \rho_0 (1 - \beta_T (T - T_0) - \mathbf{I} \cdot \mathbf{B} (\mathbf{C} - \mathbf{C}_0)), \quad (1)$$

где $\beta_T = -(1/\rho_0)(\partial\rho/\partial T)|_C$ – коэффициент теплового расширения; $\mathbf{B} = \text{diag}\{\beta_{C_1}, \dots, \beta_{C_{n-1}}\}$ – диагональная матрица коэффициентов концентрационной зависимости плотности (так что $\beta_{C_i} = -(1/\rho_0)(\partial\rho/\partial C_i)|_{T, C_j}$, $j=1, \dots, n-1$, $i=1, \dots, n-1$, $j \neq i$); $\mathbf{C} = (C_1, \dots, C_{n-1})^T$ – транспонированный вектор концентраций; $\mathbf{I} = (1, \dots, 1)$ – единичный вектор.

Уравнения свободной термоконцентрационной конвекции многокомпонентной смеси в приближении Буссинеска имеют вид (см., например, [18, 19]):

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{\nabla p}{\rho_0} + \nu \nabla^2 \mathbf{u} - \mathbf{g} (\beta_T (T - T_0) + \mathbf{I} \cdot \mathbf{B} (\mathbf{C} - \mathbf{C}_0)), \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) T = \chi \nabla^2 T, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \mathbf{C}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{C} = \mathbf{D} \nabla^2 \mathbf{C} + \mathbf{D}_T \nabla^2 T, \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0. \quad (5)$$

Здесь \mathbf{u} – вектор скорости, p – давление, \mathbf{g} – вектор ускорения силы тяжести, ν – вязкость смеси, χ – коэффициент температуропроводности, \mathbf{D} – матрица коэффициентов молекулярной диффузии, \mathbf{D}_T – вектор коэффициентов термодиффузии. Отметим, что векторы концентраций компонент смеси и коэффициентов термодиффузии являются псевдовекторами, поэтому здесь и далее такие и истинные векторы обозначаются по-разному.

Выберем в качестве единиц измерения длины – L , скорости – ν/L , времени – L^2/ν , давления – $\rho_0 \nu^2/L^2$, характерной разности температур – ΔT и вектора концентрации компонент – $\beta_T \Delta T \mathbf{B}^{-1}$.

Уравнения свободной конвекции многокомпонентной смеси в безразмерной форме при использовании прежних обозначений для безразмерных переменных принимают вид:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \nabla^2 \mathbf{u} + \text{Ra Pr}^{-1} (T + \mathbf{I} \cdot \mathbf{C}) \boldsymbol{\gamma}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) T = \text{Pr}^{-1} \nabla^2 T, \quad (7)$$

$$\frac{\partial \mathbf{C}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{C} = \mathbf{SC} (\nabla^2 \mathbf{C} - \boldsymbol{\mu} \nabla^2 T), \quad (8)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0. \quad (9)$$

Уравнения (6)–(9) содержат следующие безразмерные параметры: $\boldsymbol{\mu} = -\beta_T^{-1} \mathbf{B} \mathbf{D}^{-1} \mathbf{D}_T$ – вектор отношений разделения размерностью $(n-1)$; $\text{Pr} = \nu/\chi$ – число Прандтля; $\text{Ra} = g \beta_T \Delta T L^3 / (\nu \chi)$ – число Релея; $\mathbf{SC} = \nu^{-1} \mathbf{B} \mathbf{D} \mathbf{B}^{-1}$ – матрица безразмерных параметров, характеризующих диффузионные свойства смеси, размерностью $(n-1) \times (n-1)$, $\{\mathbf{SC}\}_{ij} = (\beta_{C_i} / \beta_{C_j}) \text{Sc}_{ij}^{-1}$, где $(i, j=1, \dots, n-1)$, $\text{Sc}_{ii} = \nu/D_{ii}$ – числа Шмидта, $\boldsymbol{\gamma}$ – единичный вертикальный вектор.

