

# РАЗДЕЛ III

## ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

---

УДК 533.15:536.25

DOI: 10.18384/2310-7189-2018-1-119-127

### **КОНВЕКТИВНЫЕ РЕЖИМЫ ПРИ ДИФФУЗИИ В ТРЕХКОМПОНЕНТНЫХ ГАЗОВЫХ СИСТЕМАХ ПРИ РАЗЛИЧНОМ СОДЕРЖАНИИ САМОГО ТЯЖЕЛОГО ПО ПЛОТНОСТИ КОМПОНЕНТА В СМЕСИ**

**Косов В.Н.<sup>1</sup>, Федоренко О.В.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Казахский национальный педагогический университет имени Абая  
050010, Алматы, проспект Достык, 13, Республика Казахстан

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической физики  
при Казахском национальном университете имени аль-Фараби  
050040, Алматы, проспект аль-Фараби, 71, Республика Казахстан

**Аннотация.** Опытным путем двухколбовым методом изучается диффузия бинарной смеси азота и дифтордихлорметана при различных концентрациях в н-бутан. Показано, что при определенном содержании дифтордихлорметана в смеси возникают конвективные течения, существенно искажающие ожидаемый при диффузии массоперенос. Условия, определяющие смену режимов «диффузия – концентрационная гравитационная конвекция» определяются в рамках теории устойчивости. Экспериментальные результаты и вычисленные данные удовлетворительно согласуются друг с другом.

**Ключевые слова:** диффузия, концентрация, конвекция, смеси, массоперенос, скорость смешения.

### **CONVECTIVE REGIMES UNDER DIFFUSION IN THREE-COMPONENT GAS SYSTEMS AT DIFFERENT CONTENT OF THE DENSITY HEAVY COMPONENT IN THE MIXTURE**

**V.N. Kosov<sup>1</sup>, O.V. Fedorenko<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Abai Kazakh National Pedagogical University  
050010, Almaty, Dostyk Ave. 13, Kazakhstan

<sup>2</sup>Institute of Experimental and Theoretical Physics at al-Farabi Kazakh National University  
050040, Almaty, al-Farabi Ave. 71, Kazakhstan

---

© Косов В.Н., Федоренко О.В., 2018.

**Abstract.** The diffusion of a binary mixture of nitrogen and dichlorodifluoromethane at various concentrations in n-butane is studied experimentally by means of a two-flask method. It is shown that for a certain content of dichlorodifluoromethane in the mixture, convective currents arise, which substantially distort the mass transfer expected during diffusion. The conditions defining the change in the “diffusion-concentration gravitational convection” regimes are determined within the framework of the stability theory. The experimental results and the calculated data are in satisfactory agreement with each other.

**Key words:** diffusion, concentration, convection, mixtures, mass transfer, mixing speed.

Исследуя многокомпонентное смешение в газах при повышенных давлениях [6, с. 19] и различных температурах [4, с. 95], диффузию смеси паров растворов в инертный газ [3, с. 603] были отмечены конвективные течения, приводящие к существенному увеличению парциальных потоков компонентов. Механизм возникновения концентрационной конвекции при диффузии аналогичен задаче Рэлея–Бенара для неоднородного температурного поля, где необходимо осуществлять учет зависимости свойств среды от состава, температуры и перекрестных эффектов [1, с. 217; 2, с. 287]. Однако ситуации, связанные с проявлением критических движений, изученных в [3, с. 600; 4, с. 92; 6, с. 18], имеют характерные отличия от приведенных в [1, с. 217], так как течения возникают при устойчивой стратификации в изотермической смеси, где необходимо учитывать влияние нескольких концентрационных градиентов. Кроме того, компоненты исследуемых тройных смесей существенно отличаются друг от друга молекулярными весами  $M_i$  и коэффициентами взаимной диффузии  $D_{ij}$  [8, с. 31], что также может оказать влияние на проявление синергетических эффектов [3, с. 604], которые связаны со значительным увеличением скорости смешения и преимущественным переносом само-

го тяжелого по плотности компонента смеси.

В данной работе опытным путем изучается диффузия бинарной смеси азота ( $N_2$ ) и дифтордихлорметана (R12) при различных концентрациях в н-бутан ( $n-C_4H_{10}$ ). Определяются условия, характеризующие смену режимов «диффузия – концентрационная конвекция». Приводится анализ на устойчивость механического равновесия в плоском вертикальном канале с массонепроницаемыми стенками.

