

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN  
PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES

ISSN 1991-346X

Volume 5, Number 315 (2017), 134 – 142

V.N. Kossov<sup>1</sup>, D.B. Zhakebaev<sup>2</sup>, O.V. Fedorenko<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan;

<sup>2</sup> Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan;

<sup>3</sup> Institute of Experimental and Theoretical Physics, Almaty, Kazakhstan

[kosov\\_vlad\\_nik@list.ru](mailto:kosov_vlad_nik@list.ru)

**NUMERICAL ANALYSIS OF CONVECTIVE MOTIONS  
OCCURRING UNDER ISOTHERMAL DIFFUSION IN THE VERTICAL  
CHANNELS IN TERNARY GASEOUS MIXTURES**

**Abstract.** There is a wide variety of mixing regimes in a multicomponent gas mixture. Solution of the issues related to the boundary determination of change in the diffusion-convection regimes in multicomponent mixtures, the parameters indicating the occurrence of a convective regime are important for the problems of convective mass transfer.

The paper proposes a computational model on the study of diffusion isothermal transport in ternary gas mixtures having different ratios between the transport coefficients over time by means of 2-D modeling in a vertical cylindrical channel of finite dimensions.

The isothermal diffusion mixing in three-component gas mixtures in cylindrical vertical channels is considered by the splitting method into physical parameters. It is shown that in systems where the diffusion coefficients of the components are comparable with each other, the instability of mechanical equilibrium is impossible. Convective motions may arise for systems in which there is a significant difference in the diffusion coefficients of components. Flows with low velocities arise at the initial stage. Then, developed structured currents are realized. The results of the calculations are in satisfactory agreement with the experimental data, which makes it possible to recommend the proposed approach for determining the boundary of change in the diffusion-to-concentration convection regimes in gas mixtures.

**Key words:** diffusion, convection, gases, mixtures, numerical analysis.

УДК 533.15:536.25

В.Н.Косов<sup>1</sup>, Д.Б. Жакебаев<sup>2</sup>, О.В. Федоренко<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Казахский национальный педагогический университет им. Абая, Алматы, Казахстан;

<sup>2</sup> Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан;

<sup>3</sup> Институт экспериментальной и теоретической физики, Алматы, Казахстан

**Численный анализ конвективных движений, возникающих  
при изотермической диффузии в вертикальных  
каналах в трехкомпонентных газовых смесях**

**Аннотация.** В многокомпонентных газовых смесях имеет место большое разнообразие режимов смешения. Решение вопросов связанных с определением границы смены режимов «диффузия – конвекция» в многокомпонентных смесях, параметров определяющих возникновение конвективного режима являются важными для задач конвективного массопереноса.

В работе предлагается расчетная модель по изучению диффузионного изотермического переноса в трехкомпонентных газовых смесях с различными соотношениями между коэффициентами переноса с течением времени посредством 2-D моделирования в вертикальном цилиндрическом канале конечных размеров.

Методом расщепления по физическим параметрам рассмотрено изотермическое диффузионное смешение в трехкомпонентных газовых смесях в цилиндрических вертикальных каналах. Показано, что в системах, где коэффициенты диффузии компонентов сравнимы друг с другом, неустойчивость механического равновесия невозможна. Для систем, в которых имеет место существенное отличие коэффициентов диффузии компонентов могут возникнуть конвективные движения. На начальной стадии возникают течения с малыми скоростями. Затем реализуются развитые структурированные течения. Результаты расчетов находятся в удовлетворительном согласии с опытными данными, что позволяет рекомендовать предлагаемый подход для определения границы смены режимов «диффузия – концентрационная конвекция» в газовых смесях.

**Ключевые слова:** диффузия, конвекция, газы, смеси, численный анализ.

### Введение

В многокомпонентных газовых смесях существует большое разнообразие режимов смешения [1]. Интенсивность массопереноса в них определяется молекулярным, конвективным, а чаще всего совместным действием перечисленных режимов. При этом практически не принимается во внимание факт, что молекулярная диффузия может привести к неустойчивости механического равновесия смеси с последующим возникновением естественной конвекции, которая заметно интенсифицирует суммарный массоперенос [2]. Причем возникновение и развитие концентрационной конвекции происходит не только в рамках традиционных представлений тепловых задач Рэлея [3], но и для ситуаций, когда движения возникают при устойчивой стратификации в изотермической смеси [4,5]. В опытах по изучению смешения в многокомпонентных системах [6], диффузии смеси паров растворов в инертный газ [7] были зарегистрированы конвективные течения, приводящие к синергетическому эффекту, связанному со значительным увеличением скорости смешения компонентов системы. Поэтому решение вопросов связанных с определением механизма смены режимов «диффузия – конвекция» в многокомпонентных газовых смесях, параметров определяющих возникновение конвективного режима являются важными для задач конвективного массопереноса.