Граничные условия в безразмерной форме имеют вид:

$$x=0, 1: \mathbf{u} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial \mathbf{C}}{\partial x} = 0, \quad (10)$$

$$y=0, 1: \mathbf{u} = 0, \quad T = \mp 1/2, \quad \frac{\partial \mathbf{C}}{\partial y} - \boldsymbol{\mu} \frac{\partial T}{\partial y} = 0. \quad (11)$$

3. Процедура диагонализации

В случае бинарной смеси матрица коэффициентов молекулярной диффузии вырождается до одного числа. Для трехкомпонентной смеси матрица \mathbf{D} имеет размерность (2×2) , что приводит к появлению в уравнении для вектора концентраций компонент дополнительных слагаемых, отвечающих за перекрестную диффузию, и усложняет вычисления. Приведение матрицы коэффициентов молекулярной диффузии к диагональному виду позволяет исключить перекрестные диффузионные члены в уравнениях, уменьшая число управляющих параметров задачи, при этом уравнения для концентраций компонент становятся независимыми друг от друга, а вид уравнения Навье-Стокса не меняется. Это преобразование, применяемое к задаче (6)–(11) в безразмерных переменных, может быть записано как [14]:

$$\mathbf{C} = \mathbf{BA}(\mathbf{BQ})^{-1} \mathbf{C}, \quad \boldsymbol{\mu} = \mathbf{BA}(\mathbf{BQ})^{-1} \boldsymbol{\mu}, \quad (12)$$

где \mathbf{A} – матрица, в столбцах которой находятся собственные вектора $\mathbf{a}_i = (a_{i1}, \dots, a_{in-1})^T$ матрицы \mathbf{D} ; $\mathbf{Q} = \text{diag}\{q_1, \dots, q_{n-1}\}$, $q_i = \beta_i^{-1} \sum_{j=1}^{n-1} \beta_j a_{ij}$.

С учетом (12) получаем уравнения свободной конвекции многокомпонентной смеси в виде:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \nabla^2 \mathbf{u} + \text{Ra Pr}^{-1} (T + \mathbf{I} \cdot \mathbf{C}) \boldsymbol{\gamma}, \quad (13)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) T = \text{Pr}^{-1} \nabla^2 T, \quad (14)$$

$$\frac{\partial \mathbf{C}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{C} = \mathbf{SC} (\nabla^2 \mathbf{C} - \boldsymbol{\mu} \nabla^2 T), \quad (15)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0. \quad (16)$$

Здесь $\mathbf{SC} = \nu^{-1} \mathbf{BDB}^{-1}$ – преобразованная диагональная матрица.

Преобразованные граничные условия:

$$x = 0, 1: \quad \mathbf{u} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial \mathbf{C}}{\partial x} = 0, \quad (17)$$

$$y = 0, 1: \quad \mathbf{u} = 0, \quad T = \pm 1/2, \quad (18)$$

$$\frac{\partial \mathbf{C}}{\partial y} - \boldsymbol{\mu} \frac{\partial T}{\partial y} = 0.$$

Таким образом, матрица чисел Шмидта \mathbf{SC} становится диагональной, при этом меняются векторы концентраций \mathbf{C} и отношений разделения $\boldsymbol{\mu}$. В случае реальных смесей после решения зада-

чи (13)–(18) необходимо проводить преобразование, обратное преобразованию (12).

4. Численный метод и параметры задачи

В качестве параметров для бинарных смесей выбраны типичные для жидких смесей значения: $\text{Pr} = 10$, $\text{Sc} = 1000$. Рассмотрены три бинарные смеси, отличающиеся величиной отношения разделения: одна из них имеет значение отношения разделения $\mu = -0.2$, вторая – $\mu = -0.4$, третья – $\mu = -0.6$.

Предполагается, что к системе уравнений применена процедура диагонализации (12), поэтому матрица коэффициентов \mathbf{SC} в случае трехкомпонентной смеси содержит только ненулевые диагональные элементы Sc_1 и Sc_2 . Для расчетов выбраны значения параметров трехкомпонентной смеси, совпадающие с параметрами первых двух рассматриваемых бинарных смесей: $\text{Sc}_1 = \text{Sc}_2 = 1000$, $\text{Pr} = 10$, $\mu_1 = -0.2$, $\mu_2 = -0.4$. Суммарное отношение разделения компонент $\mu_1 + \mu_2 = -0.6$ равно отношению разделения третьей бинарной смеси.