### Экспериментальные исследования

Диффузионное смешение изучалось на устройстве, реализующем двухколбовый метод [10, р. 1188]. Конструктивные особенности опытной установки и измерительной ячейки описаны в работах [5, с. 178; 7, с. 932]. Поэтому ограничимся кратким описанием диффузионной ячейки и методики проведения эксперимента.

Бинарная смесь из легкого ( $N_2$ ) и тяжелого (R12) по плотности компонентов размещалась в верхней колбе (рис. 1а). В нижней колбе находился газ ( $n-C_4H_{10}$ ), парциальная плотность которого имела промежуточное значение. Во всех условиях опыта плотность бинарной смеси была меньше, чем плотность н-бутана в нижней колбе. При проведении исследований использовался диф-

фузионный аппарат со следующими объемами колб:  $V_1 = (226,8 \pm 0,5) \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ ,  $V_2 = (214,5 \pm 0,5) \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ . Колбы соединя-

лись плоским вертикальным каналом высотой  $L = (165,40 \pm 0,05) \cdot 10^{-3} \text{ м}$  и шириной  $a = (6,10 \pm 0,02) \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .

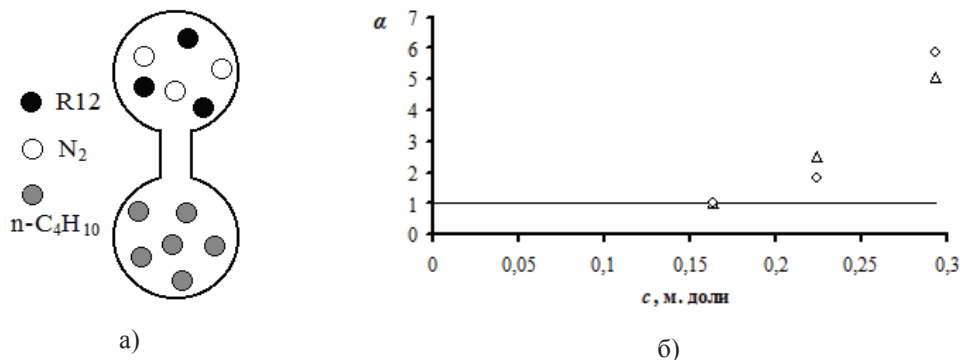


Рис. 1. а) Схема диффузионной ячейки двухколбового аппарата  
б) Зависимость  $\alpha$  от концентрации R12 в смеси (линия – расчет в предположении диффузии; точки соответствуют:  $\circ$  – н-бутану;  $\Delta$  – азоту).

Методика экспериментов заключалась в следующем. В верхнюю и нижнюю колбы подавались газы с заданным давлением. Затем канал, соединяющий колбы, открывался, и регистрировалось время начала смешения. Спустя некоторое время канал закрывался, а газовую смесь из колб анализировали с помощью хроматографа. Экспериментальные концентрации  $c_{exp}$  были нормированы к значениям  $c_{theor}$ , рассчитанным для диффузии по уравнениям Стефана-Максвелла [8, с. 76]. Зависимости безразмерного параметра  $\alpha_i = c_{exp}/c_{theor}$  от концентрации R12 для исследуемой тройной системы приведена на рис. 1б. Анализ функциональной зависимости  $\alpha_i$  от  $c$  (R12) показывает, что при содержании R12 в смеси, не превышающем значение 0,16 мольных долей (м. д.), в бинарной смеси в системе реализуются условия соответствующие диффузии. Экспериментальные потоки компонентов совпадают с вы-

численными по уравнениям Стефана-Максвелла, а парциальные значения  $\alpha_i$  для всех трех компонентов приблизительно равны единице. Однако дальнейшее увеличение R12 в смеси приводит к возрастанию параметра  $\alpha_i$  для всех трех компонентов. Особенно значительный рост регистрируется у компонента с самым большим молекулярным весом в смеси.

Очевидно, что концентрация  $c_{R12} \approx 0,16$  м. д. в смеси определяет смену режимов «диффузия – концентрационная гравитационная конвекция». При составах смеси, превышающих  $c_{R12}$ , наибольшие значения  $\alpha_i$  соответствуют самому тяжелому по плотности компоненту смеси – фреону-12. Это говорит о том, что в сложившихся условиях имеет место преимущественный перенос этого компонента в сравнении с другими. При больших значениях концентрации R12 в смеси линейная зависимость нарушается. Причем также имеет место преимущественный

перенос самого тяжелого по плотности компонента.

