

УДК 533.15:536.25

DOI: 10.18384/2310-7189-2018-2-134-144

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ КОНВЕКТИВНЫХ ТЕЧЕНИЙ ПРИ КВАЗИСТАЦИОНАРНОМ СМЕШЕНИИ В БИНАРНЫХ ГАЗОВЫХ СМЕСЯХ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УГЛАХ НАКЛОНА ДИФфуЗИОННОГО КАНАЛА

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

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

<sup>2</sup> *НИИ Экспериментальной и теоретической физики при Казахском национальном университете имени аль-Фараби 050040, Алматы, проспект аль-Фараби, 71, Казахстан*

**Аннотация.** Методами численного моделирования проведено исследование квазистационарного смешения в бинарных смесях, когда более тяжелый по плотности газ находится в верхней части диффузионного канала, а второй – в нижней части. Определены углы наклона, при которых происходит смена режима «диффузия – концентрационная гравитационная конвекция». Проанализирована динамика структурированных конвективных течений при различных углах наклона. Получена зависимость интенсивности конвективных течений от угла диффузионного канала для бинарной смеси  $0,15 \text{ Ar} + 0,85 \text{ N}_2 - \text{N}_2$ .

**Ключевые слова:** диффузия, концентрация, конвекция, компонент смеси, массоперенос, угол наклона.

## NUMERICAL SIMULATION OF THE OCCURRENCE OF CONVECTIVE FLOWS AT QUASI-STATIONARY MIXING IN BINARY GASEOUS MIXTURES UNDER DIFFERENT SLOPE ANGLES OF THE DIFFUSION CHANNEL

**V. Kossov<sup>1</sup>, S. Krasikov<sup>2</sup>, O. 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*

**Abstract.** Numerical simulation methods are used to study quasi-stationary mixing in binary mixtures when the density heavier gas is located in the upper part of the diffusion channel, and the second one is in the lower part. The slope angles, at which the regime changes from diffusion to concentration gravitational convection, are determined. The dynamics of structured convective flows at various angles of inclination is analyzed. The dependence of the intensity of convective flows on the slope angle of the diffusion channel for a binary mixture  $0.15 \text{ Ar} + 0.85 \text{ N}_2 - \text{N}_2$  is obtained.

**Key words:** diffusion, concentration, convection, mixture component, mass transfer, angle of inclination.

### Введение

Разработка подходов, связанных с очисткой газовых смесей, глубокой переработкой отдельных углеводородных фракций в природном газе, разделением одно- и многофазных систем на компоненты с заданными свойствами, является одной из базовых задач развития газотопливного и энергетического комплекса в Республике Казахстан до 2030 [12]. Поэтому инновационные решения, связанные с очисткой, снижением экологической нагрузки на окружающую среду представляются актуальными и соответствуют приоритетам социально-экономического развития современного общества.

Промышленное разделение газовых систем традиционно основано на компрессионном, абсорбционно (адсорбционно)-десорбционном методах разделения, низкотемпературной конденсации и ректификации, термо-гравитационных, мембранных и гибридных подходах [4, с. 188; 10, с. 14; 13, с. 193]. Использование термо-гравитационного метода для промышленного разделения, а также научных целей предполагает наличие информации об особенностях тепловой конвекции и термодиффузионных характеристиках массопереноса. Если для изотопных и бинарных смесей экспериментальные исследования и аналитические решения позволяют получить соответствующие данные [16, с. 69], то в многокомпонентных системах возможно возникновение особых режимов смешения, что не позволяет автоматически распространять на них подходы, апробированные для случая смешения двух компонентов. Примером таковых являются результаты исследований

по изучению конвективной неустойчивости в изотермических тройных газовых смесях [7, с. 600; 8, с. 18]. Неустойчивость вызывает появление концентрационной гравитационной конвекции, которая приводит к синергетическому эффекту, связанному со значительным увеличением скорости смешения компонентов системы. При этом реализуются условия, связанные с приоритетным переносом компонента с наибольшим молекулярным весом [11, с. 139]. Интенсивность суммарного массопереноса возрастает в десятки и сотни раз, что можно использовать для получения смеси, обогащенной тем или иным компонентом.

