

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

Казахский национальный университет им. аль-Фараби,  
Казахстан, Алматы, \*e-mail: mukameden@inbox.ru

**ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ  
ЭФФЕКТИВНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДИФФУЗИИ  
ДЛЯ ДВУХ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ГАЗОВЫХ СИСТЕМ,  
СОДЕРЖАЩИХ ВОЗДУХ, ВОДОРОД И НЕКОТОРЫЕ УГЛЕВОДОРОДЫ**

В данной статье представлены расчеты показателей степеней температурных зависимостей эффективных коэффициентов диффузии (ЭКД) газов в двух многокомпонентных смесях, которые в той или иной мере могут использоваться при горении газообразного топлива. Приведенные схемы расчетов температурных зависимостей ЭКД проведены для интервала температур 298 – 900 К и атмосферного давления. Основными источниками информации по данной работе являлись публикации ряда ученых, а также исследования авторов данной статьи, которые, в свое время, разработали и аттестовали во ВНИЦ МВ Госстандарта СССР таблицы рекомендуемых справочных данных по ЭКД для технически важных диффундирующих многокомпонентных смесей. Полученные результаты позволяют полнее раскрыть механизм диффузионного процесса в сложных газовых смесях с изменением температуры, дать оценку переносу каждого компонента и суммарного массопереноса в целом. Можно надеяться, что представленные результаты послужат в качестве нового справочного материала.

**Ключевые слова:** диффузия, ЭКД, бинарная диффузия, бароэффект, массоперенос.

Zhavrin Yu.I., Moldabekova M.C., Asembaeva M.K.,  
Fedorenko O.V., Mukamedenkyzy V.\*

Al-Farabi Kazakh National University,  
Kazakhstan, Almaty, \*e-mail: mukameden@inbox.ru

**Temperature dependences of the effective diffusion coefficients  
for two multicomponent gaseous systems containing air,  
hydrogen and some hydrocarbons**

Calculations of the exponents of temperature dependences of the effective diffusion coefficients (EDC) of gases for two multicomponent mixtures, which can be used for the combustion of gaseous fuels, are presented in the article. Transport properties of gases and its mixtures subject to the temperature effect are determined as the functional dependence. Temperature dependence of the EDC of components is presented in the semiempirical formula, which is similar to the power dependence of interdiffusion coefficients (IDC) on temperature. Given calculation schemes of the temperature dependences of EDC are carried out for the temperature range of 298 – 900 K and the atmospheric pressure. The main sources of information for this work are the publication of a number of scientists, as well as the researches made by the authors of this article who developed tables of the recommended reference data of EDC for technically important diffusing multicomponent mixtures and certified them in the NRC MS of the State standard specification of USSR. The results allow revealing the mechanism of diffusion process in the complex gas mixtures under the temperature change and evaluating the transfer of each component and the total mass transport. The presented results can be used for the new reference data.

**Key words:** diffusion, EDC, binary diffusion, baroeffect, masstransfer.

Жаврин Ю.И., Молдабекова М.С., Әсембаева М.К.,  
Федоренко О.В., Мұқамеденқызы В.\*

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,  
Қазақстан, Алматы, \*e-mail: mukameden@inbox.ru

### Құрамында ауа, сутегі және кейбір көмірсутектері бар екі көпкомпонентті газ қоспалары үшін эффективті диффузия коэффициенттерінің температуралық тәуелділігі

Аталған мақалада газ тәрізді отынның жануында қолдануға болатын екі көпкомпонентті газ қоспасының эффективтік диффузия коэффициенттерінің температуралық тәуелділіктерінің көрсеткіш дәрежелерін есептеу көрсетілген. Атмосфералық қысым мен температура интервалы 298-900 К аралығында болатын газ жүйелері үшін эффективтік диффузия коэффициенттерінің температуралық тәуелділігін есептеу кестелері келтірілген. Жұмыстағы негізгі мәліметтер ғалымдардың жариялымдары мен мақала авторларының КСРО Госстандартында дайындалып аттестацияланған техникалық маңызды көпкомпонентті газ қоспаларының ЭДК-і үшін жасалған анықтамалық зерттеу нәтижелері. Алынған нәтижелер температура өзгерісі бойынша диффузиялық процестің толық механизмін ашуға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, нәтижелер жаңа анықтамалық материал ретінде қолданылуы мүмкін.

