

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES

ISSN 1991-346X

Volume 6, Number 310 (2016), 120 – 126

Yu.I. Zhavrin, V.N.Kosov, M.S. Moldabekova,  
M.K. Asembaeva, O.V. Fedorenko, V. Mukamedenkyzy

Al-Farabi Kazakh National University, Almaty  
[mairamold@mail.ru](mailto:mairamold@mail.ru), [zhavrin@physics.kz](mailto:zhavrin@physics.kz)

## TRACE COEFFICIENTS OF COMPONENTS OF SOME NATURAL GASEOUS MIXTURES DIFFUSING INTO THE AIR

**Abstract.** Multicomponent mass transfer process is described by an effective diffusion coefficient (EDC). Effective diffusion coefficients  $D_i^{eff}$  are introduced similar to the binary diffusion coefficient.  $D_i^{eff}$  is the diffusion coefficient characterizing the diffusion rate of component  $i$  in the mixture of other gases. It is shown that the effective diffusion coefficient is a complex value. It changes when transferring from a certain point of system to another one. This is due to the fact that the flow  $j_i$  of each component depends on the concentration distribution of all components. The sign of the EDC will depend on the component distribution within the system. The dependence of the EDC on the concentration of components is considered weak. Therefore, a known solution of the corresponding diffusion problem for binary systems is used. We consider the special case diffusion of small impurities, i.e. the trace diffusion wherein  $D_i^{eff} = D_{i1}$ . The obtained expressions for the EDC will not depend on the initial concentration distribution of components. This method is used to study the effective diffusion coefficients of trace components in a number of natural gas mixtures diffusing into the air. These gases are following  $CH_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_3H_8$ ,  $n-C_4H_{10}$ ,  $n-C_5H_{12}$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$ .

The experiments were carried out at  $T = 298.0$  K and  $P = 0.101$  MPa. The calculated effective diffusion coefficients were compared with those obtained on basis of the solution of a system of Stefan-Maxwell equations and the experimental data. In the numerical experiment, the EDC of components are determined on basis of the Stefan-Maxwell equations and the approximate methods. Application of the EDC method gives the best quantitative agreement with the experimental data for the examined systems. The comparison results indicate that the calculation procedure of the EDC proposed by authors greatly simplifies the analysis of multicomponent mass transfer.

**Key words:** diffusion process; multicomponent mass transfer; gas mixture.

УДК 533.15; 536.25

Ю.И. Жаврин, В.Н.Косов, М.С. Молдабекова,  
М.К. Асембаева, О.В. Федоренко, В. Мукамеденкызы

Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы  
\*НИИ ЭТФ при КазНУ им. аль-Фараби, г. Алматы

## СЛЕДОВЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ КОМПОНЕНТОВ НЕКОТОРЫХ ПРИРОДНЫХ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ, ДИФФУНДИРУЮЩИХ В ВОЗДУХ

**Аннотация.** Процесс многокомпонентного массопереноса описывается эффективным коэффициентом диффузии (ЭКД). Эффективные коэффициенты диффузии  $D_i^{эф}$  вводятся аналогично коэффициенту бинарной диффузии.  $D_i^{эф}$  – коэффициент диффузии, характеризующий скорость диффузии компонента  $i$  в смесь остальных газов. Показано, что эффективный коэффициент диффузии представляет сложную

величину. Он изменяется при переходе от одной точки системы к другой. Это связано с тем, что поток  $j_i$  каждого из компонентов зависит от распределения концентрации всех компонентов. От распределения компонентов внутри системы будет зависеть и знак ЭКД. Зависимость ЭКД от концентрации компонентов считается слабой. Поэтому используется известное решение соответствующей диффузионной задачи для бинарных систем. Рассматривается частный случай диффузии малых примесей, т.е. следовая диффузия. При этом  $D_i^{\text{эф}} = D_{i1}$ . Полученные выражения для ЭКД не будут зависеть от начального распределения концентраций компонентов. Данный метод использован для исследования эффективных коэффициентов диффузии следовых компонентов в ряде природных газовых смесей, диффундирующих в воздух. Это следующие газы:  $CH_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_3H_8$ ,  $n-C_4H_{10}$ ,  $n-C_5H_{12}$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$ .

