

УДК 533.735

## Термодиффузия в бинарных газовых системах $\text{CH}_4\text{-CO}_2$ и $\text{H}_2\text{-N}_2$ при различных значениях термодинамических параметров

В.Р. Белалов<sup>1\*</sup>, А.Ф. Богатырёв<sup>1</sup>, Е.Б. Григорьев<sup>2</sup>, О.А. Макеенкова<sup>1</sup>, А.Д. Козлов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Филиал ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске, Российская Федерация, 214013, г. Смоленск, Энергетический пр-д, д. 1

<sup>2</sup> ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Российская Федерация, 142717, Московская обл., Ленинский р-н, с.п. Развилковское, пос. Развилка, Проектируемый пр-д № 5537, вл. 15, стр. 1

<sup>3</sup> ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы», Российская Федерация, 119361, г. Москва, ул. Озерная, д. 46

\* E-mail: Tfs209@yandex.ru

**Тезисы.** При расчете тепломассообменных процессов в газовых смесях актуальна задача определения коэффициентов транспортных свойств газовых смесей при различных значениях термодинамических параметров. В статье экспериментально и расчетным путем исследуются термодиффузионные постоянные (ТДП) в двух газовых смесях  $\text{CH}_4\text{-CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{-N}_2$  в интервале давлений 0,1–15,0 МПа при температурах холодной области 260–310 К, горячей – 400–800 К.

В системе  $\text{CH}_4\text{-CO}_2$  зависимость ТДП от состава газовой смеси при всех температурах и давлениях является линейной. При этом с ростом давления наблюдается смена характера этой зависимости: при малых давлениях она растет с увеличением концентрации легкого компонента, а затем падает; с ростом давления зависимость меняет знак. ТДП системы газов  $\text{H}_2\text{-N}_2$  во всем исследуемом интервале температур и давлений остается постоянной, но растет при увеличении концентрации водорода.

В работе также выполнен расчет ТДП по ранее предложенной полуэмпирической формуле. Для обеих смесей газов расчет и эксперимент согласуются в пределах ошибки эксперимента.

Для расчета тепломассообменных процессов применительно к технологиям добычи, транспорта и переработки природного газа необходимо знать транспортные свойства природных газов [1–3]. Чтобы рассчитать молекулярный массоперенос, необходимы данные о диффузионных и термодиффузионных характеристиках в широком диапазоне термодинамических параметров [4–6]. Очень часто диффузия и термодиффузия оказывают слабое влияние на процесс тепломассообмена, однако при определенных термодинамических параметрах, например при некоторых фазовых превращениях и осаждении различных материалов из газовой фазы, указанные процессы могут стать возмущающим фактором [4, 7, 8].

Ранее авторами экспериментально изучено термодиффузионное разделение в ряде бинарных газовых систем различного состава, входящих в природные газы [9, 10]. Исследование проведено в интервале давлений 0,1–6 МПа при различных температурах холодной и горячей областей газовой смеси.

### Результаты эксперимента и теоретических расчетов

Далее предлагаются экспериментальные и теоретические результаты исследования зависимости термодиффузионных характеристик двух пар газов, а именно  $\text{CH}_4\text{-CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{-N}_2$ , от состава газовой смеси, температуры и давления (табл. 1).

Обычно для описания массопереноса в неизотермических условиях используют так называемую термодиффузионную постоянную (ТДП)  $\alpha_{T_{ij}}$ , которая, как показывает

### Ключевые слова:

термодиффузионная постоянная, газ, бинарная смесь, давление, эксперимент, расчет.