В работе предлагается расчетная модель по изучению диффузионного изотермического переноса в трехкомпонентных газовых смесях с различными соотношениями между коэффициентами переноса с течением времени посредством 2-D моделирования в вертикальном цилиндрическом канале конечных размеров. Проводится сравнение между расчетными результатами и опытными данными.

### Базовые уравнения

Конвективное смешение изотермической тройной газовой смеси описывается общей системой уравнений гидродинамики, которая включает в себя записанные в приближении Буссинеска уравнения Навье-Стокса, сохранения числа частиц смеси и компонентов [6, 8-10]. Принимая во

внимание условие независимой диффузии, при которой для газовой смеси  $\sum_{i=1}^3 \vec{j}_i = 0$ ;  $\sum_{i=1}^3 c_i = 1$ ,

эта система уравнений имеет следующий вид:

$$\rho \left[ \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \nabla \vec{u}) \right] = -\nabla p + \eta \nabla^2 \vec{u} + \left( \frac{\eta}{3} + \xi \right) \nabla \operatorname{div} \vec{u} + \rho \vec{g},$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \operatorname{div}(n \vec{v}) = 0, \quad \frac{\partial c_i}{\partial t} + \vec{v} \nabla c_i = -\operatorname{div} \vec{j}_i, \quad (1)$$

$$\vec{j}_1 = -(D_{11}^* \nabla c_1 + D_{12}^* \nabla c_2),$$

$$\vec{j}_2 = -(D_{21}^* \nabla c_1 + D_{22}^* \nabla c_2).$$

Здесь  $\vec{u}$  – вектор среднemasовой скорости;  $\vec{v}$  – вектор среднечисловой скорости;  $\rho$  – плотность;  $p$  – давление;  $\eta$  и  $\zeta$  – коэффициенты сдвиговой и объемной вязкости;  $\vec{g}$  – вектор ускорения свободного падения;  $n$  – числовая плотность;  $t$  – время;  $c_i$  – концентрация  $i$ -го компонента;  $\vec{j}_i$  – вектор плотности диффузионного потока  $i$ -го компонента;  $D_{ij}^*$  – практические коэффициенты диффузии, которые определяются через коэффициенты взаимной диффузии  $D_{ij}$

$$D_{11}^* = \frac{D_{13} [c_1 D_{32} + (c_2 + c_3) D_{12}]}{D}, \quad D_{12}^* = -\frac{c_1 D_{23} (D_{12} - D_{13})}{D},$$

$$D_{22}^* = \frac{D_{23} [c_2 D_{13} + (c_1 + c_3) D_{12}]}{D}, \quad D_{21}^* = -\frac{c_2 D_{13} (D_{12} - D_{23})}{D},$$

$$D = c_1 D_{23} + c_2 D_{13} + c_3 D_{12}.$$

Связь между  $\vec{j}_i$ ,  $\vec{u}$  и  $\vec{v}$  определяется соотношением

$$\vec{v} = \sum \vec{j}_i / c_0, \quad \vec{u} = \sum m_i \vec{j}_i / \rho,$$

где  $m_i$  – молекулярная масса  $i$ -го компонента,

$$\rho = \sum m_i c_i, \quad c_0 = \sum_{i=1}^n c_i.$$

Система уравнений (1) дополняется уравнением состояния среды

$$\rho = \rho(c_1, c_2, p), \quad T = \text{const} \quad (2)$$

Упростим (1), (2) используя метод малых возмущений [8-10], в котором предполагается, что концентрацию  $i$ -го компонента  $c_i$  и давление  $p$  представим в виде суперпозиции постоянных средних значений  $\langle c_i \rangle$ ,  $\langle p \rangle$ , принимаемых в качестве начала отсчета и малых возмущений  $c_i'$ ,  $p'$  следующим образом:

$$c_i = \langle c_i \rangle + c_i', \quad p = \langle p \rangle + p'.$$

Возмущения  $c_i'$ ,  $p'$  малы и обусловленные ими отклонения плотности  $c'$  от среднего значения  $c_0 = c(\langle c_i \rangle, \langle p \rangle)$  малы по сравнению с  $c_0$ , а также считая, что различия в возмущенных значениях скоростей не существенны [8], систему уравнений (1) возможно свести к возмущенным уравнениям (штрихи опущены) следующего вида

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \nabla) \vec{u} = -\frac{1}{\rho_0} \nabla p + \nu \nabla^2 \vec{u} + g(\beta_1 c_1 + \beta_2 c_2) \vec{y}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial c_1}{\partial t} + \vec{u} \nabla c_1 = D_{11}^* \nabla^2 c_1 + D_{12}^* \nabla^2 c_2,$$

$$\frac{\partial c_2}{\partial t} + \vec{u} \nabla c_2 = D_{21}^* \nabla^2 c_1 + D_{22}^* \nabla^2 c_2,$$

$$\operatorname{div} \vec{u} = 0.$$

В системе уравнений (3)  $\nu = \eta / \rho$  – кинематическая вязкость смеси,  $\beta_i$  – изотермический аналог коэффициента теплового расширения,  $\vec{y}$  – единичный вектор.