**Түйін сөздер:** диффузия, ЭДК, бинарлық диффузия, барозффект, массатасымалдау.

#### Введение

Температурные зависимости эффективных коэффициентов диффузии (ЭКД) газов в многокомпонентных системах на сегодняшний день вообще не представлены в справочной литературе, а число публикаций по данной тематике весьма ограничено. Однако для многих процессов, например, горение газообразного топлива, такая информация необходима и важна, так как позволяет более реально описать практическую часть процесса.

В данной статье представлены расчеты показателей степеней температурных зависимостей ЭКД газов для двух многокомпонентных газовых систем, компоненты которых в той или иной мере используются при горении газообразного топлива.

Авторы публикации сочли возможным на основании, имеющихся в литературных источниках сведений по температурным зависимостям коэффициентов взаимной диффузии (КВД) водорода и ряда углеводородных газов, расширить границы сведений о температурных зависимостях ЭКД компонентов в двух диффундирующих смесях: воздуха, водорода, метана, этана, пропана и n-бутана. Полученные результаты позволят полнее раскрыть механизм диффузионного процесса в сложных газовых смесях с изменением температуры, дать оценку переносу каждого компонента и суммарного массопереноса в целом.

Поставленную задачу о расчете переносных и других свойств газов и их смесей с учетом влияния термодинамических параметров (в дан-

ном случае температуры) можно решить, не прибегая к дорогостоящим экспериментам и представить конечный результат в компактной форме, например, в виде функциональных зависимостей.

В данной работе температурная зависимость ЭКД компонентов представлена в виде полуэмпирической формулы аналогичной формуле степенной зависимости КВД от температуры

$$D_{oi}^{эф} = D_{oi}^{эф} \left( \frac{T}{T_0} \right)^{n_i}, \quad (1)$$

где  $n_i$  – показатель степени, а  $D_{oi}^{эф}$  – ЭКД  $i$  – го компонента для начальной температуры  $T_0$  (в наших расчетах  $T_0 = 298$  К).

Такое представление вполне оправдано, так как метод эффективного коэффициента диффузии основан на том предположении, что процесс многокомпонентного массопереноса можно описать ЭКД [1], который в случае бинарной системы будет тождественно равен КВД. Формально это утверждение для одномерного случая записывается в виде первого закона Фика

$$j_i = -D_i^{эф} \frac{dc_i}{dx}, \quad (2)$$

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

Таким образом, поток  $i$ -го компонента в  $k$  – компонентной газовой смеси определяется только градиентом данного компонента и его ЭКД.

Апробация этого метода на многочисленных экспериментах, в том числе и по определению температурных зависимостей ЭКД (см., например, [2-6]) показала, что он физически правильно описывает диффузионный процесс с достаточной для практики точностью и, кроме того, прост в использовании [7-11].

В литературе приводится ряд записей выражений для ЭКД. Мы будем использовать выражение из работ (см., например, [12]), которое легко проверяется в диффузионных экспериментах.

$$D_i^{\Delta\phi} = D_{ii}^* + \sum_{j=1}^{k-1} D_{ij}^* \frac{dc_j}{dc_i}, \quad (3)$$

где  $D_{ii}^*$ ,  $D_{ij}^* = f(D_{ij}, y_i, y_j)$  – главные и перекрестные «практические» коэффициенты диффузии (ПКД) или матричные коэффициенты 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 (3) в локальных величинах сложно для применения, поэтому его упрощают, заменяя его интегральным (усредненным по всему диффузионному слою) ЭКД  $i$ -го компонента в  $k$  компонентной смеси. Величины  $D_{ii}^*$ ,  $D_{ij}^*$  рассчитываются для усредненных (среднее арифметическое) мольных долей, а отношение градиентов заменяют отношением разностей концентраций компонентов между точками  $0$  и  $L$  на границах диффузионного слоя

$$\bar{D}_i^{\Delta\phi} = \bar{D}_{ii}^* + \sum_{j=1}^{k-1} \bar{D}_{ij}^* \left( \frac{c_j^L - c_j^0}{c_i^L - c_i^0} \right). \quad (4)$$

Из (4) следует, что в зависимости от распределения компонентов внутри системы зависит знак ЭКД, который может быть как положительный, так и отрицательный.