### Математическое описание границы смены режимов «диффузия – конвекция» в изотермических тройных газовых смесях

Математическое описание базируется на основе анализа системы уравнений механики сплошных сред для многокомпонентных систем по отношению к малым возмущениям [1, с. 8]. Макроскопическое движение изотермической тройной газовой смеси описывается общей системой уравнений гидродинамики, которая включает в себя уравнения Навье-Стокса, сохранения числа частиц смеси и компонентов.

Принимая во внимание условие независимой диффузии, при которой для изотермической газовой смеси  $\sum_{i=1}^3 \mathbf{j}_i = 0$ ;  $\sum_{i=1}^3 c_i = 1$ , эта система уравнений имеет следующий вид [1, с. 7; 7, с. 933]:

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

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

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

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

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

рез коэффициенты взаимной диффузии:

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

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

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

Уравнения (1) дополняются уравнением состояния среды

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

При решении системы уравнений (1) применялся метод малых возмущений [1, с. 8], который предполагал концентрацию  $i$ -го компонента  $c_i$  и давление  $p$  представить следующим образом:

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

где  $\langle c_i \rangle$ ,  $\langle p \rangle$  – постоянные средние значения, принимаемые в качестве начала отсчета.

Учитывая, что при  $L \gg a$  ( $L$  и  $a$  – длина канала вдоль оси  $z$  (высота) и ширина (поперечный размер) диффузионного канала, соответственно) различия между возмущениями среднечисловой  $\mathbf{v}$  и среднемассовой  $\mathbf{u}$  скоростей в уравнении Навье-Стокса будут несущественны [7, с. 934], а также предполагая, что нестационарные возмущения механического равновесия малы, пренебрегая квадратичными по возмущениям членами, и выбирая соответствующие масштабы единиц измерения (расстояния –  $d$ , времени –  $d^2/\nu$ , скорости –  $D_{22}^*/d$ , концентрации  $i$ -го компонента –  $A_i d$ , давления –  $\rho_0 \nu D_{22}^*/d^2$ ), получим систему уравнений гравитационной конвекции для возмущенных значений в безразмерных величинах (штрихи опущены):

$$\begin{aligned} \text{Pr}_{22} \frac{\partial c_1}{\partial t} - (\mathbf{u} \mathbf{e}_z) &= \tau_{11} \nabla^2 c_1 + \frac{A_2}{A_1} \tau_{12} \nabla^2 c_2, \\ \text{Pr}_{22} \frac{\partial c_2}{\partial t} - (\mathbf{u} \mathbf{e}_z) &= \frac{A_1}{A_2} \tau_{21} \nabla^2 c_1 + \nabla^2 c_2, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -\nabla p + \nabla^2 \mathbf{u} + (\text{Ra}_1 \tau_{11} c_1 + \text{Ra}_2 c_2) \mathbf{e}_z,$$

$$\text{div} \mathbf{u} = 0,$$

где:  $\mathbf{e}_z$  – единичный вектор в направлении оси  $z$ ;  $\text{Pr}_{ii} = \nu / D_{ii}^*$  – диффузионное число Прандтля;  $\text{Ra}_i = g \beta_i A_i d^4 / \nu D_{ii}^*$  – парциальное число Рэлея;  $\tau_{ij} = D_{ij}^* / D_{22}^*$  – параметры, определяющие соотношение между практически коэффициентами диффузии;  $\beta_i = -\frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial \rho}{\partial c_i} \right)_{p,T}$ ;  $A_i \mathbf{e}_z = -\nabla c_{i0}$  (индекс 0 относится к средним значениям).

(индекс 0 относится к средним значениям).

Решение системы уравнений (2) для плоского вертикального канала с непроницаемыми стенками позволило получить в терминах чисел Рэлея граничное соотношение, определяющее смену режимов «диффузия – конвекция» в виде [5, с. 181]:

$$\tau_{11} \left( 1 - \frac{A_2}{A_1} \tau_{12} \right) \text{Ra}_1 + \left( \tau_{11} - \frac{A_1}{A_2} \tau_{21} \right) \text{Ra}_2 = \gamma^4 (\tau_{11} - \tau_{12} \tau_{21}), \quad (3)$$

$$\text{где } \gamma = \text{Ra}^{1/4}, \text{ т.е. } \gamma = (\text{Ra}_1 \tau_{11} K_1 + \text{Ra}_2 K_2)^{1/4}; \quad K_1 = \frac{\left( 1 - \frac{A_2}{A_1} \tau_{12} \right)}{(\tau_{11} - \tau_{12} \tau_{21})}, \quad K_2 = \frac{\left( \tau_{11} - \frac{A_1}{A_2} \tau_{21} \right)}{(\tau_{11} - \tau_{12} \tau_{21})};$$

$A_i$  – парциальный градиент концентрации  $i$ -го компонента.