Обезразмерим уравнения (3) относительно заданных масштабных единиц: длины –  $x_1^* = \frac{x}{H}$ ,  $x_2^* = \frac{z}{H}$ , времени –  $\tau = \frac{t\nu}{H^2}$ , скорости –  $u_1^* = \frac{uH}{D_{22}^*}$ ,  $u_2^* = \frac{wH}{D_{22}^*}$ , давления –

$p^* = p \frac{H^2}{\rho_0 \nu D_{22}^*}$ , концентрации  $i$ -го компонента  $c_1^* = \frac{c_1}{A_1 H}$ ,  $c_2^* = \frac{c_2}{A_2 H}$ . Преобразованная

безразмерная система уравнений имеет следующий вид (здесь и далее знак «\*» опускаем):

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_1}{\partial \tau} + \frac{1}{P_{22}} u_1 \frac{\partial(u_1)}{\partial(x_1)} + \frac{1}{P_{22}} u_2 \frac{\partial u_1}{\partial(x_2)} &= -\frac{\partial p}{\partial(x_1)} + \frac{\partial^2 u_1}{\partial(x_1)^2} + \frac{\partial^2 u_1}{\partial(x_2)^2} + R_1 c_1, \\ \frac{\partial u_2}{\partial \tau} + \frac{1}{P_{22}} u_1 \frac{\partial(u_2)}{\partial(x_1)} + \frac{1}{P_{22}} u_2 \frac{\partial u_2}{\partial(x_2)} &= -\frac{\partial p}{\partial(x_1)} + \frac{\partial^2 u_2}{\partial(x_1)^2} + \frac{\partial^2 u_2}{\partial(x_2)^2} + R_2 c_2, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(c_1)}{\partial(\tau)} + \frac{1}{P_{22}} u_1 \frac{\partial(c_1)}{\partial(x_1)} + \frac{1}{P_{22}} u_2 \frac{\partial(c_1)}{\partial(x_2)} &= \\ \frac{1}{P_{11}} \frac{\partial^2(c_1)}{\partial(x_1)^2} + \frac{1}{P_{11}} \frac{\partial^2(c_1)}{\partial(x_2)^2} + \frac{1}{P_{12}} \frac{\partial^2(c_2)}{\partial(x_1)^2} + \frac{1}{P_{12}} \frac{\partial^2(c_2)}{\partial(x_2)^2}, \\ \frac{\partial(c_2)}{\partial(\tau)} + \frac{1}{P_{22}} u_1 \frac{\partial(c_2)}{\partial(x_1)} + \frac{1}{P_{22}} u_2 \frac{\partial(c_2)}{\partial(x_2)} &= \\ \frac{1}{P_{21}} \frac{\partial^2(c_1)}{\partial(x_1)^2} + \frac{1}{P_{21}} \frac{\partial^2(c_1)}{\partial(x_2)^2} + \frac{1}{P_{22}} \frac{\partial^2(c_2)}{\partial(x_1)^2} + \frac{1}{P_{22}} \frac{\partial^2(c_2)}{\partial(x_2)^2}, \end{aligned}$$

$$\frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} = 0.$$

Критериальными параметрами подобия являются:

$$P_{ii} = \frac{\nu}{D_{ii}^*} - \text{диффузионное число Прандтля}, \quad R_1 = \frac{g\beta_1 A_1 H^4}{D_{22}^* \nu}, \quad R_2 = \frac{g\beta_2 A_2 H^4}{D_{22}^* \nu} - \text{парциальное}$$

число Рэлея,  $A_1 = c_1/d$ ,  $A_2 = c_2/d$ .

Начальные условия:

1) Для скорости:  $u_i(x_1, x_2, \tau = 0) = 0, i = 1, 2$ .