### Методика исследования

Для проведения экспериментальных исследований по измерению ЭКД авторы, в большинстве случаев, использовали двухколбовые диффузионные аппараты [13]. Конструкция аппарата, приборов и узлов, входящих в экспериментальную установку, а также методика работы детально описаны в [14]. Первый аппарат имел следующие параметры: объемы

верхней и нижней колб –  $V_a = V_n = 76,9 \text{ см}^3$ ; длина и диаметр диффузионного канала  $L = 7,055 \text{ см}$  и  $d = 0,4 \text{ см}$ , а второй –  $V_a = V_n = 62,0 \text{ см}^3$ ; длину и диаметр канала  $L = 7,055 \text{ см}$  и  $d = 0,330 \text{ см}$  соответственно. Комплекс геометрических размеров, так называемая постоянная прибора  $B = L_{\Delta\phi} \cdot V_a \cdot V_n / S \cdot (V_a + V_n)$ , (здесь  $S$  – площадь поперечного сечения канала, а  $L_{\Delta\phi}$  – эффективная длина диффузионного канала [15]) для первого аппарата была равна –  $2215 \text{ см}^2$ , а для второго –  $2653 \text{ см}^2$ . В представленных ниже расчетах использовался аппарат, постоянная которого была равна  $2500 \text{ см}^2$ .

В данной работе через численный эксперимент были определены показатели степеней температурных зависимостей ЭКД компонентов для систем: 1.  $\text{H}_2(1) - 0,25\text{CH}_4(2) + 0,25\text{C}_2\text{H}_6(3) + 0,25\text{C}_3\text{H}_8(4) + 0,25\text{n-C}_4\text{H}_{10}(5)$  и 2.  $\text{Air}(1) - 0,2\text{H}_2(2) + 0,2\text{CH}_4(3) + 0,2\text{C}_2\text{H}_6(4) + 0,2\text{C}_3\text{H}_8(5) + 0,2\text{n-C}_4\text{H}_{10}(6)$  (здесь концентрации газов приведены в мольных долях, а после химического символа указана нумерация газов, которую для удобства будем использовать в дальнейшем) в интервале температур  $298 - 900 \text{ К}$  и давлении равном  $0,101 \text{ МПа}$ .

Ограничения, которые при работе с этими системами необходимо было соблюдать, принято во внимание. Они сводились к следующему: во-первых, газы и их смеси идеальные, во-вторых, температуры не нарушали структуру диффундирующих компонентов.

Для проведения расчетов температурных зависимостей ЭКД компонентов согласно (1) необходимо знать значения  $D_{0i}^{\Delta\phi}$  для каждого компонента смеси при  $T_0 = 298 \text{ К}$  и показатель степени температурной зависимости  $n_i$ . Однако, для ряда пар газов  $n_i$  не были измерены экспериментально, поэтому их находить приходилось расчетом, используя предложенные методики.

Во-первых, используя справочные данные о температурных зависимостях КВД пар газов, входящих в системы, рассчитывались КВД при соответствующих температурах от  $298$  до  $900 \text{ К}$  с интервалом в  $100 \text{ К}$ . Особо отметим, что в литературе нам не удалось найти показатели степеней температурных зависимостей для пар газов:  $\text{Air-H}_2$ ,  $\text{Air-CH}_4$ ,  $\text{Air-C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{Air-C}_3\text{H}_8$ ,  $\text{Air-n-C}_4\text{H}_{10}$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6\text{-C}_3\text{H}_8$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6\text{-n-C}_4\text{H}_{10}$ ,  $\text{C}_3\text{H}_8\text{-n-C}_4\text{H}_{10}$ . Поэтому пришлось обратиться к рекомендации

$$[16] \quad \text{«Однако} \quad D_{T_1} = D_{T_2} \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^{3/2} \text{ приблизительно}$$

отображает зависимость  $D$  от  $T$ . Эта формула дает лучшие результаты, если показатель  $3/2$  заменить в ней на  $\sim 1,80$  (стр. 465)», что нами и было сделано.