Эксперименты проведены при  $T = 298,0$  К и  $P = 0,101$  МПа. Вычисленные эффективные коэффициенты диффузии были сопоставлены с данными, полученными на основании решения системы уравнений Стефана-Максвелла, и с экспериментальными данными. В численном эксперименте ЭКД компонентов определяются на основе уравнений Стефана-Максвелла и приближенными методами. Применение метода ЭКД дает наилучшее количественное согласие с экспериментальными данными для рассмотренных систем. Результаты сравнения свидетельствуют, что, предложенная авторами методика расчета ЭКД, существенно упрощает анализ многокомпонентного массопереноса.

**Ключевые слова:** диффузионный процесс, многокомпонентный массоперенос, газовая смесь.

## Введение

Природный газ по сравнению с другими видами источников энергии имеет ряд существенных преимуществ и широко используется в различных отраслях промышленности, а также в быту. Основным его компонентом является метан  $CH_4$ . Кроме того, в природном газе могут содержаться примеси водорода, азота, высших углеводородов  $C_nH_m$ , оксида и диоксида углерода. Для описания тепло-массообмена, например, воздух – углеводородные смеси газов (в дальнейшем под углеводородными смесями газов будем понимать *природные* углеводородные смеси газов различного состава) необходимо знать их теплофизические свойства в широком интервале температур и давлений (удельный объем, энтальпия, энтропия, вязкость, теплопроводность и т.д.). Однако на данный момент в большинстве справочников и руководств приведена очень краткая (либо вообще отсутствует [1]) информация о массообменных свойствах природных газов, хотя такие данные крайне необходимы для проектирования технологических циклов и рациональной эксплуатации производственного оборудования. Современный уровень развития вычислительной техники позволяет получать в большинстве конкретных случаев необходимую информацию о переносных и других свойствах газов и их смесей в компактной форме в виде функциональных зависимостей, обеспечивая выбор рациональных режимов работы оборудования в технологических процессах. При этом значительно снижаются затраты на весь производственный цикл.

Иногда сложные функциональные зависимости при тепло-массообменных процессах можно значительно упростить, используя разумные допущения, не искажающие физическую картину. Это, например, относится к многокомпонентному массопереносу в газовых смесях и его описанию через эффективные коэффициенты диффузии (ЭКД). На данный момент такой подход является одним из простых и достаточно точных способов [2-8].

## Методы исследования

Экспериментальный материал по изучению многокомпонентного массопереноса с использованием ЭКД имеется для самых общих случаев. Его можно применить для прогнозирования значений ЭКД при расчете различных массообменных процессов в более широких областях термодинамических параметров. Параллельно с проведением экспериментальных работ разрабатывались методы расчета многокомпонентной диффузии, в основе которых, в большинстве случаев, лежали уравнения Стефана-Максвелла. Весь эволюционный процесс, связанный с разработкой этой методики, показал, что такой подход дает возможность предвидеть развитие диффузионных процессов в многокомпонентной газовой смеси [7,9]. Метод ЭКД также позволяет путем проведения численного эксперимента получать кинетические характеристики многокомпонентного массопереноса.

Особо отметим: метод ЭКД основан на том, что процесс многокомпонентного массопереноса можно описать эффективным коэффициентом диффузии, который в случае бинарной системы

будет тождественно равен обычному коэффициенту взаимной диффузии (КВД). Формально это утверждение для одномерного случая записывается в виде первого закона Фика

$$j_i = -D_i^{\phi} \frac{dc_i}{dx}, \quad (1)$$

где  $j_i$ ,  $c_i$  – плотность диффузионного потока и концентрация  $i$  – го компонента соответственно.

Таким образом,  $j_i$  – поток  $i$  – го компонента в  $n$  – компонентной газовой смеси определяется только градиентом данного компонента и его ЭКД, который характеризует скорость диффузии компонента  $I$  в смесь остальных газов.