2) Изучается процесс, когда тяжелые и легкие газы расположены в верхней части вычислительной области, а газ с промежуточной плотностью – в нижней части. Для концентрации в верхней вычислительной области  $S_1$  (рис. 1а):  $c_1|_{t=0, (x_1, x_2) \in S_1} = X_1$  для самого легкого по плотности компонента,  $c_2|_{t=0, (x_1, x_2) \in S_1} = X_2$  для самого тяжелого по плотности компонента,  $c_3|_{t=0, (x_1, x_2) \in S_1} = 0$  для компонента, который имеет промежуточную плотность,  $X_1, X_2$  мольные концентрации компонентов смеси в вычислительной области  $S_1$ .

3) Для концентрации в нижней вычислительной области  $S_0$  (рис. 1а):  $c_1|_{t=0, (x_1, x_2) \in S_0} = 0$  для легкого компонента,  $c_2|_{t=0, (x_1, x_2) \in S_0} = 0$  для тяжелого компонента,  $c_3|_{t=0, (x_1, x_2) \in S_0} = 1$  для компонента имеющего промежуточное значение плотности.

Граничные условия:

Для скорости смешения:  $u_i = 0, i = 1, 2$ ; для концентрации компонентов:  $\frac{\partial c_i}{\partial n} = 0, i = 1, 2$ .

### Численный алгоритм

Как следует из опытных данных смешение осуществляется в канале, который, как правило, имеет цилиндрическую форму. Тяжелый и легкий по плотностям компоненты бинарной смеси находятся в верхней части канала, а газ с промежуточной плотностью в нижней части канала. Для упрощения задачи рассматривается двумерная область сечение цилиндрической области  $H \times d$  в декартовой системе координат  $(x, y)$ , где  $H$  – высота цилиндрического канала, а  $d = 2r$  – диаметр (рис. 1б). Для регистрации изоконцентрационных линий, характеризующих возникновение и развитие конвекции, достаточно рассматривать часть данной области ( $H/d \gg 1$ ), где происходит диффузия компонентов (рис. 1б), пренебрегая остальными областями двумерной области.

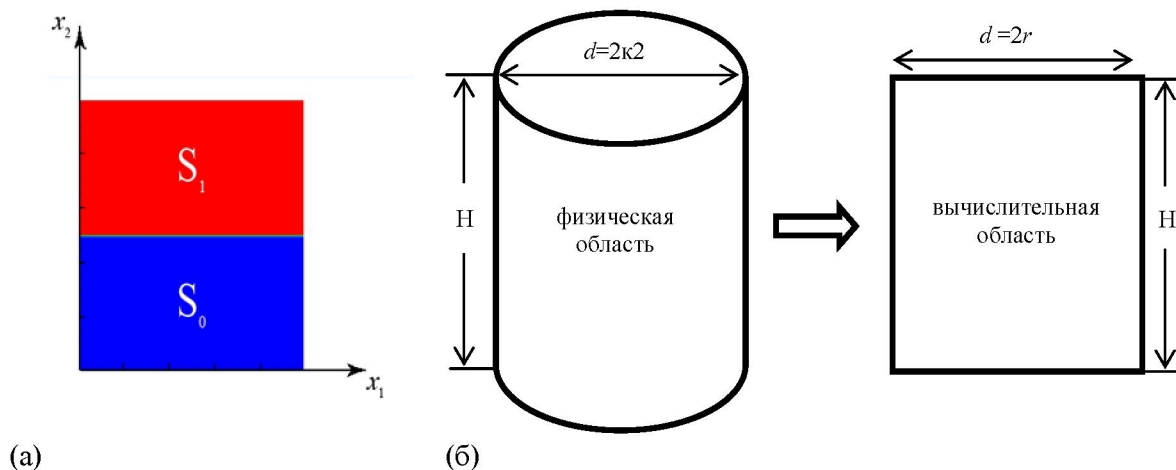


Рисунок 1 - Моделирование исследуемого процесса: а) Начальные условия размещения трехкомпонентных смесей в диффузионном канале; б) Физические и вычислительные области смешения

Для численного решения системы уравнений (3) используется схема расщепления по физическим параметрам. Пространственные производные аппроксимируются на равномерной прямоугольной сетке с числом узлов  $64 \times 64$ . Производные по времени аппроксимируются разностями вперед с первым порядком.