Таблица 1

Результаты исследования термодиффузии в бинарных системах  $\text{CH}_4\text{-CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{-N}_2$ 

Система газов	Интервал давлений $p$ , МПа	Температура области газа, К		Интервал объемных долей легкого компонента	Число экспериментальных точек	Интервал отклонения экспериментальных данных от расчетных
		холодной ( $T_1$ )	горячей ( $T_2$ )			
$\text{CH}_4\text{-CO}_2$	0,1–6,0	280, 300, 310	400, 450, 500, 800	0,140–0,900	96	0–3,4
$\text{H}_2\text{-N}_2$	0,1–15,0	260, 300	400, 500	0,135–0,870	78	0–2,7

Таблица 2

Термодиффузионное разделение  $\Delta c_i$  и термодиффузионная постоянная  $\bar{\alpha}_{T_{ij}}$  газовой системы  $\text{CH}_4\text{-CO}_2$  при различных концентрациях, температурах холодной области и давлениях

Объемная доля легкого компонента	$\Delta c_i \cdot 10^2$			отклонение расчета от эксперимента, %	Результаты измерений $\bar{\alpha}_{T_{ij}}$
	эксперимент	расчет по формуле (4)			
$p = 0,1 \text{ МПа}, T_1 = 280 \text{ К}, T_2 = 500 \text{ К}$					
0,140	0,60	0,61	+1,6	0,099	
0,300	1,27	1,25	-1,6	0,104	
0,460	1,53	1,54	+1,3	0,106	
0,590	1,57	1,56	-0,6	0,112	
0,740	1,32	1,30	-1,5	0,118	
0,900	0,64	0,63	-1,6	0,121	
$p = 0,3 \text{ МПа}, T_1 = 280 \text{ К}, T_2 = 500 \text{ К}$					
0,140	1,10	1,08	-1,8	0,158	
0,300	1,82	1,84	+1,1	0,149	
0,460	2,10	2,13	+1,4	0,145	
0,590	2,02	2,03	+0,5	0,144	
0,740	1,57	1,59	+1,3	0,142	
0,900	0,72	0,73	+1,4	0,138	
$p = 0,3 \text{ МПа}, T_1 = 300 \text{ К}, T_2 = 500 \text{ К}$					
0,140	0,89	0,87	-2,2	0,144	
0,300	1,52	1,50	-1,3	0,142	
0,460	1,74	1,76	+1,1	0,140	
0,590	1,71	1,70	-0,6	0,138	
0,740	1,35	1,34	-0,7	0,137	
0,900	0,62	0,62	0,0	0,135	

опыт, более слабо зависит от температуры и состава разреженной смеси, чем термодиффузионное отношение  $k_T$ :

$$\alpha_{T_{12}} = \frac{D_{12}^T}{D_{12}c_1c_2} = \frac{k_T}{c_1c_2}, \quad (1)$$

где  $D_{12}^T$  – бинарный коэффициент термодиффузии;  $D_{12}$  – коэффициент взаимной диффузии;  $c_1$  и  $c_2$  – объемные доли соответственно компонентов 1 и 2 исходной газовой смеси.

Экспериментально значение ТДП вычисляется [7] по формуле

$$\bar{\alpha}_{T_{ij}} = \frac{\ln q_{ij}}{\ln(T_2/T_1)}, \quad (2)$$

где  $q_{ij} = (c_i/c_j)^{T_1} / (c_i/c_j)^{T_2}$  – коэффициент разделения;  $(c_i/c_j)^{T_1}$  и  $(c_i/c_j)^{T_2}$  – отношения объемных долей компонентов в соответствующих областях газа.

Обычно ТДП находят с помощью так называемого двухколбового аппарата, который представляет собой две колбы объемами  $V_1$  и  $V_2$ , соединенные между собой трубкой, температуры которых  $T_1$  и  $T_2$  поддерживаются постоянными. Как было показано [11–14], при определенных значениях геометрического параметра  $f = (V_1T_2)/(V_2T_1)$ , а именно при  $f = 1$ , значение  $\bar{\alpha}_{T_{ij}}$  можно вычислить через термодиффузионное разделение:

$$\bar{\alpha}_{T_{ij}} = \frac{\frac{\Delta c_i}{c_i} - \frac{\Delta c_j}{c_j}}{\ln \frac{T_2}{T_1}} = \frac{\Delta c_{ij}}{c_i c_j \ln \frac{T_2}{T_1}}, \quad (3)$$