В литературе приводится ряд записей выражений для ЭКД (см., например, [3,8]), в основе которых лежат уравнения Стефана - Максвелла. Мы будем использовать выражение из работы [5,10], которое легко проверяется в диффузионных экспериментах.

$$D_i^{\phi} = D_{ii}^* + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n-1} D_{ij}^* \frac{dc_j}{dc_i}, \quad (2)$$

где  $D_{ii}^*$ ,  $D_{ij}^* = f(D_{ij}, y_i, y_j)$  – главные и перекрестные «практические» коэффициенты диффузии (ПКД) или их иногда называют матричными коэффициентами многокомпонентной диффузии (МКМД);  $dc_j / dc_i$  – отношение, связывающее изменение концентрации  $j$ – го компонента с изменением концентрации  $i$ –го компонента;  $D_{ij}$  – КВД пары газов  $i$  и  $j$ ;  $y_i$ ,  $y_j$  – мольные доли компонентов  $i$  и  $j$ .

Выражение (2) в локальных величинах достаточно сложно в применении, поэтому его упрощают, переходя к приближенному вычислению интегрального (усредненному по всему диффузионному слою) ЭКД  $i$  – го компонента в  $n$  компонентной смеси. Величины  $D_{ii}^*$ ,  $D_{ij}^*$  рассчитываются для усредненных (среднее арифметическое) мольных долей, а отношение градиентов заменяют отношением разностей концентраций компонентов между точками  $\theta$  и  $L$  на границах диффузионного слоя

$$\bar{D}_i^{\phi} = \bar{D}_{ii}^* + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n-1} \bar{D}_{ij}^* \left( \frac{c_j^L - c_j^0}{c_i^L - c_i^0} \right). \quad (3)$$

Из (3) следует, что в зависимости от распределения компонентов внутри системы зависит знак ЭКД, который может быть как положительный, так и отрицательный. Для простейшей многокомпонентной системы – тройной смеси выражение для расчета ЭКД имеет вид

$$\bar{D}_i^{\phi} = \frac{(1 - \bar{y}_i) \bar{D}_{ij} \bar{D}_{ik} + \bar{y}_i \bar{D}_{jk} \bar{D}_{ik} + \bar{y}_i (\bar{D}_{ik} \bar{D}_{jk} - \bar{D}_{ij} \bar{D}_{jk}) \left( \frac{c_j^L - c_j^0}{c_i^L - c_i^0} \right)}{\bar{y}_i \bar{D}_{jk} + \bar{y}_j \bar{D}_{ik} + \bar{y}_k \bar{D}_{ij}}, \quad i, j, k = 1, 2, 3 \quad (4)$$

где  $\bar{y}_i, \bar{y}_j, \bar{y}_k$  – усредненные (среднее арифметическое) мольные доли компонентов.

В частных случаях многокомпонентной изотермической диффузии можно получить выражения для ЭКД, которые не будут зависеть от начального распределения концентраций компонентов [2,5]:

1. Следовая диффузия (диффузия малых примесей) компонента  $i$  в однородную смесь остальных газов

$$\bar{D}_i^{\phi} = \frac{1}{\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \bar{x}_j / D_{ij}} ; \quad (5)$$

2. Для систем, где компоненты, кроме компоненты  $i$ , неподвижны либо перемещаются с постоянной скоростью

$$\bar{D}_i^{\phi} = \frac{1 - \bar{x}_i}{\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \bar{x}_j / \bar{D}_{ij}} ; \quad (6)$$

3. Для систем, в которых коэффициенты взаимной диффузии (КВД) пар газов, входящих в смесь,  $D_{ij}$  близки или одинаковы, т.е.

$$\bar{D}_i^{\phi} = D_{ij} . \quad (7)$$

Интегральные значения ЭКД в  $n$ - компонентной газовой смеси можно рассчитывать по формуле (3), а для диффузии трех компонентов по (4). Общим при расчете интегральных ЭКД является то, что они проводятся для равновесных концентраций компонентов с использованием коэффициентов взаимной диффузии (КВД) пар газов, входящих в систему. Прежде, чем начинать расчеты ЭКД в смесях с большим числом компонентов, рационально объединить газы с близкими КВД и считать их одним газом с каким-то средним коэффициентом диффузии. Такая операция не приведет к серьезной погрешности, а математическую обработку данных серьезно облегчит.

При обращении к той или иной формуле для расчета ЭКД необходимо помнить для, какого случая диффузии она получена. Иначе, если нарушены эти условия, то конечный результат будет неверен. В частности, это больше всего относится к формуле (5), которую из-за ее простоты применяют при всех видах расчета многокомпонентной диффузии, не задумываясь о тех ограничениях, которые были заложены при ее выводе.