Тогда КВД пар газов в системе в зависимости от температуры  $T = 298, 400, 500, 600, 700, 800, 900$  К и  $P = 0,101$  МПа имели значения [17-21] (см. ниже таблицу 1).

**Таблица 1** – Коэффициенты взаимной диффузии некоторых пар газов в зависимости от температуры

Пара газов (степень температурной зависимости, ссылка)	Температура, К						
	298	400	500	600	700	800	900
	Коэффициенты взаимной диффузии, см <sup>2</sup> /с						
CH <sub>4</sub> – H <sub>2</sub> (1,81,[17])	0,705	1,201	1,799	2,503	3,308	4,213	5,214
CH <sub>4</sub> – C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (1,70,[17])	0,154	0,253	0,370	0,505	0,656	0,823	1,005
CH <sub>4</sub> – C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> (1,89,[17])	0,125	0,218	0,332	0,469	0,627	0,807	1,008
CH <sub>4</sub> – n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (1,57,[17])	0,106	0,168	0,239	0,317	0,404	0,499	0,600
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> – H <sub>2</sub> (1,71,[17])	0,577	0,954	1,397	1,908	2,483	3,121	3,818
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> – H <sub>2</sub> (1,71,[17])	0,448	0,741	1,084	1,481	1,928	2,423	2,964
n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> – H <sub>2</sub> (1,64,[17])	0,378	0,613	0,884	1,192	1,535	1,910	2,317
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> – C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> (1,80,[16,21])	0,078	0,131	0,196	0,271	0,358	0,456	0,563
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> – n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (1,80,[16,21])	0,067	0,112	0,168	0,233	0,307	0,390	0,483
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> – n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (1,81,[16,21])	0,051	0,085	0,127	0,176	0,233	0,296	0,366
Air-H <sub>2</sub> (1,81,[16,21])	0,773	1,317	1,972	2,744	3,626	4,618	5,715
Air-CH <sub>4</sub> (1,75,[16,21])	0,217	0,363	0,537	0,739	0,967	1,222	1,501
Air-C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (1,80,[16,21])	0,144	0,245	0,366	0,508	0,670	0,852	1,053
Air-C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> (1,80,[16,21])	0,111	0,189	0,282	0,391	0,516	0,657	0,812
Air-n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (1,80,[16,21])	0,079	0,134	0,201	0,278	0,368	0,467	0,578

В дальнейшем КВД из таблицы 1 использовались для определения  $D_i^{\rho\phi}$  каждого газа для начального распределения концентраций по методике, предложенной в работах [3, 4]. Из

полученных данных согласно (1) определялись  $n_i$  – показатели степеней температурных зависимостей компонентов. Результаты вычислений представлены в таблице 2.

**Таблица 2** – ЭКД и показатели степеней температурных зависимостей компонентов системы H<sub>2</sub>(1) – 0,25CH<sub>4</sub>(2) + 0,25C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(3) + 0,25C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>(4) + 0,25n-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>(5) для начального распределения концентраций в интервале температур 298-900 К

Газы	ЭКД компонентов, см <sup>2</sup> /с							
	Показатели степеней температурных зависимостей							
	Температура, К							
	298	400	500	600	700	800	900	<n>
H <sub>2</sub>	0,503	0,831	1,216	1,661	1,661	2,713	3,317	
		1,706	1,706	1,707	1,707	1,707	1,707	1,707
CH <sub>4</sub>	0,562	0,936	0,773	1,889	1,889	3,108	3,809	
		1,733	1,733	1,732	1,732	1,732	1,731	1,732
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,511	0,848	0,482	1,695	1,695	2,771	3,390	
		1,719	1,714	1,713	1,712	1,712	1,712	1,714
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,478	0,788	1,935	1,568	1,568	2,555	3,121	
		1,696	1,696	1,698	1,70	1,699	1,698	1,70
n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,460	0,753	0,992	1,491	1,491	2,419	2,949	
		1,674	1,678	1,680	1,681	1,681	1,681	1,68