Число Релея $\text{Ra} = 2.5 \cdot 10^5$, для которого проводятся расчеты, соответствует значению силы тяжести порядка земной для жидких смесей при характерной разности температур, равной примерно 10 К, и длине стороны полости 0.01 м.

Ограничимся рассмотрением двумерных течений и введем функцию тока ψ и завихренность φ как $u_x = \partial \psi / \partial y$, $u_y = -\partial \psi / \partial x$, $\varphi = \text{rot}_z \mathbf{u} = -\Delta \psi$. Задача (13)–(18), переписанная в терминах ψ и φ , решалась численно, методом конечных разностей, с помощью явной конечно-разностной схемы с постоянным временным шагом, равным $h^2/8$, удовлетворяющим условию устойчивости конечно-разностной схемы [20], где h – пространственный шаг сетки, который принимался постоянным и равным 1/40. Уравнение Пуассона для функции тока решалось методом последовательной верхней релаксации. Граничные условия для завихренности получены по формуле Тома [21].

В начальный момент времени для функции тока задавалось распределение в виде $\psi = 10^{-8} \sin 2\pi x \sin \pi y$, распределение концентраций компонент считалось однородным, а распределение температуры соответствовало установившемуся вертикальному градиенту.

5. Результаты

При нагреве сверху более легкие компоненты с отрицательными отношениями разделения под действием термодиффузии диффундируют к хо-

лодной нижней границе, в то время как более тяжелые компоненты накапливаются возле горячей верхней границы, что вызывает наступление неустойчивости.

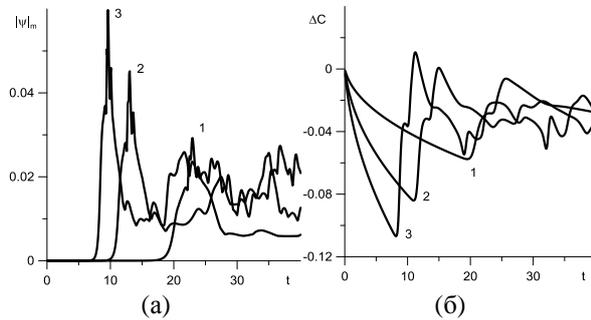


Рис. 2. Динамика бинарной смеси: а – максимальное значение модуля функции тока в полости; б – разность концентраций между центрами верхней и нижней границ (б) для бинарных смесей. 1 – смесь с $\mu_1 = -0.2$, 2 – смесь с $\mu_2 = -0.4$, 3 – смесь с $\mu_2 = -0.6$

Обсудим сначала случай бинарной смеси. На рис. 2, а представлена временная эволюция максимального значения модуля функции тока в полости. Как видно, в течение некоторого времени смесь остается неподвижной (значение $|\psi|_m$ близко к нулю). В течение этого бесконвективного периода тяжелая компонента смеси постепенно накапливается около верхней границы (абсолютная величина разности концентраций примеси ΔC между верхней и нижней границами растет, рис.2, б). В некоторый момент времени возникает неустойчивость, сопровождающаяся резким нарастанием интенсивности движения и модуля разности концентраций. Время наступления неустойчивости уменьшается с ростом величины отношения разделения $|\mu|$ (рис. 3, а). Так, например, для смеси с $\mu = -0.2$ неустойчивость возникает в момент времени $t^* \approx 19.5$, для смеси с $\mu = -0.4$ – $t^* \approx 11.0$ и для смеси с $\mu = -0.6$ – $t^* \approx 8.1$. Момент наступления неустойчивости определяется по достижению максимального абсолютного значения разности концентраций ΔC_m между центрами горизонтальных границ. Достижимое при наступлении неустойчивости максимальное значение модуля функции тока $|\psi|_{mp}$ растет с увеличением величины отношения разделения смеси $|\mu|$ (рис. 3, б). После наступления неустойчивости в полости возникают нерегулярные колебания.