Исходя из близкого сходства термо-концентрационной и изотермической конвекции, можно предложить более простой и эффективный подход, в котором предполагается, что гидродинамической системой, в которой осуществляется разделение газообразных смесей, может выступать изотермический неоднородный по плотности слой с существенными отличиями в коэффициентах диффузии [14, с. 129; 15, с. 130]. Для прикладных решений разделения газовых смесей это означает не только значительное уменьшение параметров, связанных с термодиффузионным разделением и оценкой влияния тепловой конвекции на парциальный перенос, но и более экономичное технологическое решение разделительных устройств, так как значительно сокращаются расходы, связанные с поддержкой заданных перепадов температур. Как и для случая термо-гравитационной конвекции [5, с. 102; 6, с. 62], изотермическим разделением в газах можно управлять за

счет изменения внешних параметров, например, меняя угол наклона диффузионного канала, в котором происходит изотермическое смешение. В условиях изотермичности регистрация кинетических фазовых переходов, а также сравнение интенсивности надкритических течений происходит не для однородной среды (как для термо-гравитационной конвекции), а для смесей. Предельным случаем многокомпонентных смесей является состав из двух компонентов. Специфика изотермического конвективного смешения в бинарных смесях и его особенности при переходе из диффузионного состояния в конвективное в вертикальных каналах описаны в [1, с. 27; 9, с. 502]. Однако изучение квазистационарного смешения в наклонном канале для двух газов носит эпизодический характер [3, с. 77], а для тройных и многокомпонентных смесей – практически отсутствует. Поэтому для всестороннего изучения особенностей разделения в изотермических газовых смесях в наклонном канале необходимо изучить особенности возникновения структурированных течений для предельного случая, т. е. для смесей, состоящих из двух компонентов, что и является целью данной работы.

### Постановка задачи

Тепло-массообмен в устройствах, подобных устройствам для разделения газовых смесей, моделируется с помощью уравнений Навье – Стокса, а также законов, описывающих сохранения массы, импульса и энергии среды. Кроме этого, используются уравнения состояния компонентов текучей среды и эмпирические зависимости вязкости и теплопроводности компонентов среды от температуры. Для моделирования турбулентных течений в уравнении Навье–Стокса используется усредненное по малому масштабу времени влияние турбулентности на параметры потока, а крупномасштабные временные изменения осредненных по малому масштабу времени составляющих газодинамических параметров потока учитываются введением соответствующих производных по времени. В результате уравнения имеют дополнительные члены – напряжения по Рейнольдсу, а для замыкания этой системы уравнений используются уравнения переноса кинетической энергии турбулентности и ее диссипации в рамках  $k - \epsilon$  модели турбулентности.

Эта система уравнений сохранения массы, импульса и энергии нестационарного пространственного течения имеет следующий вид [2, с. 228–231]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial y}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) + \frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i, \quad i = 1, 2, 3 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i H}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i) + \frac{\partial p}{\partial t} - \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \epsilon + S_i u_i, \quad (3)$$

$$H = h + \frac{u^2}{2}, \quad (4)$$

где:  $t$  – время,  $u$  – скорость текучей среды,  $\rho$  – плотность текучей среды,  $p$  – давление текучей среды,  $S_i$  – внешние массовые силы, действующие на единичную массу текучей среды, в нашем случае  $S_i = S_i^{gravity}$ , действие гравитации  $S_i^{gravity} = -\rho g_i$ ,  $g_i$  – составляющая гравитационного ускорения в координатном направлении  $x_i$ .