На первом этапе перенос количества движения осуществляется только за счет конвекции и диффузии. Промежуточное поле скорости находится методом пятиточечной прогонки [11] с

четвертым порядком точности по пространству и третьим порядком точности по времени с использованием явной схемы Адамса-Башфорта для конвективных членов и неявной схемы Кранка-Николсона для диффузионных членов [12]

$$\frac{\bar{u}^{*} - \bar{u}^n}{\tau} = -\bar{u}^n \nabla \bar{u}^{*} + \Delta \bar{u}^{*} + \tau_{11} Ra_1 C_1 + Ra_2 C_2. \quad (4)$$

На втором этапе, по найденному промежуточному полю скорости, находится поле давления. Промежуточное поле скорости находится при использовании метода дробных шагов. На каждом этапе метода дробных шагов используется метод прогонки для нахождения этапных значений промежуточного поля скорости [13]

$$\Delta p = \frac{\nabla \bar{u}^{*}}{\tau}. \quad (5)$$

На третьем этапе предполагается, что перенос осуществляется только за счет градиента давления, где пересчитывается окончательное поле скоростей

$$\frac{\bar{u}^{n+1} - \bar{u}^{*}}{\tau} = -\nabla p. \quad (6)$$

На четвертом этапе вычисляется концентрация компонентов смеси на основе метода пятиточечной прогонки с использованием схемы Адамса-Башфорта с учетом найденных полей скоростей.

$$\frac{\bar{C}_1^{n+1} - \bar{C}_1^n}{\tau} = -\left(\bar{u}^{n+1} \nabla\right) \bar{C}_1^{*} + \frac{1}{Pr_{11}} \Delta \bar{C}_1^{*} + \frac{1}{Pr_{12}} \Delta \bar{C}_2^{*}, \quad (7)$$

$$\frac{\bar{C}_2^{n+1} - \bar{C}_2^n}{\tau} = -\left(\bar{u}^{n+1} \nabla\right) \bar{C}_2^{*} + \frac{1}{Pr_{21}} \Delta \bar{C}_1^{*} + \frac{1}{Pr_{22}} \Delta \bar{C}_2^{*}. \quad (8)$$

### Результаты численного моделирования

Проанализируем результаты численного исследования, выполненные для реальных физических характеристики геометрических параметров канала по предложенной схеме (4) – (8). Основным допущением при моделировании является ограничение двумерными течениями. Как было показано экспериментальными исследованиями [5] в системах, где коэффициенты диффузии компонентов сравнимы друг с другом, массоперенос осуществляется за счет диффузии. Приведенные на рис. 2 а, б изоконцентрационные линии для системы  $0,65 \text{ CH}_4(1) + 0,35 \text{ Ar}(2) - \text{N}_2(3)$  практически не искривленные, что говорит об отсутствии конвективных возмущений в таких смесях.

Совершенно другая ситуация возникает в системе  $0,40 \text{ He}(1) + 0,60 \text{ Ar}(2) - \text{N}_2(3)$ , где  $D_{ij}$  существенно отличаются друг от друга. При давлении  $P \sim 2,0$  МПа изображение изоконцентрационных линий искривляются. С течением времени формируются условия для конвективных структурных формирований и происходит переход от диффузионного режима к конвективному. Полученные результаты совпадают с экспериментальными данными, наблюдаемыми в [4,6,8]. Таким образом, основным признаком смены режимов «диффузия – конвекция» это проявление искривления изоконцентрационных линий.

Результаты расчетов показывают, что на начальной стадии возникают течения с малыми скоростями. Затем развитие более интенсивных течений приводит к существенному искривлению изоконцентрационных линий и увеличения скорости переноса. Время потери устойчивости механического равновесия смеси для данной системы составляет десятки секунд, что соизмеримо с опытными данными, приведенными в [8]. Затем наблюдается быстрое развитие



конвективных течений. Конвективные течения реализуются в виде крупномасштабных структур. Таким образом, результаты сравнения показывают, что используемая модель и метод расчета позволяет определить параметры смены режимов «диффузия – концентрационная конвекция», получить надежные данные по концентрационным полям в режиме конвективной неустойчивости у изотермических трехкомпонентных газовых смесях.