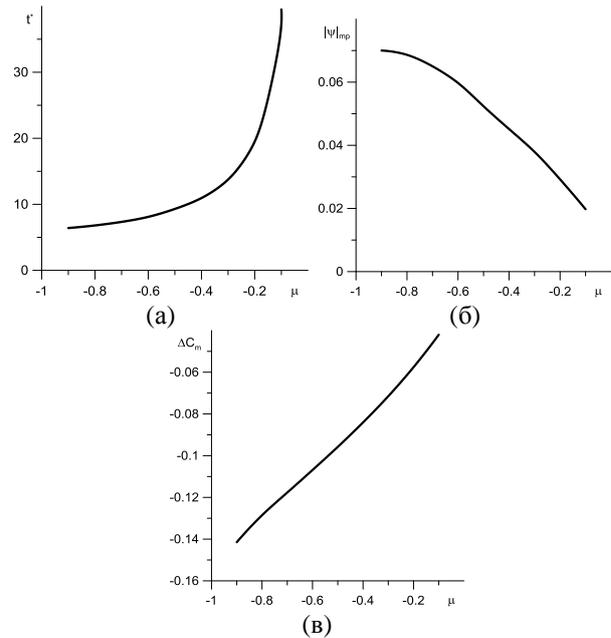


Рис. 3. Влияние отношения разделения бинарной смеси: а – время наступления неустойчивости; б – достигаемое в момент наступления неустойчивости максимальное значение модуля функции тока; в – максимальное значение разделения смеси

Отношение разделения характеризует термодиффузионные свойства смеси: при большей величине $|\mu|$ скорость разделения выше (больше угол наклона кривой $\Delta C(t)$ до наступления неустойчивости). В отсутствие тяжести при нагреве сверху конвекция не возникает, поэтому ΔC под действием термодиффузии стремится к значению, равному отношению разделения [16, 22]. В поле тяжести возникает конвективное движение, перемешивающее смесь, при $Ra = 2.5 \cdot 10^5$ максимальная величина ΔC_m , которая достигается в процессе разделения, для смеси с $\mu = -0.2$ составляет примерно $5.8 \cdot 10^{-2}$, для смеси с $\mu = -0.4$ – приблизительно $8.4 \cdot 10^{-2}$, а для смеси с $\mu = -0.6$ – $1.1 \cdot 10^{-1}$ (рис.2, б). Максимальная величина разности концентраций между горизонтальными границами увеличивается с ростом величины отношения разделения $|\mu|$ (рис. 3, в).

Конвективное движение формируется возле горизонтальных границ полости, а затем распространяется на всю полость. Распределение концентрации имеет пальцеобразный вид. На рис. 4 представлена в качестве примера временная эволюция течения и распределения концентрации примеси для бинарной смеси с $\mu = -0.2$.

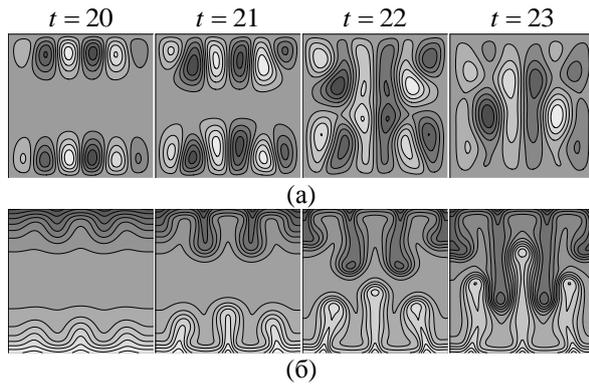


Рис. 4. Конвекция бинарной смеси: а – изолинии функции тока; б – изолинии концентрации в разные моменты времени развития неустойчивости для бинарной смеси с $\mu = -0.2$. Светлые (темные) области соответствуют большему (меньшему) значению функции тока и концентрации