При измерении ЭКД в большинстве задач нами использовался метод двухколбового диффузионного прибора [11]. Конструкция диффузионного аппарата, приборов и узлов, входящих в экспериментальную установку, а также методика работы детально описаны в [12]. В представленных расчетах использовались геометрические параметры диффузионного аппарата, (постоянная прибора) которого была равна 2500 см<sup>2</sup>.

Ранее нами [13] через численный эксперимент была исследована диффузия пяти природных углеводородных газовых смесей в воздух при  $T = 298,0$  К и  $P = 0,101$  МПа. Состав и концентрации компонентов в смесях были взяты из справочного пособия [1]. При этом выбор того или иного газового месторождения не был связан с классификацией предложенной в [1], а обуславливался только концентрацией основного газа – метана. Этот диапазон составлял от минимальных его значений в смеси до максимальных. В расчетах нами учитывались все компоненты, хотя многие из газов присутствовали в виде «следов». (В понятие «следовой» концентрации вкладывается следующий смысл: когда молекулы данного газа не испытывают соударений между собой, а сталкиваются только с молекулами других газов. В количественном отношении (смотря, какие газы в смеси) – это может достигать до 5-7 %).

### Результаты исследований

В данной публикации представлены исходные данные и полученные ранее экспериментальные результаты по трем из пяти природных смесей [13]. Ниже перечислены газовые месторождения, приведен их состав и концентрации компонентов в мольных долях (отметим, что в дальнейшем для удобства нами будут использоваться не химические символы газов, а их цифровая нумерация, приведенная после них), а также результаты их обработки:

1. Марковское (Балыхтинский пласт) ([1] с. 182). Исследуемая система:  $Air(1) - 0,7240 CH_4(2) + 0,0930 C_2H_6(3) + 0,0780 C_3H_8(4) + 0,0490 n-C_4H_{10}(5) + 0,0305 n-C_3H_{12}(6) + 0,0100 CO_2(7) + 0,0155 N_2(8)$ ;

2. Уренгойское месторождение ([1] с. 182). Исследуемая система:  $Air(1) - 0,8531 CH_4(2) + 0,0581 C_2H_6(3) + 0,0536 C_3H_8(4) + 0,0200 n-C_4H_{10}(5) + 0,0018 n-C_5H_{12}(6) + 0,0044 CO_2(7) + 0,0090 N_2(8)$ ;

3. Газли-ХII месторождение (средний состав) ([1] с. 178). Исследуемая система:  $Air(1) - 0,9444 CH_4(2) + 0,0258 C_2H_6(3) + 0,0031 C_3H_8(4) + 0,0015 n-C_4H_{10}(5) + 0,0039 n-C_5H_{12}(6) + 0,0020 CO_2(7) + 0,0193 N_2(8)$ .

Для проведения расчетов были необходимы КВД пар газов, входящих в системы. Вычисления КВД проводились согласно теории Чепмена-Энскога с использованием потенциала Леннарда-Джонса [2] при  $T = 298,0$  К,  $P = 0,101$  МПа. Так как экспериментальных данных очень мало, поэтому для создания объективного подхода использовались только расчетные значения (при желании читатель может сопоставить эти результаты с экспериментом, если таковой он имеет). Значения КВД следующие:  $D_{12} = 0,217$ ;  $D_{13} = 0,144$ ;  $D_{23} = 0,151$ ;  $D_{14} = 0,111$ ;  $D_{24} = 0,121$ ;  $D_{34} = 0,077$ ;  $D_{15} = 0,079$ ;  $D_{25} = 0,105$ ;  $D_{35} = 0,066$ ;  $D_{45} = 0,050$ ;  $D_{16} = 0,082$ ;  $D_{26} = 0,092$ ;  $D_{36} = 0,057$ ;  $D_{46} = 0,043$ ;  $D_{56} = 0,036$ ;  $D_{17} = 0,151$ ;  $D_{27} = 0,165$ ;  $D_{37} = 0,104$ ;  $D_{47} = 0,079$ ;  $D_{57} = 0,067$ ;  $D_{67} = 0,058$ ;  $D_{18} = 0,203$ ;  $D_{28} = 0,217$ ;  $D_{38} = 0,144$ ;  $D_{48} = 0,112$ ;  $D_{58} = 0,096$ ;  $D_{68} = 0,083$ ;  $D_{78} = 0,151$  см<sup>2</sup>/с.