где  $\Delta c_{ij} = |\Delta c_i^{T_1}| = |\Delta c_j^{T_2}|$  – термодиффузионное разделение в бинарной смеси газов;  $c_i$  и  $c_j$  – объемные доли компонентов  $i$  и  $j$  в первоначальной смеси газов (до разделения). Значение термодиффузионного разделения  $\Delta c_i^{T_1}$  (т.е. при температуре  $T_1$ ) берется со знаком «плюс», а значение  $\Delta c_j^{T_2}$  – со знаком «минус».

Измерительная установка позволяла за счет изменения балластных емкостей поддерживать геометрический фактор  $f$  в пределах 0,5–1,0 [15]. Такое значение  $f$  дает основание полагать, что полное разделение  $\Delta c_{ij}$  не зависит от геометрии установки в пределах погрешности эксперимента, и позволяет рассчитывать  $\bar{\alpha}_{T_{ij}}$  по формуле (3), используя результаты измерений  $\Delta c_{ij}$  [9, 10–13].

На основе ранее проведенных исследований в рамках элементарной кинетической теории предложена полуэмпирическая формула для расчета термодиффузионного разделения [9, 10, 16, 17]:

$$\Delta c_1 = \frac{\Delta c_1^{T_1} V_1 T_2 Z^{T_1} + \Delta c_1^{T_2} V_2 T_1 Z^{T_2}}{V_1 T_2 Z^{T_1} + V_2 T_1 Z^{T_2}};$$

$$\Delta c_1^{T_i} = \left(1 - \frac{a}{2}\right) c_1^{T_i} c_2^{T_i} \times$$

$$\times \frac{\sqrt{m_2 Z_1^{T_i}} - \sqrt{m_1 Z_2^{T_i}}}{c_1^{T_i} \sqrt{m_1 Z_2^{T_i}} + c_2^{T_i} \sqrt{m_2 Z_1^{T_i}}} \ln \frac{T_2 Z^{T_2}}{T_1 Z^{T_1}};$$

$$Z^{T_i} = \frac{Z_1^{T_i} Z_2^{T_i}}{Z_1^{T_i} c_2^{T_i} + Z_2^{T_i} c_1^{T_i}}, \quad (4)$$

где  $Z_1^{T_i}$  и  $Z_2^{T_i}$  – сжимаемости чистых компонентов газовой смеси при соответствующих температуре и давлении;  $c_1^{T_i}$  и  $c_2^{T_i}$  – объемные доли 1-го и 2-го компонентов смеси при соответствующих температуре и давлении;  $m_1$  и  $m_2$  – массы молекул газов – компонентов смеси;  $a$  – эмпирическая константа, определяемая исходя из экспериментов в разреженных газах [10, 12, 16].

В табл. 2 и на рис. 1 и 2 приведена часть результатов экспериментальных исследований термодиффузии в бинарной системе газов  $\text{CH}_4\text{--CO}_2$  в зависимости от состава, давления и температур холодной и горячей областей газовых смесей. Видно, что при  $p = 0,1$  МПа экспериментальные значения  $\bar{\alpha}_{T_{ij}}$  при различных  $T_1$  и  $T_2$  для соответствующих смесей газов