Согласно рис. 2 уравнение (3) дает на плоскости  $(\text{Ra}_1, \text{Ra}_2)$  граничную прямую (линия I), разделяющую области затухающих (диффузия) и нарастающих (концентрационная конвекция) возмущений. Для наиболее опасной с точки зрения устойчивости моды (диаметрально-антисимметричное движение; плоский канал делится вертикальной плоскостью на две части, в одной из которых газ поднимается,

а в другой опускается) критические концентрационные числа Рэлея имеют следующие значения:  $\text{Ra}_1 = 30,2654$ ,  $\text{Ra}_2 = 26,203$  при  $\gamma = 2,365$  (для системы  $0,707 \text{ N}_2 + 0,293 \text{ R12} - \text{n-C}_4\text{H}_{10}$ ). Также на рис. 2 приведена линия II, которая соответствует нулевому градиенту плотности и определяется следующим выражением:

$$\tau_{11} \text{Ra}_1 = -\text{Ra}_2. \quad (4)$$

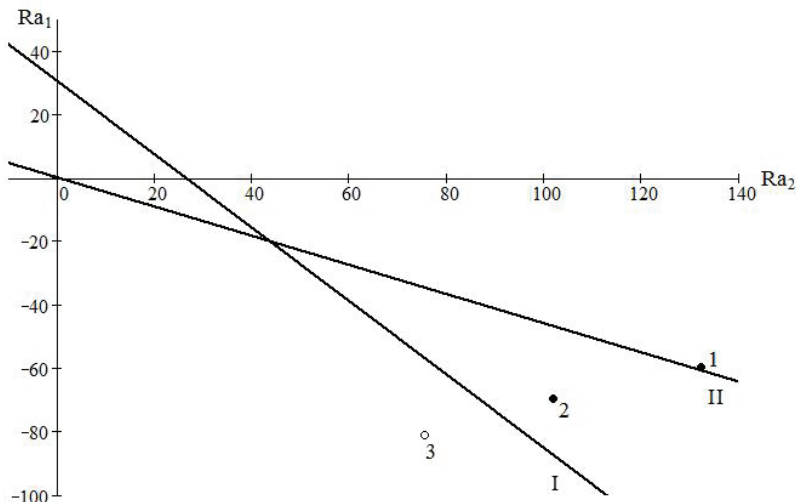


Рис. 2. Области диффузии и конвекции для системы  $N_2 + R_{12} - n-C_4H_{10}$ : I – нейтральная линия монотонных возмущений; II – линия нулевого градиента плотности; 1 – 3 – опытные данные при различных значениях  $cR_{12}$ : 1 – 0,293; 2 – 0,224; 3 – 0,163 м.д.

Взаимное расположение граничных линий (3) и (4) показывает существование области (сектор между линиями I и II на рис. 3), когда в системе имеет место конвекция, хотя плотность в верхней части канала меньше, чем в нижней, что, на первый взгляд, соответствует только диффузии.

Восстановим экспериментальные данные, соответствующие данным, приведенным на рис. 1б через парциальные числа Рэлея и отобразим их на координатной плоскости  $(Ra_1, Ra_2)$ . Парциальные числа Рэлея в соответствии с (2) в применении к диффузионному каналу с шириной  $a$  и высотой  $L$  можно записать следующим образом [9, p. 1185]:

$$Ra_1 = \frac{gn(a/2)^4 \Delta m_1}{\rho v D_{11}^*} \cdot \frac{\partial c_1}{\partial z},$$

$$Ra_2 = \frac{gn(a/2)^4 \Delta m_2}{\rho v D_{22}^*} \cdot \frac{\partial c_2}{\partial z}, \quad (5)$$

где:  $\Delta m_1 = m_1 - m_2$ ,  $\Delta m_2 = m_2 - m_3$ ,  $m_i$  – масса молекулы  $i$ -го сорта. Из

опыта известно, какой тип смешения имеет место: устойчивый (диффузия) или неустойчивый (конвекция). Точки, соответствующие неустойчивому режиму, будем обозначать в виде знаков •, а диффузия будет определяться значками о. Совокупность таких точек на плоскости чисел Рэлея (рис. 2) определяет переход из диффузионной области в конвективную через граничную линию устойчивости (3). Нетрудно видеть удовлетворительное согласие между теорией и опытом по определению областей диффузии и конвекции.

