

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.132.25>**ТЕРМОДИФфуЗИЯ В РАЗРЕЖЕННЫХ ТРЕХКОМПОНЕНТНЫХ ГАЗОВЫХ СИСТЕМАХ, СОДЕРЖАЩИХ****N₂, NE, AR И CO₂**

Научная статья

Макеенкова О.А.^{1,*}, Белалов В.Р.²¹ORCID : 0000-0001-6955-2944;²ORCID : 0009-0009-7762-056X;¹Смоленский государственный университет, Смоленск, Российская Федерация²Национальный исследовательский университет «МЭИ», Смоленск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (makeenkova.o.a[at]yandex.ru)

Аннотация

Работа посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию термодиффузии в трехкомпонентных газовых системах N₂ – Ar – CO₂ и Ne – Ar – CO₂. Измерения проведены с помощью модифицированного двухколбового аппарата при температурах холодной и горячей области газовой смеси T₁ = 280 К, T₂ = 800 К, соответственно, давлении P = 0,1 МПа и различных составах смеси. Полученные величины разделения и термодиффузионные постоянные сопоставлены с расчетами по ранее предложенной формуле, позволяющей определять значения термодиффузионных характеристик трехкомпонентных систем через параметры бинарных смесей газов. Сравнение показывает неплохое согласие между экспериментом и расчетом в исследованном диапазоне термодинамических параметров.

Ключевые слова: термодиффузия, трехкомпонентные газовые смеси, эксперимент, метод расчета.**THERMODIFFUSION IN A DILUTE THREE-COMPONENT GAS SYSTEM CONTAINING N₂, NE, AR AND CO₂**

Research article

Makeenkova O.A.^{1,*}, Belalov V.R.²¹ORCID : 0000-0001-6955-2944;²ORCID : 0009-0009-7762-056X;¹Smolensk State University, Smolensk, Russian Federation²National Research University MPEI, Smolensk, Russian Federation

* Corresponding author (makeenkova.o.a[at]yandex.ru)

Abstract

The work is dedicated to experimental and theoretical studies of thermodiffusion in three-component gas systems N₂ – Ar – CO₂ and Ne – Ar – CO₂. The measurements were carried out using a modified two-barrel apparatus at temperatures T₁ = 280 K and T₂ = 800 K, respectively, pressure P = 0.1 MPa and different mixture compositions. The obtained separation values and thermodiffusion constants were compared with the calculations by the previously proposed formula, allowing to determine the values of thermodiffusion characteristics of three-component systems through the parameters of binary gas mixtures. The comparison shows good agreement between experiment and calculation in the investigated range of thermodynamic parameters.

Keywords: thermodiffusion, three-component gas mixtures, experiment, calculation method.**Введение**

Во многих технологических процессах в качестве рабочего тела выступают смеси газов, находящиеся при давлениях, близких к атмосферному. Поэтому при их рассмотрении требуется учет явлений переноса массы и тепла таких как диффузия и термодиффузия [1], [2], [3]. Сущность явления термодиффузии состоит в том, что при наложении градиента температуры на первоначально однородную газовую смесь происходит частичное разделение ее на компоненты. При этом легким газом обогащается область с более высокой температурой, более тяжелым газом – холодная область.

Анализ научных публикаций, посвященных вопросам термодиффузии в газах, показывает наличие достаточно обширных исследований данного явления в бинарных смесях газов [2], [4], [6], [7]. Особый интерес представляют смеси трех и более газов в силу того, что для них отсутствует строгая теория, позволяющая с высокой точностью рассчитать их термодиффузионные характеристики. Это связано с тем, что если для бинарных систем удается найти согласие между теорией и экспериментом [8], [9], [10], то для многокомпонентных такое согласие наблюдается лишь для отдельных смесей [11], [12], [13], [14]. При вычислениях по строгой кинетической теории отклонение расчета от эксперимента достигает 50%, по элементарной – 100% [12], [14], [15], [17].

В силу сложности экспериментальных исследований число работ, посвященных термодиффузии в многокомпонентных газовых системах, невелико. В этой связи расширение объема экспериментальных данных по термодиффузии в разреженных трехкомпонентных газовых системах, в том числе, ранее не исследованных, является актуальной задачей.

Методы и принципы исследования

В данной работе проведен эксперимент по определению термодиффузионных характеристик газовых смесей с помощью модифицированного двухколбового аппарата [18], [19]. Это трубка с изотермическими областями на ее концах с присоединенными к ним замкнутыми контурами, по которым циркулирует газовая смесь. Для обеспечения циркуляции газа по контурам в схему включен термогравитационный насос. Собственно колбами аппарата являются изотермические области и замкнутые контуры. Анализ смеси до и после разделения проводился совместно двумя методами: весовым и интерферометрическим, что позволяло определить состав смеси и рассчитать разделение всех трех компонентов. В работе использовался интерферометр типа Рэлея – ИТР-1 со специально изготовленной металлической кюветой длиной 1,2 м. Взвешивание баллончиков с газовой смесью осуществлялось на весах фирмы Меттлер, давление в установке контролировалось манометром бюро поверок.