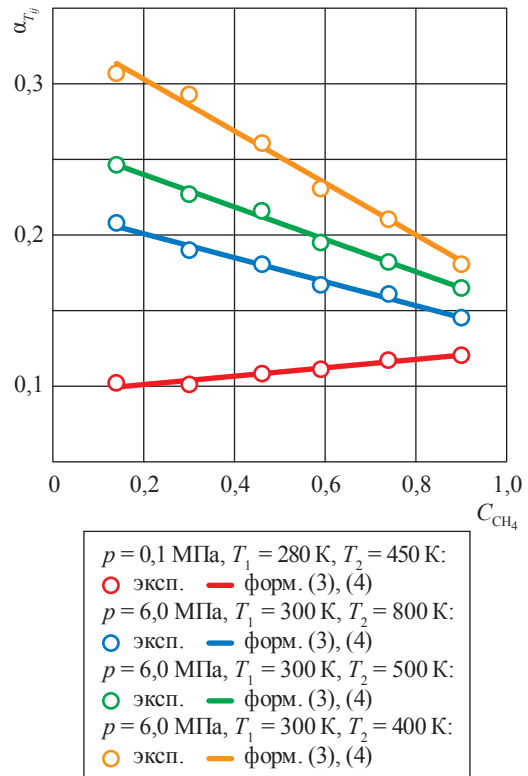


Рис. 1. Зависимость ТДП системы  $\text{CH}_4\text{--CO}_2$  от состава газовой смеси при различных давлениях и температурах

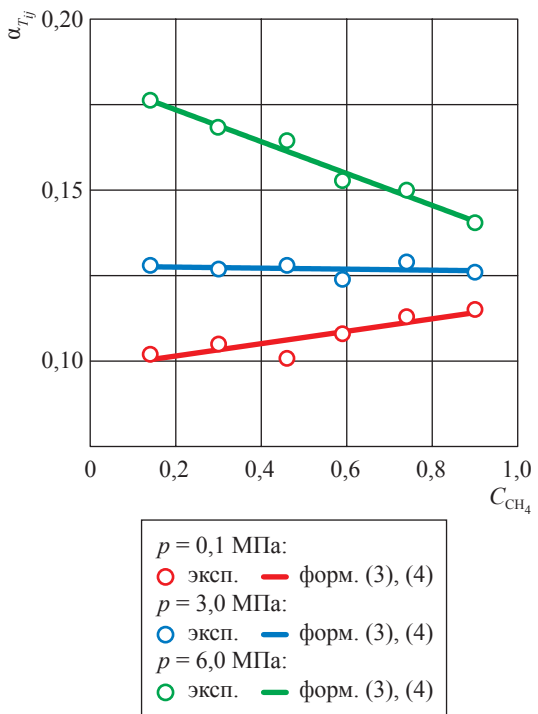


Рис. 2. Зависимость ТДП системы  $\text{CH}_4\text{--CO}_2$  от состава газовой смеси при  $T_1 = 310$  К,  $T_2 = 800$  К и различных давлениях

Таблица 3

**Средние экспериментальные и расчетные значения ТДП системы  $H_2-N_2$  в интервалах температур холодной области 260–300 К, горячей области 400–500 К и давлений 0,1–15,0 МПа**

$\alpha_{T_y} \cdot 10^3$	Объемная доля $H_2$					
	0,135	0,290	0,445	0,580	0,755	0,870
Эксперимент	$227 \pm 4$	$244 \pm 3$	$264 \pm 3$	$289 \pm 5$	$339 \pm 4$	$393 \pm 2$
Расчет	$225 \pm 3$	$240 \pm 3$	$261 \pm 2$	$290 \pm 2$	$340 \pm 3$	$393 \pm 3$

системы  $CH_4-CO_2$  совпадают в пределах экспериментальной ошибки 2–3 %. Аналогичное согласие наблюдается и при других давлениях (3,0; 6,0 МПа) и температурах ( $T_1 = 280-310$  К и  $T_2 = 400-800$  К). При  $p = 0,1$  МПа  $\bar{\alpha}_{T_y}$  увеличивается с ростом концентрации легкого компонента. С увеличением давления знак зависимости ТДП от концентрации легкого компонента изменяется на противоположный, т.е.  $\bar{\alpha}_{T_y}$  убывает с ростом концентрации легкого компонента. Также при фиксированном значении  $c_i$  в случае снижения  $T_1$  и  $T_2$  величина  $\bar{\alpha}_{T_y}$  возрастает с ростом давления.