Также воздух полагался как один компонент. Это вполне оправдано, если считать, что соотношение концентраций кислорода и азота в воздухе не подвергается сильным изменениям [16].

Так как диффузионный процесс в двухколбовом аппарате является нестационарным, то, естественно, представляет интерес поведение ЭКД компонентов в системах с течением времени [13]. За интервал времени в 360 минут они практически не изменились, хотя изменение концентраций в колбах аппарата достигло значений близких к равновесным. Такое поведение газов вполне объяснимо тем, что их КВД в воздух отличаются незначительно. Аналогичное поведение компонентов было получено и для всех других исследованных систем.

Ниже приведены вычисленные значения ЭКД основных компонентов (для Air и CH<sub>4</sub>) и следовые коэффициенты (сюда были отнесены остальные газы) исследованных систем.

#### 1. Марковское (Балыхтинский пласт):

Таблица 1 - ЭКД компонентов, полученные на основе уравнений Стефана-Максвелла [9] и приближенными методами (формулы 1.20 и 1.21)

Компоненты смеси газов	Air	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	n-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
Расчет по [9]	0,181	0,206	0,138	0,107	0,068	0,079	0,144	0,193
Расчет по 1.20 и 1.21 (для Air и CH <sub>4</sub> )	0,172	0,188	0,141	0,110	0,0849	0,0793	0,140	0,190

#### 2. Уренгойское месторождение:

Таблица 2 - ЭКД компонентов, полученные на основе уравнений Стефана-Максвелла [9] и приближенными методами (формулы 1.20 и 1.21)

Компоненты смеси газов	Air	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	n-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
Расчет по [9]	0,199	0,212	0,141	0,107	0,0645	0,077	0,146	0,198
Расчет по (1.20) и (1.21) для Air и CH <sub>4</sub> )	0,194	0,201	0,146	0,115	0,088	0,082	0,149	0,198

#### 3. Газли-ХII месторождение (средний состав):

Таблица 3 - ЭКД компонентов, полученные на основе уравнений Стефана-Максвелла [9] и приближенными методами (формулы 1.20 и 1.21)

Компоненты смеси газов	Air	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	n-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
Расчет по [9]	0,212	0,201	0,142	0,107	0,061	0,075	0,148	0,202
Расчет по (1.20) и (1.21) для Air и CH <sub>4</sub> )	0,211	0,216	0,148	0,115	0,090	0,090	0,140	0,190