Здесь необходимо дать пояснения. Так как рассматриваемый процесс является нестационарным, то вычисленные значения ЭКД в таблице 2 соответствуют начальному распределению концентраций всех компонентов, т.е. равновесной смеси  $0,5\text{H}_2 + 0,125\text{CH}_4 + 0,125\text{C}_2\text{H}_6 + 0,125\text{C}_3\text{H}_8 + 0,125\text{n-C}_4\text{H}_{10}$ .

Выделенные *курсивом* показатели степеней температурных зависимостей ЭКД компонентов определялись для каждой температуры, начиная, с 400 К, а в дальнейшем для практического использования приведены усредненные показатели температурных зависимостей всех пяти компонентов данной газовой системы. В наших публикациях, связанных с определением температурных зависимостей газов в многокомпо-

нентных смесях, неоднократно отмечалось, что влияние концентрации компонента весьма слабо отражается на показателе степени температурной зависимости компонента (см., например, [6]). Аналогичные исследования были проведены для второй системы. Полученные результаты отображены в таблице 3.

Пояснения результатов этой таблицы аналогичны пояснениям к таблице 2. Особо подчеркнем. При использовании ЭКД для вычислений диффузионных потоков в многокомпонентных газовых смесях необходимо помнить, для каких случаев диффузии получены выражения ЭКД (они, кстати, четко сформулированы в монографии [21]). Иначе можно сделать грубые ошибки.

**Таблица 3** – ЭКД и показатели степеней температурных зависимостей компонентов системы  $\text{Air}(1) - 0,20\text{H}_2(2) + 0,20\text{CH}_4(3) + 0,2\text{C}_2\text{H}_6(4) + 0,2\text{C}_3\text{H}_8(5) + 0,20\text{n-C}_4\text{H}_{10}(6)$  для начального распределения концентраций в интервале температур 298-900 К

Газы	Температура, К							
	ЭКД компонентов, $\text{см}^2/\text{с}$							
	<i>Показатели степеней температурной зависимости</i>							
	298	400	500	600	700	800	900	$\langle n \rangle$
Air	0,198	0,334	0,498	0,688	0,905	1,147	1,415	
		<i>1,781</i>	<i>1,782</i>	<i>1,765</i>	<i>1,768</i>	<i>1,769</i>	<i>1,770</i>	<i>1,773</i>
H <sub>2</sub>	0,643	1,081	1,601	2,206	2,894	3,660	4,502	
		<i>1,763</i>	<i>1,760</i>	<i>1,761</i>	<i>1,761</i>	<i>1,760</i>	<i>1,761</i>	<i>1,761</i>
CH <sub>4</sub>	0,160	0,270	0,393	0,539	0,704	0,888	1,089	
		<i>1,765</i>	<i>1,736</i>	<i>1,736</i>	<i>1,735</i>	<i>1,736</i>	<i>1,735</i>	<i>1,741</i>
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,093	0,160	0,241	0,337	0,447	0,572	0,710	
		<i>1,837</i>	<i>1,848</i>	<i>1,846</i>	<i>1,843</i>	<i>1,840</i>	<i>1,839</i>	<i>1,842</i>
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,064	0,108	0,166	0,232	0,309	0,396	0,493	
		<i>1,805</i>	<i>1,854</i>	<i>1,850</i>	<i>1,851</i>	<i>1,852</i>	<i>1,853</i>	<i>1,844</i>
n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,030	0,055	0,087	0,124	0,170	0,220	0,279	
		<i>2,034</i>	<i>2,053</i>	<i>2,028</i>	<i>2,031</i>	<i>2,018</i>	<i>2,018</i>	<i>2,030</i>

## Заключение

Таким образом, вычисленные ЭКД и показатели степеней температурных зависимостей газов в пятикомпонентной и шестикомпонентной системах, содержащих воздух, водород и некоторые углеводородные газы,

могут служить в качестве справочной информации в практических приложениях. Из проведенных исследований следует, что в сложных газовых смесях необходимо иметь сведения о поведении всех газов во время диффузии для корректной оценки их диффузионных способностей.