Следует отметить, что зависимость  $\bar{\alpha}_{T_y}$  от концентрации легкого компонента носит линейный характер вне зависимости от значений параметров  $T_1$ ,  $T_2$  и  $p$  в исследуемом интервале температур и давлений. Аналогичная зависимость от температуры и давления также наблюдается в системах  $N_2-CO_2$ ,  $CO-CO_2$  и  $CH_4-nC_4H_{10}$  [10, 17].

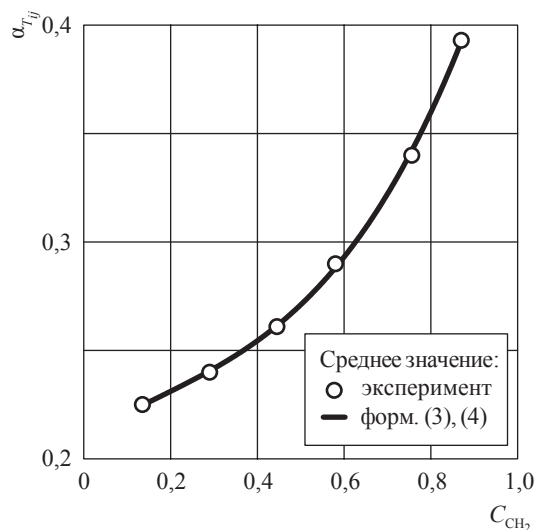
Авторами также проведено экспериментальное исследование шести бинарных смесей  $H_2-N_2$  при  $T_1 = 300$  К и  $T_2 = 400$  К в интер-

вале давлений 0,1–12,5 МПа и  $T_2 = 500$  К в интервале давлений 0,1–15,0 МПа. Кроме того, исследовано термодиффузионное разделение при  $T_1 = 260$  К и  $T_2 = 600$  К и давлениях 0,1 и 6,0 МПа. Как оказалось, для этой системы газов при указанных температурах и давлениях для всех исследованных концентраций  $\bar{\alpha}_{T_y}$  не зависит от значений  $p$ ,  $T_1$  и  $T_2$ . На рис. 3 и в табл. 3 представлены экспериментальные средние значения  $\bar{\alpha}_{T_y}$  при шести вариантах концентрации легкого компонента для 13 измерений, выполненных при различных температурах и давлениях. На рис. 3 также представлен расчет ТДП по формулам (3) и (4) при этих же температурах и давлениях.

Как видно, средние экспериментальные и расчетные значения ТДП неплохо согласуются в пределах погрешности эксперимента и расчета.

\*\*\*

Таким образом, рис. 1–3 и табл. 2, 3 свидетельствуют, что ТДП для различных пар газов по-разному зависит от давления и температуры.



**Рис. 3. Зависимость средней величины ТДП системы  $H_2-N_2$  от объемной доли  $H_2$  при различных давлениях и температурах**

### Список литературы

1. Сургучев М.Л. Физико-химические процессы в нефтегазовых пластах / М.Л. Сургучев. – М.: Недра, 1984. – 217 с.
2. Кузнецов М.А. Состояние теплофизических исследований пластовых систем / М.А. Кузнецов, П.О. Овсянников, Е.Б. Григорьев // Актуальные вопросы исследования пластовых систем месторождений углеводородов: сб. в 2 ч. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2011. – Ч. 2. – С. 69–81. – (Вести газовой науки).
3. Николаев В.А. Физические основы разработки месторождений углеводородов / В.А. Николаев. – Ижевск: ИКИ, 2013. – 312 с.
4. Григорьев Б.А. Теплофизические свойства и фазовые равновесия газовых конденсатов и их фракций / Б.А. Григорьев, А.А. Герасимов, Г.А. Ланчаков. – М.: Изд. дом МЭИ, 2007. – 344 с.