### Заклучение

Таким образом, предложенные методы расчета коэффициентов диффузии (ЭКД и следовые коэффициенты) для природных многокомпонентных газовых систем при строгом подходе и по приближенным методикам, удовлетворительно согласуются между собой и могут взаимно дополнять друг друга, что свидетельствует о принципиальной возможности их использования для практических целей, а также служить в качестве справочной информации при описании массообменных процессов.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Теплотехнические расчеты процессов транспорта и регазификации природных газов. Справочное пособие / Загорученко В.А., Бикчентай Р.Н., Вассерман А.А. и др. – М., Недра, 1980. – 320 с.
- [2] Берд Р., Стьюарт В., Лайтфут Е. Явления переноса: Пер. с англ. – М.: Химия, 1974. – 688
- [3] Тирский Г.А. Вычисление эффективных коэффициентов диффузии в ламинарном диссоциированном многокомпонентном пограничном слое // ПММ. – 1969, Вып. 1. – С. 180-182.
- [4] Wilke C. R. Diffusional properties of multicomponent gases // Chem. Eng. Prog. - 1950. - V. 46, N 2. - P. 95 - 104.
- [5] Косов Н.Д., Жаврин Ю.И., Новосад З.И. Диффузия в многокомпонентных газовых смесях // Теплофизические свойства веществ и материалов. – М.: Изд-во стандартов. – 1982, вып. 17. – С. 86-112.
- [6] Викторов М.М. Методы вычисления физико-химических величин и прикладные расчеты. – М.: Химия, 1977. – 360 с.
- [7] Жаврин Ю.И., Косов Н.Д., Новосад З.И. Расчет эквимолярной диффузии в многокомпонентных газовых смесях методом эффективных коэффициентов // Диффузия в газах и жидкостях. – Алма-Ата: МВ и ССО КазССР, 1974. – С. 12-19.
- [8] Жаврин Ю.И., Косов Н.Д., Новосад З.И. Описание нестационарной диффузии в многокомпонентных газовых смесях методом эффективных коэффициентов // ЖФХ. – 1975. – Т. 49, № 3. – С. 706-709.
- [9] Жаврин Ю.И., Жаврин В.Ю., Косов В.Н., Поярков И.В. Расчет многокомпонентного массопереноса в двухколбовом аппарате с применением языка программирования DELPHI // Вестник КазНУ, сер. физическая. – Алматы. – 2006, № 2 (22). – С. 73-79.
- [10] Новосад З.И., Косов Н.Д. Эффективные коэффициенты диффузии трехкомпонентных газовых смесей гелия, аргона и углекислого газа // ЖТФ. – 1970. – Т. 40, № 11. – С. 2368-2375.
- [11] Andrew S.P.S. A simple Method of Measuring Gaseous Diffusion Coefficient // Chem. Eng. Sci. – 1955. – V. 4. – P. 269-272.
- [12] Жаврин Ю.И., Косов Н.Д., Белов С.М., Семидоцкая Н.И. О применении метода эффективных коэффициентов диффузии к диффузии в многокомпонентных газовых смесях при повышенных давлениях // Теплообмен в жидкостях и газах. – Алма-Ата, 1982. – С. 3-12.
- [13] Жаврин Ю.И., Поярков И.В., Егорова М.А., Котелевская Е.А., Торопыгина А.В. Диффузия некоторых многокомпонентных углеводородных газовых смесей в воздух // Вестник КазНУ. Сер. физ. – Алматы, 2007. – № 2(24). – С. 8-12.

### REFERENCES

- [1] Teplotehnicheskie raschety processov transportaie gazifikacii prirodnyh gazov. Spravochnoeposobie / Zagoruchenko V.A., Bikchentaj R.N., Vasserman A.A. i dr. M.: Nedra, **1980**. 320 s.
- [2] Berd R., St'juart V., Lajtftut E. Javlenija perenosa: Per. s angl. M.: Himija, **1974**. 688.
- [3] Tirskej G.A. Vychislenie jeffektivnyh kojefficientov diffuzii v laminarnom dissociirovanom mnogokomponentnom pograničnom sloe // PMM. **1969**, Vyp. 1. S. 180-182.
- [4] Wilke C. R. Diffusional properties of multicomponent gases // Chem. Eng. Prog. **1950**. V. 46, N 2. P. 95 - 104.
- [5] Kosov N.D., Zhavrin Yu.I., Novosad Z.I. Diffuzija v mnogokomponentnyh gazovyh smesjah // Teplofizicheskie svojstva veshhestv i materialov. M.: Izd-vo standartov. **1982**, vyp. 17. S. 86-112.
- [6] Viktorov M.M. Metody vychislenija fiziko-himicheskikh velichini prikladnye raschety. M.: Himija, **1977**. 360 s.
- [7] Zhavrin Yu.I., Kosov N.D., Novosad Z.I. Raschet jekvimoljarnoj diffuzii v mnogokomponentnyh gazovyh smesjah metodom jeffektivnyh kojefficientov // Diffuzija v gazahizhidkostjah. Alma-Ata: MV i SSO KazSSR, **1974**. S. 12-19.
- [8] Zhavrin Yu.I., Kosov N.D., Novosad Z.I. Opisanie nestacionarnoj diffuzii v mnogokomponentnyh gazovyh smesjah metodom jeffektivnyh kojefficientov // ZhFH. **1975**. T. 49, № 3. S. 706-709.
- [9] Zhavrin Yu.I., Zhavrin V.Yu., Kosov V.N., Pojarkov I.V. Raschet mnogokomponentnogo massoperenosa v dvuhkolbovom apparate s primeneniem jazyka programmirovanija DELPHI // Vestnik KazNU, ser. fizicheskaja. Almaty. **2006**, № 2 (22). S. 73-79.
- [10] Novosad Z.I., Kosov N.D. Jefferktivnye kojefficienty diffuzii trehkomponentnyh gazovyh smesej gelija, argona i uglekislogo gaza // ZhTF. **1970**. T. 40, № 11. S. 2368-2375.
- [11] Andrew S.P.S. A simple Method of Measuring Gaseous Diffusion Coefficient // Chem. Eng. Sci. **1955**. V. 4. P. 269-272.
- [12] Zhavrin Yu.I., Kosov N.D., Belov S.M., Semidockaja N.I. O primenenii metodaj jeffektivnyh kojefficientov diffuzii k diffuzii v mnogokomponentnyh gazovyh smesjah pri povyshennyh davlenijah // Teplomassoperenos v zhidkostjah i gazah. Alma-Ata, **1982**. S. 3-12.