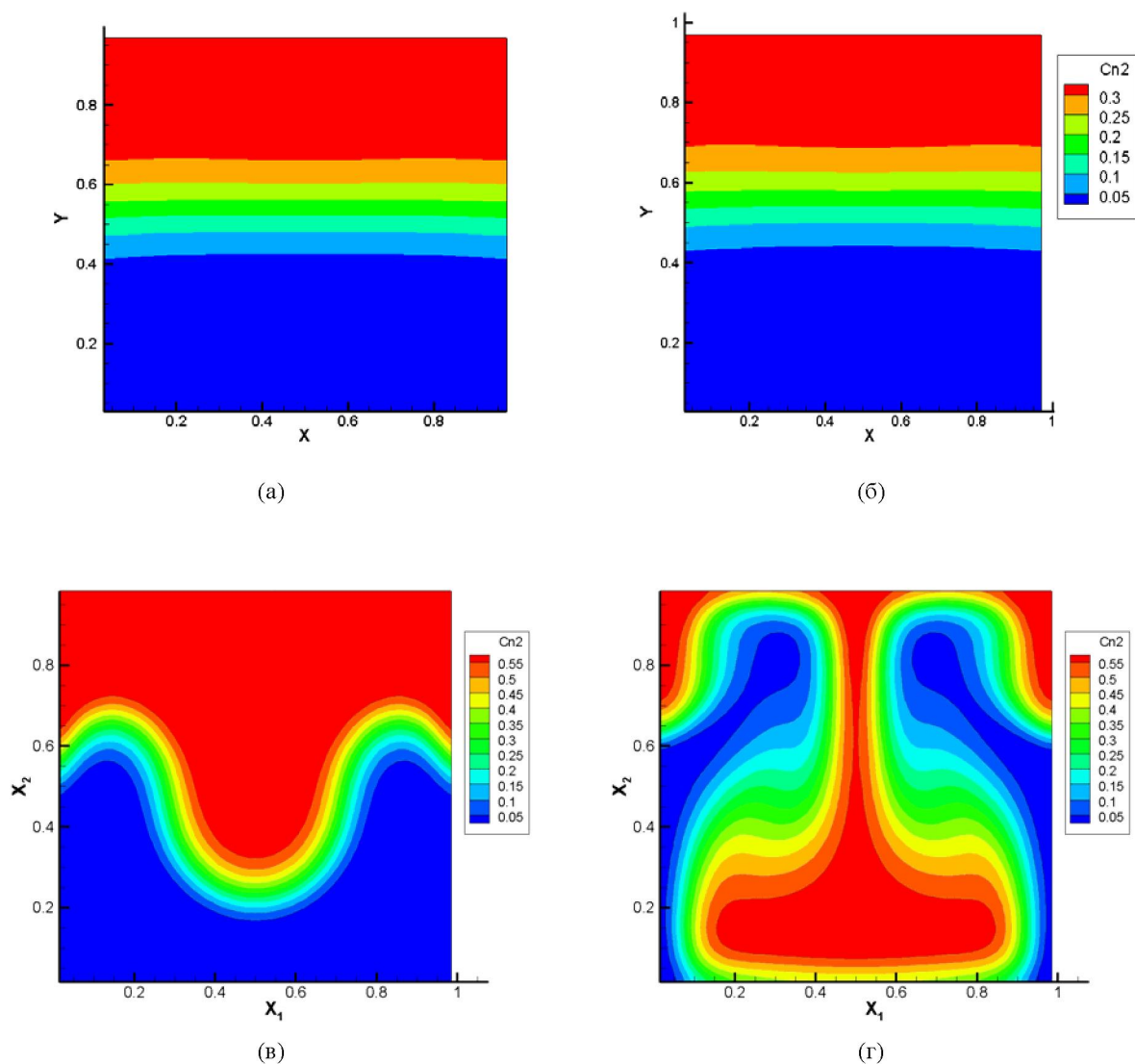


Рисунок 2 - Изоконцентрационные линии для трехкомпонентных систем: а)  $0,65 \text{ CH}_4 (1) + 0,35 \text{ Ar} (2) - \text{N}_2 (3)$ ,  $P = 1,5 \text{ МПа}$ ,  $t = 13,5 \text{ с}$ ,  $T = 298,0 \text{ К}$ ; б)  $0,65 \text{ CH}_4 (1) + 0,35 \text{ Ar} (2) - \text{N}_2 (3)$ ,  $P = 2,0 \text{ МПа}$ ,  $T = 298,0 \text{ К}$ ,  $t = 18 \text{ с}$ ; в)  $0,4 \text{ He} (1) + 0,6 \text{ Ar} (2) - \text{N}_2 (3)$ ,  $P = 2,5 \text{ МПа}$ ,  $T = 298,0 \text{ К}$ ,  $t = 10,55 \text{ с}$ ; г)  $0,4 \text{ He} (1) + 0,6 \text{ Ar} (2) - \text{N}_2 (3)$ ,  $P = 2,5 \text{ МПа}$ ,  $T = 298,0 \text{ К}$ ,  $t = 20,30 \text{ с}$ .