Для ньютоновских сред тензор вязких сдвиговых напряжений определяется как:

$$\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) + \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}, \quad (5)$$

где:  $\mu = \mu_l + \mu_t$ ,  $\mu_l$  – коэффициент динамической вязкости,  $\mu_t$  – коэффициент турбулентной вязкости,  $\delta_{ij}$  – дельта функция Кронекера ( $\delta_{ij} = 1$  при  $i = j$ ;  $\delta_{ij} = 0$  при  $i \neq j$ ),  $k$  – кинетическая энергия турбулентности. В соответствии с  $k - \varepsilon$  моделью турбулентности,  $\mu$  определяется через величины кинетической энергии турбулентности  $k$  и диссипации этой энергии  $\varepsilon$ :

$$\mu = f_\mu \frac{c_\mu \rho k^2}{\varepsilon}, \quad (6)$$

где  $f_\mu = [1 - \exp(-0,025 R_y)]^2 \left( 1 + \frac{20,5}{R_T} \right)$ ,  $R_y = \frac{\rho \sqrt{k} y}{\mu_l}$ ,  $R_T = \frac{\rho k^2}{\mu_l \varepsilon}$ ,  $y$  – расстояние от поверхности стенки,  $c_\mu = 0,09$ .

Кинетическая энергия турбулентности  $k$  и диссипация этой энергии  $\varepsilon$  определяются из следующих уравнений:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k k) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \left( \mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_k} \right) + S_k, \quad (7)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \left( \mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} \right) + S_\varepsilon, \quad (8)$$

$$\text{где } S_k = \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \mu_l P_B, \quad S_\varepsilon = c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \left( f_i \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \mu_l c_B P_B \right) - c_{\varepsilon 2} f_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k},$$

$$\tau_{ij}^R = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) + \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}, \quad P_B = \frac{g_i}{\sigma_B} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i},$$

$$\sigma_B = 0,9, \quad c_B = 1 \text{ при } P_B > 0 \text{ и } c_B = 0 \text{ при } P_B \leq 0, \quad f_1 = 1 + \left( \frac{0,05}{f_\mu} \right)^3, \\ f_2 = 1 - \exp(-R_T^2), \quad c_{\varepsilon 1} = 1,44, \quad c_{\varepsilon 2} = 1,92, \quad \sigma_\varepsilon = 1,3, \quad \sigma_k = 1.$$

Влияние угла наклона диффузионного канала учитывается за счет изменения осевой и ортогональных составляющих  $g_i$  гравитационного ускорения при изменении угла наклона диффузионного канала к вертикали.

Диффузионный тепловой поток моделируется с помощью уравнения:

$$q_k = - \left( \frac{\mu_l}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_c} \right) c_p \frac{\partial T}{\partial x_k}, \quad k = 1, 2, 3 \quad (9)$$

где  $\sigma_c = 0,9$ ,  $Pr$  – число Прандтля,  $c_p$  – удельная теплоемкость при постоянном давлении,  $T$  – температура текущей среды.

Для многокомпонентных газовых

$$\frac{\partial \rho y_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k y_i) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left( (D_{ij} + D'_{ij}) \frac{\partial y_i}{\partial x_k} \right), \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (10)$$

где:  $y_i$  – концентрация  $i$ -го компонента смеси  $\left( \sum_{j=1}^N y_j = 1 \right)$ ,  $N$  – число компонентов смеси,  $D_{ij}$ ,  $D'_{ij}$  – коэффициенты молекулярной и турбулентной диффузии, которые подчиняются закону Фика, так что  $D_{ij} = D \cdot \delta_{ij}$ ,  $D'_{ij} = \sigma_{ij} \cdot \frac{\mu_i}{\sigma}$ , где  $D$  – коэффициент диффузии,  $\sigma$  – тур-

булентное число Шмидта.

Для решения системы уравнений (1)-(10) была создана, с помощью пакета SolidWorks, виртуальная модель типового двухколбового аппарата для изучения особенностей процессов смешения, диффузионного и конвективного массообмена.