### Заключение

Таким образом, проведенные исследования показали, что увеличение концентрации тяжелого компонента в бинарной смеси способствует переходу в область неустойчивой диффузии и увеличению интенсивности конвективного режима. Граница смены режимов «диффузия – концентра-

ционная гравитационная конвекция» может быть получена в рамках анализа на устойчивость механического равновесия газовой смеси. Сравнение с опытом показало удовлетворитель-

ное согласие между теорией и опытом по определению областей диффузии и конвекции.

*Статья поступила в редакцию 08.02.2018 г.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. Москва: Наука, 1972. 392 с.
2. Джозеф Д. Устойчивость движений жидкости. М.: Мир, 1981. 639 с.
3. Дильман В.В., Липатов Д.А., Лотхов В.А., Каминский В.А. Возникновение неустойчивости при нестационарном испарении бинарных растворов в инертный газ // Теоретические основы химической технологии. 2005. Том 39. № 6. С. 600–606.
4. Жаврин Ю.И., Косов В.Н. Влияние температуры на процесс диффузионной неустойчивости // Инженерно-физический журнал. 1988. Том 55. № 1. С. 92– 97.
5. Жаврин Ю.И., Косов В.Н., Федоренко О.В., Акжолова А.А. Некоторые особенности изотермического многокомпонентного массопереноса при конвективной неустойчивости газовой смеси // Теоретические основы химической технологии. 2016. Т. 50. № 2. С. 177–183.
6. Косов В.Н., Жаврин Ю.И. Образование структур и концентрационная конвекция при изотермической диффузии в трехкомпонентных газовых смесях через переменное число каналов равной площади // Письма в журнал технической физики. 1993. Том 19. Выпуск 10. С. 18–21.
7. Косов В.Н., Кульжанов Д.У., Жаврин Ю.И., Федоренко О.В. Влияние концентрации компонентов смеси на возникновении конвективных режимов смешения при диффузии в тройных газовых смесях // Журнал физической химии. 2017. Том 91. № 6. С. 931–936.
8. Шервуд Т., Пигфорд Р., Уилки Ч. Массопередача. М.: Химия, 1982. 695 с.
9. Kosov V., Krasikov S., Fedorenko O. Diffusion and convective instability in multicomponent gas mixtures at different pressures // The European Physical Journal. Special Topics. 2017. Vol. 226. no. 6. Pp. 1177–1187.
10. Trengove R.D., Robjohns H.L., Dunlop P.J. Diffusion coefficients and thermal diffusion factors for the systems  $H_2-N_2$ ,  $D_2-N_2$ ,  $H_2-O_2$  and  $D_2-O_2$  // Physical Chemistry. 1983. Vol. 87. Pp. 1187–1190.

#### REFERENCES

1. Gershuni G.Z., Zhukhovitskii E.M. Konvektivnaya ustoichivost' neszhimaemoi zhidkosti [Convective stability of incompressible fluid]. Moscow, Nauka Publ., 1972. 392 p.
2. Joseph D.D. Stability of Fluid Motions (Berlin: Springer-Verlag, 1976).
3. Dil'man V.B., Lipatov D.A., Lotkhov V.A., Kaminskii V.A. Vozniknovenie neustoichivosti pri nestatsionarnom isparenii binarnykh rastvorov v inertnyy gaz [The occurrence of instabilities in non-stationary evaporation of binary solutions in an inert gas]. In: Teoreticheskie osnovy khimicheskoi tekhnologii [Theoretical foundations of chemical engineering], 2005, Vol. 39, no 6, pp. 600-606.
4. Zhavrin Yu.I., Kosov V.N. Vliyanie temperatury na protsess diffuzionnoi neustoichivosti [The effect of temperature on the process of diffusion instability]. In: Inzhenerno-fizicheskii zhurnal [Engineering-Physics Journal]. 1988. Vol. 55. , no. 1, pp. 92-97.
5. Zhavrin Yu.I., Kosov V.N., Fedorenko O.V., Akzholova A.A. Nekotorye osobennosti izotermicheskogo mnogokomponentnogo massoperenosa pri konvektivnoi neustoichivosti