## Литература

1. 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.
2. Бычков А.Г., Жаврин Ю.И. Температурная зависимость эффективных коэффициентов диффузии некоторых смесей в изотермических и неізотермических условиях // НИИ ЭТФ Каз.ун-т. – Алма-Ата, 1993. – 10 с. Деп. В КазНИИКИ. 15.01.93. № 3985. Ка-93.
3. 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.
4. 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. – 2006, № 2 (22). – С. 73-79.
5. Zhavrin Yu.I., Kosov N.V., Poyarkov I.V., Asembaeva M.K., Fedorenko O.V., Nysanbaeva A.T. Temperature dependences of the effective diffusion coefficients of the component of three-component gas systems, used in the synthesis of ammonia // J. Eng. Phys. Therm. – 2013. – Vol. 86, No. 3. – P. 676-680.
6. Жаврин Ю.И., Косов В.Н., Асембаева М.К., Поярков И.В., Федоренко О.В. Влияние концентрации на температурные зависимости эффективных коэффициентов диффузии // Известия НАН РК, серия физ.-мат. – 2011. – № 3 (277). – С. 41-47.
7. Тирский Г.А. Вычисление эффективных коэффициентов диффузии в ламинарном диссоциированном многокомпонентном пограничном слое // ПММ. – 1969, Вып. 1. – С. 180-182.
8. Wilke C.R. Properties of multicomponent gases // Chem. Eng. Prog. – 1950. – Vol. 46. – P. 95-104.
9. Kaminskii V.A. Special modes of three-component diffusion in gases // Rus. J. Phys. Chem. A. – 2011. – Vol. 85, No. 12. – P. 2203-2208.
10. Zhavrin Y.I., Kosov N.D., Novosad Z.I. Effective diffusion coefficient methods for studying description of non-stationary diffusion in multicomponent gas mixtures // ZhFKh. – 1975. – Vol. 49, No. 3. – P. 706-709.
11. Lightfoot E.N. Transport phenomena and living systems: Biomedical aspects of momentum and mass transport. – London: John Wiley & Sons – Interscience, 1974. – 520 p.
12. 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.
13. Andrew S.P.S. A simple Method of Measuring Gaseous Diffusion Coefficient // Chem. Eng. Sci. – 1955. – Vol. 4. – P. 269-272.
14. 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.
15. Калинин Б.А., Лойко А.Э., Суетин П.Е. Эффективная длина капилляра в измерениях коэффициентов взаимной диффузии газов методом двух объемов // Диффузия в газах и жидкостях. – Алма-Ата, 1972. – С. 79-85.
16. Bretsznajder S. Wlasnosci Gazow I Cieczy. – Warsaw: Wydawnictwo Naukowo – Techniczne, 1962.
17. Богатырев А.Ф., Незовитина М.А. Температурная зависимость коэффициентов взаимной диффузии углеводородных газов // Актуальные вопросы исследований пластовых систем месторождений углеводородов: сб. науч. ст. – М: Газпром ВНИИГАЗ, 2014. – № 2 (18) – С. 55-58. – (Науч.-тех. сб. «Вести газовой науки»).
18. Bogatyrev A.F., Nezovitina M.A. The experimental study of temperature dependence of binary diffusion coefficients of gases at different pressures // Int. J. Therm. – 2013. – Vol. 34, No. 11. – P. 2065-2075.
19. Bogatyrev A.F., Nezovitina M.A. Interdiffusion coefficients of gaseous systems // J. Eng. Phys. Therm. – 2012. – Vol. 85, No. 5. – P. 1208-1214.
20. Seleznev V.D., Smirnov V.G. Diffusion of 3-component mixture of gases in 2-bulb system // ZhTekhFiz. – 1981. – Vol. 51, No. 4. – P. 795-800.
21. Bird R.B., Stewart W.E., Lightfoot E.N. Transport Phenomena. – New York: John Wiley & Sons, Inc., 2002. – 688 p.