Работа выполнялась в рамках проекта Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан №3482/ГФ, государственная регистрация 0115RK01033.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Taylor R, Krishna R (1993) Multicomponent mass transfer. John Wiley & Sons, Inc., New York. ISBN: 978-0-471-57417-0
- [2] Kaminskii V.A., Obvintseva N.Yu. (2007) Evaporation Regimes of Binary Solutions, Theor. Found. Chem. Engin., 41: 512-518. DOI: 10.1134/S0040579507050090
- [3] Джозеф Д. (1981) Устойчивость движений жидкости, пер. с англ. Мир, Москва.
- [4] Kosov V.N., Seleznev V.D., Zhavrin YuI. (1997). Separation of Components during Isothermal Mixing of Ternary Gas Systems under Free Convection Conditions. Tech. Phys., 42: 1236-1237. DOI: 10.1134/1.1258905

- [5] Zhavrin Yu.I., Kosov V.N., Fedorenko O.V., Akzholova A.A. (2016) Some Features of the Multicomponent Gas Transfer in the Convective Instability of Gas Mixture. *Theor. Found. Chem. Engin.*, 50: 171-177. DOI: 10.1134/S0040579516020135
- [6] Kosov V.N., Fedorenko O.V., Zhavrin Yu.I., Mukamedenkyzy V. (2014) Instability of Mechanical Equilibrium during Diffusion in a Three-component Gas Mixture in a Vertical Cylinder With a Circular Cross Section. *Tech. Phys.*, 59: 482-486. DOI: 10.1134/S1063784214040161
- [7] Dil'man V.V., Lipatov D.A., Lotkhov V.A., Kaminskii V.A. (2005) Instability in Unsteady-state Evaporation of Binary Solutions into an Inert Gas. *Theor. Found. Chem. Engin.*, 39: 566-572. DOI: 10.1007/s11236-005-0118-0
- [8] Косов В.Н., Селезнев В.Д. (2004) Аномальное возникновение свободной гравитационной конвекции в изотермических тройных газовых смесях. Екатеринбург: УрОПАН. ISBN: 5-7691-1441-X
- [9] Гершун Г.З., Жуховицкий Е.М. (1972) Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. Наука, Москва.
- [10] Полежаев В.И., Бунэ А.В., Верезуб Н.А. и др. (1987) Математическое моделирование конвективно-теплообмена на основе уравнений Навье-Стокса. Наука, Москва.
- [11] Navon M. (1987) Pent: aPeriodicPenta-diagonalSystemsSolver. *Commun. inAppliedNumer. Methods*, 3: 63-69. DOI: 0748-8025/87/010063-07\$05.00
- [12] Kim J., Moin P. (1985) Application of a Fractional-Step Method to Incompressible Navier-Stokes Equations. *J. Comp. Phys.*, 59: 308-323. DOI: 10.1016/0021-9991(85)90148-2
- [13] Abdibekova A.U., Zhakebayev D.B., Zhumagulov B.T. (2014) The Decay of MHD Turbulence Depending on the Conducting Properties of Environment. *Magnetohydrodynamics*, 50: 121-138.

#### REFERENCES

- [1] Taylor R., Krishna R. (1993) Multicomponent mass transfer. John Wiley & Sons, Inc., New York. ISBN: 978-0-471-57417-0
- [2] Kaminskii V.A., Obvintseva N.Yu. (2007) Evaporation Regimes of Binary Solutions. *Theor. Found. Chem. Engin.*, 41: 512-518. DOI: 10.1134/S0040579507050090
- [3] Joseph D.D. (1981) Stability of Fluid Motions [Ustojchivost' dvizhenijzhidkosti]. Mir, Moscow. (in Russian)
- [4] Kosov V.N., Seleznev V.D., Zhavrin Yu.I. (1997) Separation of Components during Isothermal Mixing of Ternary Gas Systems under Free Convection Conditions. *Tech. Phys.*, 42: 1236-1237. DOI: 10.1134/1.1258905
- [5] Zhavrin Yu.I., Kosov V.N., Fedorenko O.V., Akzholova A.A. (2016) Some Features of the Multicomponent Gas Transfer in the Convective Instability of Gas Mixture. *Theor. Found. Chem. Engin.*, 50: 171-177. DOI: 10.1134/S0040579516020135
- [6] Kosov V.N., Fedorenko O.V., Zhavrin Yu.I., Mukamedenkyzy V. (2014) Instability of Mechanical Equilibrium during Diffusion in a Three-component Gas Mixture in a Vertical Cylinder With a Circular Cross Section. *Tech. Phys.*, 59: 482-486. DOI: 10.1134/S1063784214040161
- [7] Dil'man V.V., Lipatov D.A., Lotkhov V.A., Kaminskii V.A. (2005) Instability in Unsteady-state Evaporation of Binary Solutions into an Inert Gas. *Theor. Found. Chem. Engin.*, 39: 566-572. DOI: 10.1007/s11236-005-0118-0
- [8] Kosov V.N., Seleznev V.D. (2004). Anomalous Onset of the Free Gravitational Convection in Isothermal Ternary Gas Mixtures [Anomal'noezhiznoveniesvobodnojgravitacionnojkonvekcii v izotermicheskikh trojnyh gazovyh smesjah]. Ural Branch Russian Academy of Science, Yekaterinburg. (in Russian)
- [9] Gershuni G.Z., Zhukhovitskii E.M. (1972) Convective stability of incompressible fluid [Konvektivnaya ustojchivost' neszhimaemojzhidkosti]. Nauka, Moscow. (in Russian)
- [10] Polezhaev V.I., Bune A.V., Veresub N.A. and others (1987) Mathematical modeling of convective heat and mass transfer based on the Navier-Stokes equations [Matematicheskoe modelirovanie konvektivnogo teplotmassoobmenana osnove uravnenij Nav'e-Stoksa]. Nauka, Moscow. (in Russian)
- [11] Navon M. (1987) Pent: aPeriodicPenta-diagonalSystemsSolver. *Commun. inAppliedNumer. Methods*, 3: 63-69. DOI: 0748-8025/87/010063-07\$05.00
- [12] Kim J., Moin P. (1985) Application of a Fractional-Step Method to Incompressible Navier-Stokes Equations. *J. Comp. Phys.*, 59: 308-323. DOI: 10.1016/0021-9991(85)90148-2
- [13] Abdibekova A.U., Zhakebayev D.B., Zhumagulov B.T. (2014) The Decay of MHD Turbulence Depending on the Conducting Properties of Environment. *Magnetohydrodynamics*, 50: 121-138.