[13] Zhavrin Yu.I., Pojarkov I.V., Egorova M.A., Kotelevskaja E.A., Toropygina A.V. Diffuzija nekotoryh mnogokomponentnyh uglevodorodnyh gazovyh smesej v vozduh // Vestnik KazNU. Ser. fiz. Almaty, 2007. № 2(24). S. 8-12.

ӘОЖ: 533.15; 536.25

**Ю.И. Жаврин, В.Н. Косов, М.С. Молдабекова,  
М.К. Асембаева, О.В. Федоренко, В. Мукамеденкызы**

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан

### **АУАМЕН АРАЛАСАТЫН КЕЙБІР ТАБИҒИ ГАЗ ҚОСПАСЫ КОМПОНЕНТТЕРІ КОЭФФИЦИЕНТТЕРІНІҢ ТАБЫ**

**Аннотация.** Көпқұрамды массатасымалдау процесі диффузияның эффективті коэффициенті арқылы сипатталады. Диффузияның эффективті коэффициенті  $D_i^{эф}$  диффузияның бинарлы коэффициенті секілді қорытылып шығарылады.  $D_i^{эф}$  - дегеніміз қоспадағы  $i$ компоненттің диффузия жылдамдығын сипаттайтын диффузия коэффициенті. Диффузияның эффективті коэффициентінің күрделі шама екендігі көрсетілген. Ол бір нүктеден екінші нүктеге өткенде өзгеріп отырады. Бұл компоненттердің әрбір  $j$ ағыны барлық компоненттердің концентрациясының таралуына тәуелділігіне байланысты. Жүйенің ішіндегі компоненттердің таралуына ЭДК-нің таңбасы тәуелді. Ал, ЭДК-нің компоненттердің концентрациясына тәуелділігі әлсіз. Сондықтан да, бинарлы жүйелер үшін сәйкесінше диффузиялық есептерді шешуде анықталған тәсілдер қолданылады. Мұнда аз қоспалы диффузияның жекелеген жағдайын қарастырайық, яғни диффузия коэффициенттерінің табы  $D_i^{эф} = D_{i1}$ . ЭДК-і үшін алынған нәтижелер компонент концентрациясының алғашқы таралуынан тәуелсіз. Бұл әдіс ауамен араласатын табиғи газ қоспа компоненттерінің ЭДК-ін зерттеуде пайдаланылған. Олар мына газдар:  $CH_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_3H_8$ ,  $n-C_4H_{10}$ ,  $n-C_5H_{12}$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$ .

Тәжірибелер  $T = 298,0 K$  және  $P = 0,101 Mna$  жүргізілген. Есептелінген эффективті диффузия коэффициенттері Стефан-Максвелл теңдеулер жүйесінің шешімі негізінде алынған нәтижелермен және тәжірибелік нәтижелермен салыстырылды. Компоненттердің ЭДК-ін сандық тәжірибелерде Стефан-Максвелл теңдеулер жүйесінің шешімі негізінде және жуықтау әдістерімен анықтайды. Қарастырылып отырған жүйелер үшін ЭДК әдісін қолдану тәжірибелік нәтижелермен сәйкестіктің жоғары екендігін көрсетеді. Салыстыру нәтижелері көрсеткендей авторлардың ұсынып отырған ЭДК есептеу әдісі көпкомпонентті массатасымалдауды зерттеуді едәуір жеңілдеткендігі көрсетілген.

**Түйін сөздер:** диффузиялық процесс, көпкомпонентті массаалмасу, газ қоспасы.