5. Михайлов Н.Н. Остаточное нефтенасыщение разрабатываемых пластов / Н.Н. Михайлов. – М.: Недра, 1992. – 270 с.
6. Доценко В.В. Геохимия газа. Происхождение нефти и газа / В.В. Доценко. – Ростов н/Д.: Ростовский университет, 2001. – 39 с.
7. Шашков А.Г. Фактор термодиффузии газовых смесей / А.Г. Шашков, А.Ф. Золотухина, В.Б. Василенко. – Минск: Белорусская наука, 2007. – 239 с.
8. Шеберстов Е.В. Особенности массопереноса в коллекторах сланцевого газа и задачи математического моделирования / Е.В. Шеберстов // Вести газовой науки: Актуальные вопросы исследования пластовых систем месторождений углеводородов. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2015. – № 4 (24). – С. 52–59.
9. Белалов В.Р. Зависимость термодиффузионного разделения некоторых природных бинарных смесей газов от давления / В.Р. Белалов, А.Ф. Богатырёв // Вести газовой науки: Актуальные вопросы исследования пластовых систем месторождений углеводородов. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2012. – № 3 (11). – С. 255–264.
10. Богатырёв А.Ф. Термодиффузия в бинарных смесях умеренно-плотных газов / А.Ф. Богатырёв, В.Р. Белалов, М.А. Незовитина // Инженерно-физический журнал. – 2013. – Т. 86. – № 5. – С. 1148–1154.
11. Bogatyrev A.F. Experimental study of thermal diffusion in multicomponent gaseous systems / A.F. Bogatyrev, O.A. Makeenkova, M.A. Nezovitina // International Journal of Thermophysics. – 2015. – V. 36. – № 4. – P. 633–647.
12. Богатырёв А.Ф. Термодиффузия в разреженных трехкомпонентных газовых системах / А.Ф. Богатырёв, Е.Б. Григорьев, О.А. Макеенкова // Вести газовой науки: Актуальные вопросы исследований месторождений углеводородов. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2016. – № 4 (28). – С. 50–55.
13. Белалов В.Р. Особенности термодиффузионного разделения в умеренно-плотных бинарных газовых системах / В.Р. Белалов, А.Д. Козлов // Естественные и технические науки. – 2015. – № 10 (88). – С. 101–104.
14. Bogatyrev A.F. Effect of thermodiffusive separation of components on heat transfer in multicomponent gas mixtures / A.F. Bogatyrev, Y.I. Zhavrin, N.D. Kosov et al. // Heat Transfer. Sov. Res. – 1978. – V. 10. – № 2. – P. 38–42.
15. Богатырёв А.Ф. Термодиффузионное разделение в плотных трехкомпонентных газовых системах / А.Ф. Богатырёв, М.А. Незовитина // Научное обозрение. – 2012. – № 2. – С. 123–128.
16. Богатырёв А.Ф. Методика расчета характеристик молекулярного массопереноса в неизотермических условиях в умеренно-плотных газовых системах / А.Ф. Богатырёв, В.Р. Белалов // Изв. высш. учебн. зав. Проблемы энергетики. – 2011. – № 3–4. – С. 49–52.
17. Белалов В.Р. Термодиффузия в смеси  $\text{CH}_4$ – $n\text{C}_4\text{H}_{10}$  при различных концентрациях, давлениях и температурах / В.Р. Белалов, А.Ф. Богатырёв, О.А. Макеенкова // Энергетика, информатика, инновации – 2016: сб. тр. VI Международной научно-технической конференции. – 2016. – Т. 1. – С. 76–78.

## Thermal diffusion in binary gas systems $\text{CH}_4$ – $\text{CO}_2$ and $\text{H}_2$ – $\text{N}_2$ at different values of thermodynamic parameters

V.R. Belalov<sup>1\*</sup>, A.F. Bogatyrev<sup>1</sup>, E.B. Grigoryev<sup>2</sup>, O.A. Makeenkova<sup>1</sup>, A.D. Kozlov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Smolensk Branch of National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Bld. 1, Energeticheskiy proyezd, Smolensk, 1 214013, Russian Federation