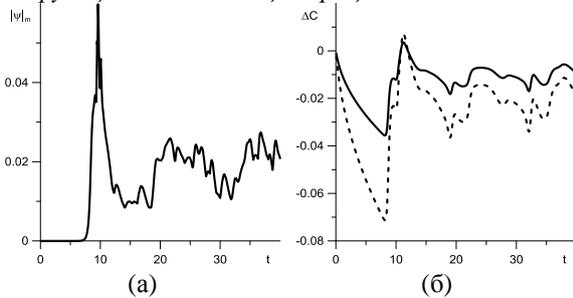


Рис. 5. Динамика трехкомпонентной смеси: а – временная эволюция максимального значения модуля функции тока в полости; б – разность концентраций между центрами верхней и нижней границ компоненты трехкомпонентной смеси с $\mu_1 = -0.2$ (сплошная кривая) и компоненты с $\mu_2 = -0.4$ (штриховая кривая)

Для трехкомпонентной смеси с отношениями разделения компонент $\mu_1 = -0.2$, $\mu_2 = -0.4$ и суммарным отношением разделения $\mu_1 + \mu_2 = -0.6$ временная эволюция максимального значения модуля функции тока в полости (рис. 5, а) практически совпадает с аналогичной зависимостью для бинарной смеси с $\mu = -0.6$.

Разделение компонент трехкомпонентной смеси (рис. 5, б) происходит с той же скоростью (кривые имеют тот же угол наклона в течение бесконтактного периода), что и в случае бинарных смесей с $\mu = -0.2$ и $\mu = -0.4$ (рис 2, б, кривые 1 и 2). Время возникновения неустойчивости t^* совпадает с временем $t^* \approx 8.1$, полученным для бинарной смеси с отношением разделения $\mu = -0.6$. После наступления неустойчивости, так же, как и для бинарной смеси, в полости возникают нерегулярные колебания.

Максимальная разность концентраций ΔC_m , которая достигается в процессе разделения, для компоненты с $\mu_1 = -0.2$ составляет приблизительно $3.6 \cdot 10^{-2}$, а для компоненты с $\mu_2 = -0.4$ – примерно $7.1 \cdot 10^{-2}$ (рис.5, б). Зависимости ΔC_m для обеих примесей от отношения разделения μ_2 при фиксированном $\mu_1 = -0.2$, показана на рис. 6. Видно, что для первой компоненты смеси зависимость меняется в достаточно узком диапазоне, а для второй компоненты качественно повторяет аналогичную зависимость для бинарной смеси. При этом с ростом величины $|\mu_2|$ величина ΔC_m компоненты с фиксированным μ_1 уменьшается.

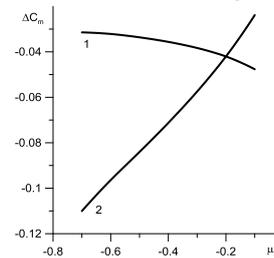


Рис. 6. Зависимость максимальной разности концентраций между центрами верхней и нижней границ от отношения разделения второй компоненты при фиксированном значении $\mu_1 = -0.2$: 1 – разность концентраций первой компоненты, 2 – разность концентраций второй компоненты

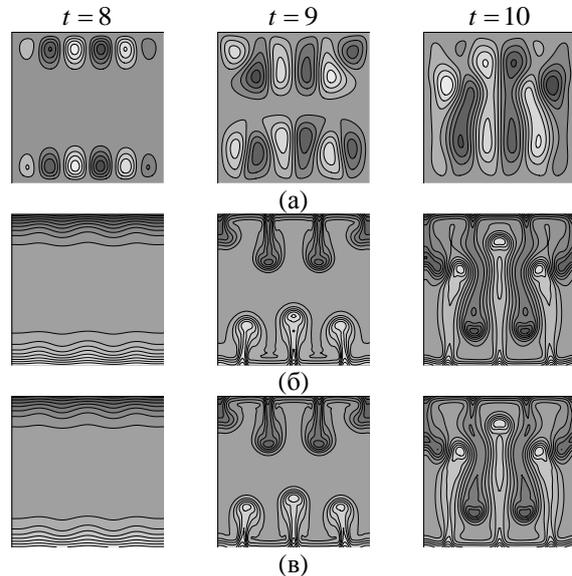


Рис. 7. Конвекция трехкомпонентной смеси: а – изолинии функции тока; б – изолинии концентрации примеси с $\mu_1 = -0.2$; в – изолинии концентрации примеси с $\mu_2 = -0.4$ в разные моменты времени развития неустойчивости для трехкомпонентной смеси. Светлые (темные) области соответствуют большему (меньшему) значению функции тока и концентрации

Формирование течения и распределений концентраций примесей в трехкомпонентной смеси (рис. 7) качественно повторяет их формирование в случае бинарной смеси. Отношения разделения примесей имеют одинаковый знак, поэтому распределения концентраций обеих примесей различаются незначительно.