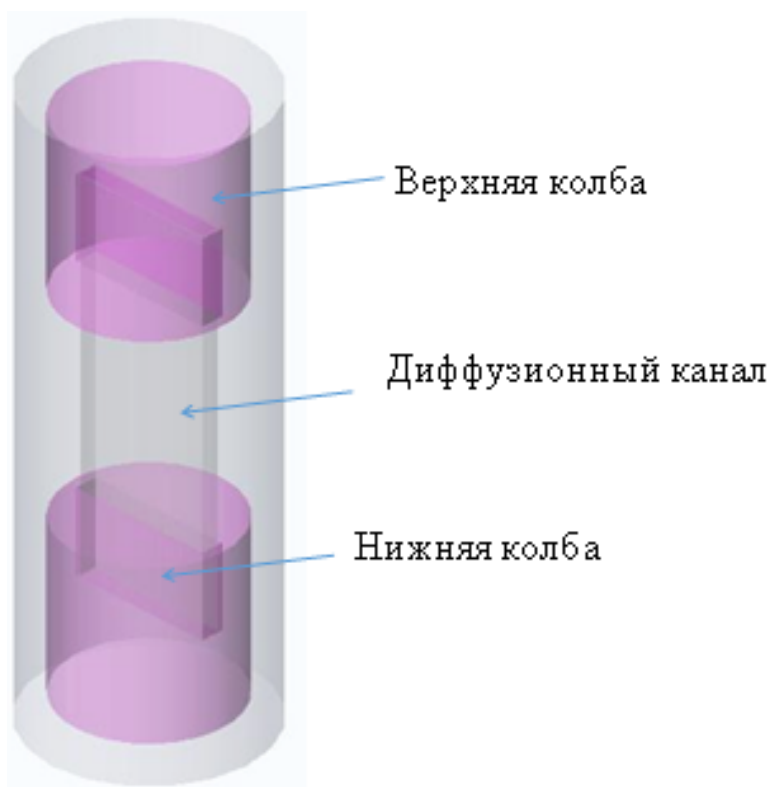


Рис. 1. Виртуальная численная модель двухколбового аппарата.

Особенностью данной конструкции является применение диффузионного канала, который является модельным каналом для разрабатываемой авторами технологии разделения углеводородных газовых смесей.

Система уравнений (1)–(10), описывающая процессы в разделительном диффузионном аппарате, решалась методом конечных объемов для созданной виртуальной численной модели установки с помощью пакета Flow Simulation. Использовались следующие начальные условия: вверху размещалась смесь  $0,15 \text{ Ar} + 0,85 \text{ N}_2$ , а нижняя колба заполнялась  $\text{N}_2$ ; угол наклона от вертикали изменялся от 0 до 90 градусов; давление  $p_{\text{абс}} = 0,6 \text{ МПа}$  ( $p_{\text{изб}} = 0,5 \text{ МПа}$ ); время – 180 с. Геометрические параметры тестируемого канала следующие:  $a = 6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ,  $b = 30 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ,  $L = 0,165 \text{ м}$ .

Результаты численного расчета приведены на рис. 2 и 3. Анализ полученных результатов позволяет определить следующие особенности конвективного массопереноса, возникающие на границе перехода кинетических режимов при различных углах наклона диффузионного канала. При угле наклона к вертикали в  $5^\circ$  можно наблюдать увеличение структурообразования, что приводит к интенсификации массообмена. Дальнейшее увеличение угла наклона не оказывает влияния на интенсивность массопереноса. Повидимому, в указанном диапазоне  $[0^\circ; 40^\circ]$  наблюдается упорядоченное движения тяжелых и легких конвективных структур в диффузионном канале, т. е. более тяжелые структуры смещаются в нижнюю часть канала, а

легкие встречные – в верхнюю часть. Тем самым уменьшается сопротивление массообмену. При дальнейшем увеличении угла наклона наблюдается снижение интенсивности массообмена, вызванное уменьшением проекции вектора гравитации на ось диффузионного канала, т. е. уменьшаются силы, обеспечивающие конвективную транспортировку более тяжелых структур к нижней колбе.

В районе  $70\text{--}80^\circ$  наблюдается переход конвективного массопереноса к диффузионному. Происходит уменьшение структурированных формирований в конвективных течениях и возникновение противотоков по стенкам канала.

При горизонтальном расположении канала в нем реализуется классическая диффузия, описание которой можно проводить в рамках традиционных представлений [17, с. 20]. На рис. 2 при  $\alpha = 90^\circ$  отчетливо фиксируется монотонное распределение изоконцентрационных линий по длине канала.