- gazovoi smesi [Some features of isothermal multicomponent mass transfer in convective instability of a gas mixture]. In: *Teoreticheskie osnovy khimicheskoi tekhnologii* [Theoretical foundations of chemical technology]. 2016. Vol. 50. , no. 2, pp. 177-183.
6. Kosov V.N., Zhavrin Yu.I. Obrazovanie struktur i kontsentratsionnaya konvektsiya pri izotermicheskoi diffuzii v trekhkomponentnykh gazovykh smesyakh cherez peremennoe chislo kanalov ravnoi ploshchadi [Formation of structures and concentration convection in isothermal diffusion in ternary gas mixtures using a variable number of channels of equal area]. In: *Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. 1993. Tom 19 [Letters to journal of technical physics. 1993. Volume 19]. Issue 10, pp. 18-21
  7. Kosov V.N., Kul'zhanov D.U., Zhavrin Yu.I., Fedorenko O.V. Vliyanie kontsentratsii komponentov smesi na vozniknovenie konvektivnykh rezhimov smesheniya pri diffuzii v troinykh gazovykh smesyakh [Effect of the concentration of mixture components on the occurrence of convective mixing regimes during diffusion in ternary gas mixtures]. In: *Zhurnal fizicheskoi khimii* [Journal of Physical Chemistry]. 2017. Vol. 91. , no. 6, pp. 931-936.
  8. Sherwood T., Pigford R., Wilke C. *Mass Transfer*. New York, McGraw-Hill Inc., 1975.
  9. Kosov V., Krasikov S., Fedorenko O. Diffusion and convective instability in multicomponent gas mixtures at different pressures. In: *The European Physical Journal. Special Topics*. 2017. Vol. 226. no. 6. pp. 1177-1187.
  10. Trengove R.D., Robjohns H.L., Dunlop P.J. Diffusion coefficients and thermal diffusion factors for the systems  $H_2-N_2$ ,  $D_2-N_2$ ,  $H_2-O_2$  and  $D_2-O_2$  . In: *Physical Chemistry*. 1983. Vol. 87. pp. 1187-1190.
- 

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (проект AP05130712 «Разработка технологических основ разделения газовых смесей на модульных проточных устройствах в режиме конвективной диффузии в контексте энергоэффективности и влияния на окружающую среду»).

#### ACKNOWLEDGMENTS

The work was supported by the Committee of Science of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan (Development of the Technological Basis for Separation of Gas Mixtures on Modular Flow Arrangements in Convective Diffusion Mode in the Context of Energy Efficiency and Environmental Impact Project).

---

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Косов Владимир Николаевич* – доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент Национальной академии наук Республики Казахстан, академик Национальной академии наук Республики Казахстан Высшей школы Республики Казахстан, директор центра прикладных исследований и функциональных технологий Казахского национального педагогического университета имени Абая; e-mail: kosov\_vlad\_nik@list.ru



*Федоренко Ольга Владимировна* – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института экспериментальной и теоретической физики Казахского национального университета имени аль-Фараби;  
e-mail: fedor23.04@mail.ru

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Vladimir N. Kosov* – doctor of physical and mathematical sciences, professor, corresponding member of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, academician of the National Academy of Sciences of the High School of RK, director of the center of applied researches and functional technologies of Abai Kazakh National Pedagogical University;  
e-mail: kosov\_vlad\_nik@list.ru

*Olga V. Fedorenko* – PhD in physical and mathematical sciences, senior researcher of the Research Institute of Experimental and Theoretical Physics at al-Farabi Kazakh National University;  
e-mail: fedor23.04@mail.ru

---

#### ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Косов В.Н., Федоренко О.В. Конвективные режимы при диффузии в трехкомпонентных газовых системах при различном содержании самого тяжелого по плотности компонента в смеси // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Естественные науки. 2018. № 1. С. 119-127  
DOI: 10.18384/2310-7189-2018-1-119-127

#### FOR CITATION

Kosov V. N., Fedorenko O. V. Convective regimes under diffusion in three-component gas systems at different content of the density heavy component in the mixture. In: *Bulletin of Moscow Region State University. Series: Natural sciences*, 2018, no. 1, pp. 119-127  
DOI: 10.18384/2310-7189-2018-1-119-127