**В.Н.Косов<sup>1</sup>, Д.Б. Жакебаев<sup>2</sup>, О.В. Федоренко<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Алматы, Қазақстан;

<sup>2</sup> Аль-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан;

<sup>3</sup> Эксперименталды және теориялық физика институты, Алматы, Қазақстан

#### ИЗОТЕРМИЯЛЫҚ ДИФФУЗИЯ КЕЗІНДЕГІ ТІК КАНАЛДАРДАҒЫ ҮШКОМПОНЕНТТІ ГАЗДАР ҚОСПАЛАРЫНДА ПАЙДА БОЛАТЫН КОНВЕКТИВТІК ҚОЗҒАЛЫСТАРДЫҢ САНДЫҚ ТАЛДАУЫ

**Аннотация.** Көпкомпонентті газдар қоспаларында араласу тәртібінің әртүрі көптеп орын алады. Көпкомпонентті газдар қоспаларында «диффузия – конвекция» тәртібінің алмасуы шекарасын анықтауға



байланысты сұрақтар, конвективті тәртіптің пайда болуын анықтайтын параметрлер конвективті масса тасымалдау мәселелері бойынша маңызды болып табылады. Көпкомпонентті газдар қоспаларында «диффузия – конвекция» тәртібінің алмасуы шекарасын анықтауға байланысты сұрақтар және конвективті тәртіптің пайда болуын анықтайтын параметрлер конвективті массатасымалдау мәселелері бойынша маңызды болып табылады.

Аталған жұмысташеткі өлшемді тік цилиндр каналдарындағы  $2-D$  модельдеу арқылы тасымалдау коэффициенттері арасындағы уақытқа қатысты әртүрлі байланысқан үшкомпонентті газдар қоспаларындағы диффузиялық изотермиялық тасымалдауды зерттеудің сандық моделі ұсынылған.

Тік цилиндр каналдардағы үшкомпонентті газдар қоспаларында диффузиялық изотермиялық араласу физикалық өлшемдер бойынша бөлшектеу әдісі қарастырылған. Компоненттердің диффузия коэффициенттері өзара бірдей болатын жүйелерде, механикалық тепе-теңдік орнықсыздығы мүмкін болмайды. Компоненттердің диффузия коэффициенттері айтарлықтай өзгеше болатын жүйелерде конвективті қозғалыс пайда болуы мүмкін. Алғашқы кезеңде аз жылдамдықтағы ағын пайда болады. Кейін дамыған құрылымдық ағын қалыптасады. Газдар қоспаларында «диффузия – концентрациялық конвекция» тәртібінің алмасу шекарасын анықтауда есептеулердің нәтижелері тәжірибе арқылы алынған нәтижелермен сәйкес болуына байланысты, аталған әдісті ұсынуға мүмкіндік береді.

**Тірек сөздер:** диффузия, конвекция, газдар, қоспалар, сандық талдау.

**Сведения об авторах:**

Косов Владимир Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент НАН РК, проректор по научной работе Казахского Национального Педагогического Университета им. Абая, г. Алматы.

Жакебаев Даурен Бактыбекович, PhD доктор, доцент, заведующий кафедрой математического и компьютерного моделирования Казахского Национального Университета им. аль-Фараби, г. Алматы.

Федоренко Ольга Владимировна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник НИИ экспериментальной и теоретической физики, г. Алматы.