На рис. 3 представлена обобщенная зависимость интенсивности переноса аргона в квазистационарном режиме смешения при различных углах наклона. Данные рис. 3 отчетливо показывают характерные этапы смешения: диффузия, переходный режим, установившиеся течения. Приведенные результаты качественно согласуются с данными [1, с. 27; 3, с. 77; 9, с. 502], в которых опытным путем были зарегистрированы границы кинетических фазовых переходов в изотермических бинарных газовых смесях.

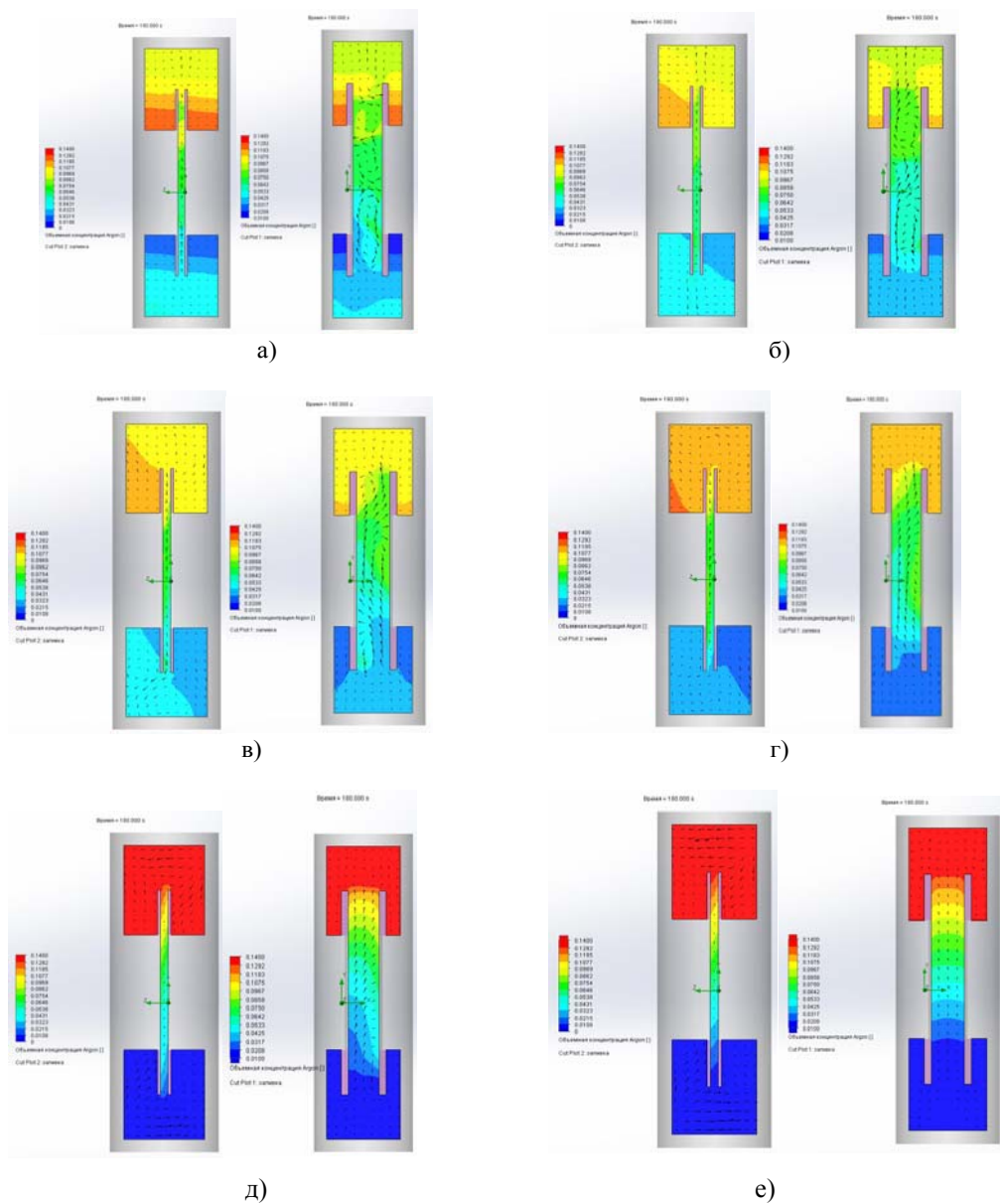


Рис. 2. Численное моделирование массопереноса во фронтальном и поперечном срезе разделительного канала в системе  $0,15 \text{ Ar} + 0,85 \text{ N}_2 - \text{N}_2$  при  $T = 298,0 \text{ K}$ : а)  $\alpha = 5^\circ$ ; б)  $\alpha = 40^\circ$ ; в)  $\alpha = 60^\circ$ ; г)  $\alpha = 70^\circ$ ; д)  $\alpha = 80^\circ$ ; е)  $\alpha = 90^\circ$ .

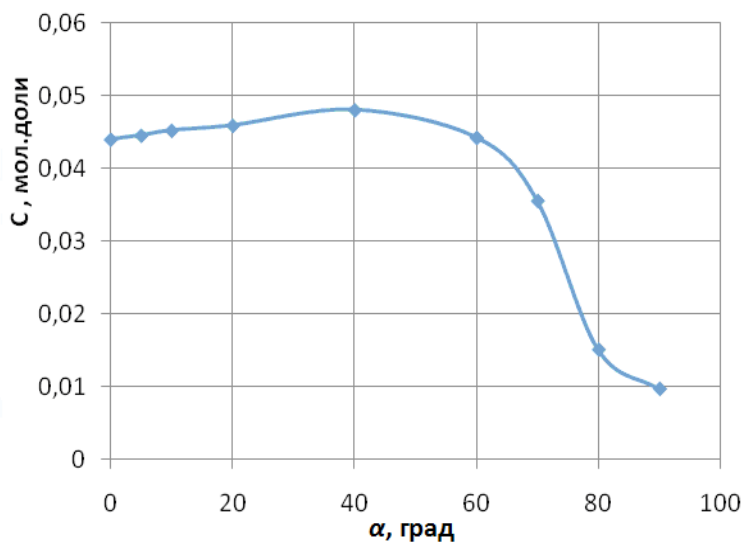


Рис. 3. Зависимость концентрации Ar (перешедшей из верхней колбы) от угла наклона к вертикали.

Таким образом, численные исследования показали, что в предельном для многокомпонентных смесей случае смешения бинарных систем в наклонном канале имеет место специфика возникновения конвективных течений на границе кинетического фазового перехода.

### Заключение

Несмотря на кажущуюся очевидность и естественность возникновения концентрационной гравитационной конвекции в изотермических бинарных газовых смесях в наклонных

каналах, установлено, что переход от диффузионного смешения к конвективному возникает при определенном угле наклона. Граничные течения сопровождаются возникновением структурированных формирований, обеспечивающих возникновение противотоков за счет действия концентрационного градиента и наклона слоя. Существует интервал углов наклона, при которых интенсивность граничных течений практически не изменяется.

Статья поступила в редакцию 14.05.2018

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках проекта № AP05132427 «Реализация принципа конвективных сепараторов в наклонных каналах» Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан.