<sup>2</sup> Gazprom VNIIGAZ LLC, Bld. 1, Est. 15, Projektiruemyy proezd # 5537, Razvilka village, Leninskiy district, Moscow Region, 142717, Russian Federation

<sup>3</sup> VNIIMS, Bld. 46, Ozernaya Str., Moscow, 119361, Russian Federation

\* E-mail: Tfs209@yandex.ru

**Abstract.** Knowledge of the transport properties' coefficients of gaseous mixtures at different values of thermodynamic parameters is an actual problem as applied to calculation of heat and mass transfer processes in gas mixtures. This paper experimentally and theoretically investigates thermal diffusion factors (TDFs) in two gas mixtures:  $\text{CH}_4$ – $\text{CO}_2$  and  $\text{H}_2$ – $\text{N}_2$  at cold area temperature of 260–310 K, and hot area temperature of 400–800 K in the pressure range of 0.1–15.0 MPa.

Dependence between  $\text{CH}_4$ – $\text{CO}_2$  system TDF and a gas-mixture composition at all temperatures and pressures is linear. At the same time while the pressure increases the change in TDF/composition dependence is observed.

For small pressure values it increases with increasing of light component concentration, and then falls. With increasing pressure the sign of dependence changes.

TDF of  $H_2-N_2$  mixtures within all investigated temperature and pressure ranges remains constant, and its value increases with increasing of hydrogen concentration. The paper also shows TDF calculation made using a previously proposed semi-empirical formula. For both gas mixtures calculation results coincide with experiment within the respective limits of experimental error.