6. Заключение

Численно исследована конвекция бинарных и трехкомпонентных смесей в квадратной полости, нагреваемой сверху. Параметры бинарных смесей совпадают с параметрами трехкомпонентной смеси в предельном случае равенства нулю отношения разделения одной из компонент, что позволяет проследить влияние добавления еще одной примеси к бинарной смеси.

Показано, что в случае бинарной смеси увеличение модуля отношения разделения приводит к ускорению развития неустойчивости. Величина скачка интенсивности течения, который сопровождается наступлением неустойчивости, также увеличивается с ростом величины отношения разделения смеси.

Развитие течения и время наступления неустойчивости в трехкомпонентной смеси совпадает с развитием течения в бинарной смеси с отношением разделения, равным суммарному отношению разделения трехкомпонентной смеси. Максимальное значение разности концентраций между центрами горизонтальных границ в этом случае понижается.

Анализ временных зависимостей максимального значения модуля функции тока и разности концентраций между центрами верхней и нижней границ для трехкомпонентных смесей показывает, что добавление еще одной примеси с отрицательным отношением разделения к бинарной смеси, также имеющей $\mu < 0$, приводит к ускорению возникновения неустойчивости, увеличению интенсивности течения и уменьшению максимальной разности концентраций между горизонтальными границами полости.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-21-00090).

Список литературы

1. *Firoozabadi A., Ghorayeb K.* Modeling multicomponent diffusions and convection in porous media // *SPE Journal*. 2000. Vol. 5. № 2. P. 158–171. DOI: 10.2118/62168-PA
2. *Labrosse G.* Free convection of binary liquid with variable Soret coefficient in thermogravitational column: the steady parallel base states // *Physics of Fluids*. 2003. Vol. 15. № 9. P. 2694–2727. DOI: 10.1063/1.1597875
3. *Mazzoni S., Cerbino R., Brogioli D., Vailati A., Giglio M.* Transient oscillations in Soret-driven convection in a colloidal suspension // *The European Physical Journal E*. 2004. Vol. 15. N. 3. P. 305–309. DOI: 10.1140/epje/i2004-10070-8
4. *Ryskin A., Pleiner H.* Thermal convection in colloidal suspensions with negative separation ratio // *Physical Review E*. 2005. Vol. 71, 056303. DOI: 10.1103/PhysRevE.71.056303
5. *Shevtsova V. M., Melnikov D. E., Legros J. C.* Onset of convection in Soret-driven instability // *Physical Review E*. 2006. Vol. 73, 047302. DOI: 10.1103/PhysRevE.73.047302
6. *Charrier-Mojtabi M. C., Elhajjar B., Mojtabi A.* Analytical and numerical stability analysis of Soret-driven convection in a horizontal porous layer // *Physics of Fluids*. 2007. Vol. 19, 124104. DOI: 10.1063/1.2821460
7. *Giavazzi F., Vailati A.* Scaling of the spatial power spectrum of excitations at the onset of solutal convection in a nanofluid far from equilibrium // *Physical Review E*. 2009. Vol. 80, 015303. DOI: 10.1103/PhysRevE.80.015303
8. *Марышев Б. С.* О горизонтальной напорной фильтрации смеси через пористую среду с учетом закупорки // *Вестник пермского университета. Физика*. 2016. № 3 (34). С. 12–21. DOI: 10.17072/1994-3598-2016-3-12-21
9. *Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М.* Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М.: Наука. 1972. 392 с.
10. *Вертгейм Б. А.* Об условиях возникновения конвекции в бинарной смеси // *Прикладная математика и механика*. 1955. Т. 19. № 6. С. 745.
11. *Lyubimova T., Zubova N.* Onset and nonlinear regimes of convection of binary fluid with negative separation ratio in square cavity heated from above // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017. Vol. 106. P. 1134–1143. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.10.091
12. *Lyubimova T., Zubova N., Shevtsova V.* Onset and non-linear regimes of Soret-induced convection in binary mixtures heated from above // *European Physical Journal E*. 2017. Vol. 40, 27. DOI: 10.1140/epje/i2017-11517-5
13. *Larre J. P., Platten J. K., Chavepeyer G.* Soret effects in ternary systems heated from below // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1997. Vol. 40. P. 545–555. DOI: 10.1016/0017-9310(96)00125-1
14. *Ryzhkov I. I., Shevtsova V. M.* Long-wave instability of a multicomponent fluid layer with the Soret effect // *Physics of Fluids*. 2009. Vol. 21, 014102. DOI: 10.1063/1.3054154
15. *Любимова Т. П., Зубова Н. А.* Устойчивость механического равновесия тройной смеси в квадратной полости при вертикальном градиенте температуры // *Вычислительная механика*