### ACKNOWLEDGMENTS

Work is executed within the framework of project № AP05132427 “Realization of principle of convective separators in the sloping channels” of the Committee of Science of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Александров О.Е., Селезнев В.Д. Зависимость скорости смешения от давления при свободной конвекции бинарной смеси газов в двухколбовом аппарате // Журнал технической физики. 2016. Т. 86. Вып. 7. С. 26–30.
2. Алямовский А.А., Собачкин А.А., Одинцов Е.В., Харитонович А.И., Пономарев Н.Б. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2008. 1040 с.
3. Анкушева Н.Б., Косов В.Н., Селезнев В.Д. Влияние наклона диффузионного канала на устойчивость механического равновесия в изотермических бинарных газовых смесях // Прикладная механика и техническая физика. 2010. Т. 51. № 1. С. 75–78.
4. Ахметов С.А. Технология глубокой переработки нефти и газа. Уфа: Гилем, 2002. 672 с.
5. Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М.: Наука, 1972. 392 с.
6. Демин В.А. Конвективные сепараторы // Прикладная физика. 2013. № 4. С. 60–67.
7. 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. Т. 39. № 6. С. 600–606.
8. 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. Т. 19. Вып. 10. С. 18–21.
9. Косов В.Н., Жаврин Ю.И., Анкушева Н.Б. Конвективные режимы смешения в бинарных системах при неустойчивости механического равновесия газовой смеси // Инженерно-физический журнал. 2008. Т. 81. № 3. С. 501–507.
10. Косов В.Н., Кульжанов Д.У., Жаврин Ю.И., Красиков С.А., Федоренко О.В. Особенности разделения углеводородных изотермических газовых смесей при конвективной диффузии / Под ред. чл.- корр. НАН РК, проф. В.Н. Косова. Алматы: MV-Print, 2014. 144 с.
11. Косов В.Н., Селезнев В.Д., Жаврин Ю.И. Эффект разделения компонентов при изотермическом смешении тройных газовых систем в условиях свободной конвекции // Журнал технической физики. 1997. Т. 67. Вып. 10. С. 139–140.
12. Концепции развития топливно-энергетического комплекса Республики Казахстан до 2030 года. <http://adilet.zan.kz/rus/docs/P1400000724/compare>.
13. Мановян А.К. Технология первичной переработки нефти и природного газа. М.: Химия, 2001. 568 с.
14. Патент Республики Казахстан № 26884. Устройство разделения газовой смеси / Жаврин Ю.И., Косов В.Н., Красиков С.А., Федоренко О.В. // Промышленная собственность. 2013. Бюл. 126. С. 129.
15. Патент Республики Казахстан № 26885. Способ разделения газовой смеси / Жаврин Ю.И., Косов В.Н., Красиков С.А., Федоренко О.В. // Промышленная собственность. 2013. Бюл. 126. С. 129–130.
16. Рыжков И. И. Термодиффузия в смесях: уравнения, симметрии, решения и их устойчивость. Новосибирск: СО РАН, 2013. 200 с.
17. Шервуд Т., Пигфорд Р., Уилки Ч. Массопередача. Пер. с англ. М.: Химия, 1982. 695 с.

## REFERENCES

1. Aleksandrov O.E., Seleznev V.D. [The dependence of the rate of mixing on pressure in free convection of a binary mixture of gases in dvuhgorbogo apparatus]. In: *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 2016, vol. 86, no. 7, pp. 26–30.