## References

- 1 N.D. Kosov, Ju.I. Zhavrin and Z.I. Novosad, *Teplofizicheskie svoystva veshhestv i materialov*, (Moscow: Izd-vo standartov, 1982), pp. 86-112. (in Russ).
- 2 A.G. Bychkov and Ju.I. Zhavrin *Temperaturnaja zavisimost' jeffektivnykh koeficientov diffuzii nekotorykh smesey v izotermicheskikh i neizotermicheskikh usloviyah* (Alma-Ata: NII JeTF Kaz. un-t, 1993. Dep. V KazNIKI. 15.01.93. № 3985. Ка-93), 10 p. (in Russ).
- 3 Ju.I. Zhavrin, N.D. Kosov and Z.I. Novosad, *Diffuzija v gazah i zhidkostyah* (Alma-Ata: MV i SSO KazSSR, 1974), pp.12-19. (in Russ).
- 4 Ju.I. Zhavrin, V.Ju. Zhavrin, V.N. Kosov and I.V. Pojarkov, *Vestnik KazNU, ser. Fizicheskaja*, **2** (22), 73-79, (2006). (in Russ).
- 5 Ju.I. Zhavrin, V.N. Kosov, I.V. Pojarkov, O.V. Fedorenko and M.K. Asembaeva, *Vestnik KazNU, serija fizicheskaja*, **1** (36), 71-75, (2011). (in Russ).

- 6 Ju.I. Zhavrin, V.N. Kosov, M.K. Asembaeva, I.V. Pojarkov and O.V. Fedorenko, *Izvestija NAN RK, serija fiz.-mat.*, **3** (277), 41-47, (2011). (in Russ).
- 7 G.A. Tirskej, *PMM*, **1**, 180-182, (1969)
- 8 C.R. Wilke, *Chem. Eng. Prog.* **46**, 95-104, (1950).
- 9 V.A. Kaminskii, *Rus. J. Phys. Chem. A* **85**, 12, 2203-2208, (2011).
- 10 Y.I. Zhavrin, N.D. Kosov, Z.I. Novosad, *ZhFKh*. **49**, 3, 706-709, (1975).
- 11 E.N. Lightfoot *Transport phenomena and living systems: Biomedical aspects of momentum and mass transport* (London: John Wiley & Sons, Interscience, 1974), 520 p.
- 12 Z.I. Novosad and N.D. Kosov, *ZhTF* **40**, 11, 2368-2375, (1970). (in Russ).
- 13 S.P.S. Andrew, *Chem. Eng. Sci.* **4**, 269-272, (1955).
- 14 Ju.I. Zhavrin, N.D. Kosov, S.M. Belov, N.I. Semidockaja, *Teplomassoperenos v zhidkostjah i gazah*. (Alma-Ata, 1982), 3-12. (in Russ).
- 15 B.A. Kalinin, A.Je. Lojko, P.E. Suetin, *Diffuzija v gazah i zhidkostjah*, (Alma-Ata, 1972), 79-85. (in Russ).
- 16 S. Bretsznajder, *Wlasnosci Gazow I Cieczy*, (Warsaw: Wydawnictwo Naukowo – Techniczne, 1962).
- 17 A.F. Bogatyrev and M.A. Nezovitina, *Aktual'nye voprosy issledovanij plastovyh sistem mestorozhdenij uglevodorodov: sb. nauch. st.* (Moscow: Gazprom VNIIGAZ, 2014), **2**, 18, 55-58. (in Russ).
- 18 A.F. Bogatyrev and M.A. Nezovitina, *Int. J. Therm.* **34**, 11, 2065-2075, (2013).
- 19 A.F. Bogatyrev and M.A. Nezovitina, *J. Eng. Phys. Therm.* **85**, 5, 1208-1214, (2012).
- 20 V.D. Seleznev and V.G. Smirnov, *ZhTekhFiz.* **51**, 4, 795-800, (1981).
- 21 R.B. Bird, W.E. Stewart and E.N. Lightfoot, *Transport Phenomena* (New York: John Wiley & Sons, Inc., 2002), 688 p.