- сплошных сред. 2014. Т. 7. № 2. С. 200–207. DOI: 10.7242/1999-6691/2014.7.2.21
16. Lyubimova T. P., Zubova N. A. Onset of convection in a ternary mixture in a square cavity heated from above at various gravity levels // *Microgravity Science and Technology*. 2014. Vol. 26. N. 4. P. 241–247. DOI: 10.1007/s12217-014-9383-z
 17. Lyubimova T. P., Zubova N. A. Onset and nonlinear regimes of the ternary mixture convection in a square cavity // *The European Physical Journal E*. 2015. Vol. 38, 19. DOI: 10.1140/epje/i2015-15019-2
 18. Mutoru J. W., Firoozabadi A. Form of multicomponent Fickian diffusion coefficients matrix // *The Journal of Chemical Thermodynamics*. 2011. Vol. 43. P. 1192–1203. DOI: 10.1016/j.jct.2011.03.003
 19. Ryzhkov I. I., Shevtsova V. M. On thermal diffusion and convection in multicomponent mixtures with application to the thermogravitational column // *Physics of Fluids*. 2007. Vol. 19, 027101. DOI: 10.1063/1.2435619
 20. Тарунин Е. Л. Вычислительный эксперимент в задачах свободной конвекции. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1990, 228 с.
 21. Thom A., Apelt C. J. Field computations in engineering and physics. London: Van Nostrand, 1961, 165 p.
 22. Mialdun A., Shevtsova V. M. Development of optical digital interferometry technique for measurement of thermodiffusion coefficients. // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2008. Vol. 51. P. 3164–3178. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.08.020
- ### References
1. Firoozabadi A., Ghorayeb K. Modeling multicomponent diffusions and convection in porous media. *SPE Journal*, 2000, vol. 5, no. 2, pp. 158–171. DOI: 10.2118/62168-PA
 2. Labrosse G. Free convection of binary liquid with variable Soret coefficient in thermogravitational column: the steady parallel base states. *Physics of Fluids*, 2003, vol. 15, no. 9, pp. 2694–2727. DOI: 10.1063/1.1597875
 3. Mazzoni S., Cerbino R., Brogioli D., Vailati A., Giglio M. Transient oscillations in Soret-driven convection in a colloidal suspension. *European Physical Journal E*, 2004, vol. 15, no. 3. pp. 305–309. DOI: 10.1140/epje/i2004-10070-8
 4. Ryskin A., Pleiner H. Thermal convection in colloidal suspensions with negative separation ratio. *Physical Review E*, 2005, vol. 71, 056303. DOI: 10.1103/PhysRevE.71.056303
 5. Shevtsova V. M., Melnikov D. E., Legros J. C. Onset of convection in Soret-driven instability. *Physical Review E*, 2006, vol. 73, 047302. DOI: 10.1103/PhysRevE.73.047302
 6. Charrier-Mojtabi M. C., Elhajjar B., Mojtabi A. Analytical and numerical stability analysis of Soret-driven convection in a horizontal porous layer. *Physics of Fluids*, 2007, vol. 19, 124104. DOI: 10.1063/1.2821460
 7. Giavazzi F., Vailati A. Scaling of the spatial power spectrum of excitations at the onset of solutal convection in a nanofluid far from equilibrium. *Physical Review E*, 2009, vol. 80, 015303. DOI: 10.1103/PhysRevE.80.015303
 8. Maryshev B. S. On the horizontal pressure filtration of the mixture through a porous medium with clogging. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2016, no. 3 (34), pp. 12–21. DOI: 10.17072/1994-3598-2016-3-12-21
 9. Gershuni G. Z., Zhukhovitskii E. M. *Convective stability of incompressible fluids*. Jerusalem: Keterpress, 1976, 330 p.
 10. Vertgeim B. A. Ob usloviyah vozniknoveniya konveksii v binarnoy smesi (Concentration conditions in a binary mixture). *Prikladnaya Matematika i Mekhanika* (Applied Mathematics and Mechanics), 1955, vol. 19, no. 6, pp. 745 (In Russian).
 11. Lyubimova T., Zubova N. Onset and nonlinear regimes of convection of binary fluid with negative separation ratio in square cavity heated from above. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, vol. 106, pp. 1134–1143. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.10.091
 12. Lyubimova T., Zubova N., Shevtsova V. Onset and non-linear regimes of Soret-induced convection in binary mixtures heated from above. *European Physical Journal E*, 2017, V. 40, 27. DOI: 10.1140/epje/i2017-11517-5
 13. Larre J. P., Platten J. K., Chavepeyer G. Soret effects in ternary systems heated from below. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1997, vol. 40, pp. 545–555. DOI: 10.1016/0017-9310(96)00125-1
 14. Ryzhkov I. I., Shevtsova V. M. Long-wave instability of a multicomponent fluid layer with the Soret effect. *Physics of Fluids*, 2009, vol. 21, 014102. DOI: 10.1063/1.3054154
 15. Lyubimova T. P., Zubova N. A. Stability of ternary mixtures mechanical equilibrium in a square cavity with vertical temperature gradient. *Computational continuum mechanics*, 2014, vol. 7, no. 2, pp. 200–207 (In Russian). DOI: 10.7242/1999-6691/2014.7.2.21
 16. Lyubimova T. P., Zubova N. A. Onset of convection in a ternary mixture in a square cavity heated from above at various gravity levels. *Microgravity Science and Technology*, 2014, vol. 26, no. 4, pp. 241–247. DOI: 10.1007/s12217-014-9383-z
 17. Lyubimova T. P., Zubova N. A. Onset and nonlinear regimes of the ternary mixture convection in a square cavity. *European Physical Journal E*, 2015, vol. 38, 19. DOI: 10.1140/epje/i2015-15019-2