2. SolidWorks 2007/2008. Komp'yuternoe modelirovanie v inzhenernoi praktike [SolidWorks 2007/2008. Computer simulation in engineering practice]. Alyamovskii A.A., Sobachkin A.A., Odintsov E.V., Kharitonovich A.I., Ponomarev N.B. SPb., BKHV-Peterburg Publ., 2008. 1040 p.
3. Ankusheva N.B., Kosov V.N., Seleznev V.D. [The effect of diffusion channel inclination on stability of mechanical equilibrium in isothermal binary gas mixtures]. In: *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*, 2010, vol. 51, no. 1, pp. 75–78.
4. Akhmetov S.A. Tekhnologiya glubokoi pererabotki nefti i gaza [Technology of deep processing of oil and gas]. Ufa, Gilem Publ., 2002. 672 p.
5. Gershuni G.Z., Zhukhovitskii E.M. Konvektivnaya ustoichivost' neszhimaemoi zhidkosti [Convective stability of incompressible fluid]. Moscow, Nauka Publ., 1972. 392 p.
6. Demin V.A. [Convective separators]. In: *Prikladnaya fizika*, 2013, no. 4, pp. 60–67.
7. Dil'man B.B., Lipatov D.A., Lotkhov V.A., Kaminskii V.A. [The occurrence of instabilities in nonstationary evaporation of binary solutions in an inert gas]. In: *Teoreticheskie osnovy khimicheskoi tekhnologii*, 2005, vol. 39, no. 6, pp. 600–606.
8. Kosov V.N., Zhavrin Yu.I. [Formation of structures and concentration convection in isothermal diffusion in ternary gas mixtures through a variable number of channels of equal area]. In: *Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 1993, vol. 19, no. 10, pp. 18–21.
9. Kosov V.N., Zhavrin Yu.I., Ankusheva N.B. [Convective regimes of mixing in binary systems with the mechanical equilibrium instability of a gas mixture]. In: *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*, 2008, vol. 81, no. 3, pp. 501–507.
10. Osobennosti razdeleniya uglevodorodnykh izotermicheskikh gazovykh smesei pri konvektivnoi diffuzii [Features of the isothermal separation of hydrocarbon gas mixtures in the convective diffusion]. Kosov V.N., Kul'zhanov D.U., Zhavrin Yu.I., Krasikov S.A., Fedorenko O.V. Almaty, MV-Print Publ., 2014. 144 p.
11. Kosov V.N., Seleznev V.D., Zhavrin Yu.I. [The effect of separation of the components in an isothermal mixture of triple gas systems under free convection]. In: *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 1997, vol. 67, no. 10, pp. 139–140.
12. Kontseptsii razvitiya toplivno-energeticheskogo kompleksa Respubliki Kazakhstan do 2030 goda [The concept of development of fuel and energy complex of Kazakhstan until 2030]. In: *Informatsionno-pravovaya sistema normativnykh pravovykh aktov Respubliki Kazakhstan* [The legal information system of normative legal acts of the Republic of Kazakhstan [website]. Available at: <http://adilet.zan.kz/rus/docs/P1400000724/compare> (accessed: 10.06.2018).
13. Manovyan A.K. Tekhnologiya pervichnoi pererabotki nefti i prirodnogo gaza [Technology of primary processing of oil and natural gas]. Moscow, Khimiya Publ., 2001. 568 p.
14. [Patent of the Republic of Kazakhstan No. 26884. The device for separation of gas mixtures] Yu. I. Zhavrin, V. N. Kosov., Krasikov S. A., Fedorenko O. V. In: *Promyshlennaya sobstvennost'* [Industrial property], 2013, no. 12b, pp. 129.
15. [Patent of the Republic of Kazakhstan No. 26885. The method for separation of gas mixtures] Yu. I. Zhavrin, V. N. Kosov., Krasikov S. A., Fedorenko O. V. In: *Promyshlennaya sobstvennost'* [Industrial property], 2013, no. 12b, pp. 129–130.
16. Ryzhkov I. I. Termidiffuziya v smesyakh: uravneniya, simmetrii, resheniya i ikh ustoichivost' [Thermal diffusion in mixtures: equations, symmetry of solutions and their stability]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2013. 200 p.
17. Sherwood T.K., Pigford R.L., Wilke Ch.R. Mass transfer. New York, McGraw-Hill Book Company, 1975. 677 p.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

*Красиков Сергей Анатольевич* – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник НИИ экспериментальной и теоретической физики Казахского Национального Университета имени аль-Фараби;  
e-mail: sa.krassikov@mail.ru

*Федоренко Ольга Владимировна* – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник НИИ экспериментальной и теоретической физики Казахского Национального Университета имени аль-Фараби;  
e-mail: fedor23.04@mail.ru

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Vladimir N. Kossov* – 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

*Sergey A. Krassikov* – candidate of technical sciences, head scientist researcher of the Research Institute of Experimental and Theoretical Physics at al-Farabi Kazakh National University;  
e-mail: sa.krassikov@mail.ru

*Olga V. Fedorenko* – candidate of physical and mathematical sciences, senior research scientist 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., Красиков С.А., Федоренко О.В. Численное моделирование возникновения конвективных течений при квазистационарном смешении в бинарных газовых смесях при различных углах наклона диффузионного канала // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Естественные науки. 2018. № 2. С. 134–144. DOI: 10.18384/2310-7189-2018-2-134-144

### FOR CITATION

Kossov V., Krasikov S., Fedorenko O. Numerical simulation of the occurrence of convective flows at quasi-stationary mixing in binary gaseous mixtures under different slope angles of the diffusion channel. In: *Bulletin of Moscow Region State University. Series: Natural sciences*, 2018, no. 2, pp. 134–144.  
DOI: 10.18384/2310-7189-2018-2-134-144