**Keywords:** thermal diffusion factor, gases, binary mixtures, pressure, experiment, calculation.

## References

1. SURGUCHEV, M.L. *Physical-and-chemical processes in oil-gas strata* [Fiziko-khimicheskiye processy v neftegazovykh plastakh]. Moscow: Nedra, 1984. (Russ.).
2. KUZNETSOV, M.A., P.O. OVSYANNIKOV and Ye.B. GRIGORYEV. State of thermal physic studies of reservoir systems [Sostoyaniye teplofizicheskikh issledovaniy plastovykh sistem]. In: *Vesti gazovoy nauki*. Actual issues of hydrocarbon-field reservoir systems research [Aktualnyye voprosy issledovaniya plastovykh sistem mestorozhdeniy uglevodorodov] collected papers in 2 pts.: Moscow: Gazprom VNIIGAZ, 2011, pt. 2, pp. 69–81. (Russ.).
3. NIKOLAYEV, V.A. *Physical principals of hydrocarbon fields' development* [Fizicheskiye osnovy razrabotki mestorozhdeniy uglevodorodov]. Izhevsk: "IKI" Publishers, 2013. (Russ.).
4. GRIGORYEV, B.A., A.A. GERASIMOV and G.A. LANCHAKOV. *Thermal-physic properties and phase equilibria of gas condensates and their fractions* [Teplofizicheskiye svoystva i fazovyye ravnovesiya gazovykh kondensatov i ikh fraktsiy]. Moscow: MPEI Publishers, 2007. (Russ.).
5. MIKHAYLOV, N.N. *Residual oil-and-gas saturation of strata being developed* [Ostatochnoye nasyshcheniye razrabatyvayemykh plastov]. Moscow: Nedra, 1992. (Russ.).
6. DOTSENKO, V.V. *Gas geochemistry. Origin of petroleum and gas* [Geokhimiya gaza. Proiskhozhdeniye nefiti i gaza]. Rostov-na-Donu: Rostov State University, 2001. (Russ.).
7. SHASHKOV, A.G., A.F. ZOLOTUKHINA and V.B. VASILENKO. *Factor of thermal diffusion in gas mixtures* [Faktor termodiffuzii gazovykh smesey]. Minsk: Belorusskaya nauka, 2007. (Russ.).
8. SHEBERSTOV, Ye.V. Features of mass transfer in collectors of shale gas and problems of mathematical modelling [Osobennosti massoperenosa v kollektorakh slantseвого gaza i zadachi matematicheskogo modelirovaniya]. *Vesti gazovoy nauki*: Actual issues in research of stratal hydrocarbon systems. Moscow: Gazprom VNIIGAZ, 2015, no. 4(24), pp. 52–59. ISSN 2306-8949. (Russ.).
9. BELALOV, V.R. and A.F. BOGATYREV. Correlation between pressure and thermal diffusion in some natural binary mixtures [Zavisimost termodiffuzionnogo razdeleniya nekotorykh prirodnykh binarnykh smesey ot davleniya]. *Vesti gazovoy nauki*: Actual issues in research of stratal hydrocarbon systems. Moscow: Gazprom VNIIGAZ, 2012, no. 3(11), pp. 255–264. ISSN 2306-8949. (Russ.).
10. BOGATYREV, A.F., V.R. BELALOV and M.A. NEZOVITINA. Thermal diffusion in binary mixtures of mildly solid gases [Termodiffuziya v binarnykh smesyakh umerenno plotnykh gazov]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*. 2013, vol. 86, no. 5, pp. 1148–1154. ISSN 0021-0285. (Russ.).
11. BOGATYREV, A.F., O.A. MAKEENKOVA and M.A. NEZOVITINA. Experimental study of thermal diffusion in multicomponent gaseous systems. *International Journal of Thermophysics*. 2015, vol. 36, no. 4, pp. 633–647. ISSN 0195-928X.
12. BOGATYREV, A.F., Ye.B. GRIGORYEV and O.A. MAKEENKOVA. Thermal diffusion in rarefied ternary gas systems [Termodiffuziya v razrezhennykh trekhkomponentnykh gazovykh sistemakh]. *Vesti gazovoy nauki*: Actual issues in research of bedded hydrocarbon systems. Moscow: Gazprom VNIIGAZ, 2016, no. 4(28), pp. 50–55. ISSN 2306-8949. (Russ.).
13. BELALOV, V.R. and A.D. KOZLOV. Peculiarities of thermal-diffusion separation in mildly solid binary gaseous systems [Osobennosti termodiffuzionnogo razdeleniya v umerenno-plotnykh binarnykh gazovykh sistemakh]. *Yestestvennyye i tekhnicheskiye nauki*. 2015, no. 10(88), pp. 101–104. ISSN 1684-2626. (Russ.).
14. BOGATYREV, A.F., Y.I. ZHAVRIN, N.D. KOSOV et al. Effect of thermodiffusive separation of components on heat transfer in multicomponent gas mixtures. *Heat Transfer. Sov. Res.* 1978, vol. 10, no. 2, pp. 38–42.
15. BOGATYREV, A.F. and M.A. NEZOVITINA. Thermal-diffusion separation in solid ternary gaseous systems [Termodiffuzionnoye razdeleniye v plotnykh trekhkomponentnykh gazovykh sistemakh]. *Nauchnoye obozreniye*. 2012, no. 2, pp. 123–128. ISSN 1815-4972. (Russ.).
16. BOGATYREV, A.F. and V.R. BELALOV. Procedure for calculating molecular mass transfer parameters in non-isothermal conditions of mildly solid gaseous systems [Metodika rascheta kharakteristik molekulyarnogo massoperenosa v neizotermicheskikh usloviyakh v umerenno-plotnykh gasovykh sistemakh]. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki*. 2011, no. 3–4, pp. 49–52. ISSN 1998-9903. (Russ.).
17. BELALOV, V.R., A.F. BOGATYREV and O.A. MAKEENKOVA. Thermal diffusion in a  $CH_4-nC_4H_{10}$  mixture at different concentrations, pressures and temperatures [Termodiffuziya v smesi  $CH_4-nC_4H_{10}$  pri razlichnykh kontsentratsiyakh, davleniyakh i temperaturakh]. In: *Energetika, informatika, innovatsii*: proc. of international conf. 2016, no. VI, vol. 1, pp. 76–78. (Russ.).