18. Mutoru J. W., Firoozabadi A. Form of multicomponent Fickian diffusion coefficients matrix. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 2011, vol. 43, pp. 1192–1203.
DOI: 10.1016/j.jct.2011.03.003
19. Ryzhkov I. I., Shevtsova V. M. On thermal diffusion and convection in multicomponent mixtures with application to the thermogravitational column. *Physics of Fluids*, 2007, vol. 19, 027101.
DOI: 10.1063/1.2435619
20. Tarunin E. L. *Vyichislitelnyy eksperiment v zadachah svobodnoy konveksii* (Computational experiment in free convection problems). Irkutsk: Irkutsk University, 1990, 228 p. (In Russian)
21. Thom A., Apelt C. J. *Field computations in engineering and physics*. London: Van Nostrand, 1961, 165 p.
22. Mialdun A., Shevtsova V. M. Development of optical digital interferometry technique for measurement of thermodiffusion coefficients. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, vol. 51, pp. 3164–3178.
DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.08.020

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Зубова Н. А., Любимова Т. П. Термоконцентрационная конвекция бинарных и трехкомпонентных смесей в квадратной полости при нагреве сверху // Вестник Пермского университета. Физика. 2017. № 2 (36). С. 74–82. doi: 10.17072/1994-3598-2017-2-74-82

Please cite this article in English as:

Zubova N. A., Lyubimova T. P. Soret-induced convection of binary and ternary mixtures in square cavity heating from above. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2017, no. 2 (36), pp. 74–82. doi: 10.17072/1994-3598-2017-2-74-82