В работах [16], [17], [19], [22] нами был приведен и апробирован для ряда газовых систем метод расчета термодиффузионного разделения, Δx_i , в многокомпонентных системах, основанный на соотношении, полученном Вальдманом [7]. Формула имеет вид:

$$\Delta x_i = x_i^2 \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n \Delta x_{ij} / x_{ij}^2 \quad (1)$$

где Δx_{ij} – величина термодиффузионного разделения i -го компонента в бинарной газовой смеси, определяемая соотношением:

$$\Delta x_{ij} = \left(1 - \frac{a_{ij}}{2}\right) \frac{(\sqrt{m_j} - \sqrt{m_i})}{x_{ij}\sqrt{m_i} + x_{ji}\sqrt{m_j}} x_{ij}x_{ji} \ln \frac{T_2}{T_1} \quad (2)$$

где x_i , x_j – объемная доля i -го и j -го компонента в трехкомпонентной газовой смеси; x_{ij} , x_{ji} – объемные доли i -го и j -го компонента в соответствующей бинарной смеси газов; m_i , m_j – масса молекул сорта i и j , кг; $a_{ij} = A_{ij}x_{ij} + B_{ij}$ – эмпирический коэффициент [23].

Соотношение (1) действительно если температура, при которой вычисляется Δx_i , равна температуре холодной и горячей областей при нахождении Δx_{ij} . Вторым условием является равенство отношений концентраций i -го и j -го компонентов в бинарной и многокомпонентной смесях $(x_{ij}/x_{ji})_{\text{бин}} = (x_i/x_j)_{\text{мн}}$

Используя полученные в ходе эксперимента значения термодиффузионного разделения многокомпонентной смеси Δx_i , определим термодиффузионные постоянные α_{Tij}^{TP} по следующей формуле [16], [17], [20]:

$$\alpha_{Tij}^{\text{TP}} = \left(\frac{\Delta x_i}{x_i} - \frac{\Delta x_j}{x_j}\right) / \ln \frac{T_2}{T_1} \quad (3)$$

Величины Δx_i и Δx_j в формуле (3) имеют знак плюс, если данным компонентом обогащается горячая область, и минус, если холодная.

Теоретическое определение термодиффузионной постоянной трехкомпонентных газовых систем возможно при использовании формулы, предложенной и апробированной нами в работах [24], [25]:

$$\alpha_{Tij}^{\text{TP}} = \alpha_{Tij}^{\text{бин}} + x_k \left(\alpha_{Tik} - \alpha_{\tau jk} - \alpha_{Tij}\right) \quad (4)$$

$$i, j, k = 1, 2, 3, i \neq j \neq k, \alpha_{Tii} = 0, \alpha_{Tij} = -\alpha_{\tau ji}.$$

Термодиффузионные постоянные бинарных смесей газов можно вычислить или получить экспериментально. При этом необходимыми условиями при нахождении термодиффузионных постоянных бинарных смесей, участвующих в формуле (4), являются равенство температур горячей и холодной областей в трехкомпонентной и бинарных смесях, а также отсутствие тройных столкновений молекул. В данной работе мы рассчитывали значения $\alpha_{Tij}^{\text{бин}}$ по формуле (2) с учетом безразмерных эмпирических коэффициентов A_{ij} и B_{ij} (см. табл. 1).

Основные результаты

В настоящей работе исследованы разреженные трехкомпонентные газовые системы $N_2 - Ar - CO_2$ и $Ne - Ar - CO_2$. Проведен эксперимент по определению величин термодиффузионного разделения Δx_i (см. рис. 1, табл. 2) и термодиффузионной постоянной α_{Tij}^{TP} (см. рис. 2 – 4) в зависимости от изменения содержания одного из компонентов x (доб). Измерения проводились при давлении $P = 0,1$ МПа, температурах холодной и горячей областей газовой смеси $T_1 = 280$ К, $T_2 = 800$ К соответственно.

Таблица 1 - Эмпирические коэффициенты A_{ij} и B_{ij} для бинарных систем, включающих N_2 , Ne , Ar , и CO_2

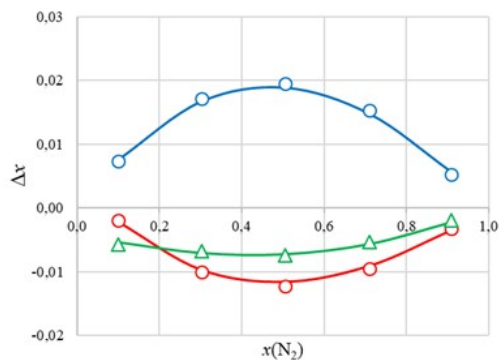
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.132.25.1>

Газовая система	A_{ij}	B_{ij}
Ar-CO ₂	0,29±0,11	1,09±0,06
Ne-Ar	-0,25±0,11	1,11±0,05
Ne-CO ₂	-0,44±0,06	1,05±0,05

N ₂ -Ar	0,57±0,09	0,81±0,05
N ₂ -CO ₂	-0,030±0,004	1,471±0,025

Таблица 2 - Экспериментальные и расчетные значения термодиффузионного разделения в системе N₂ – Ar – CO₂DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.132.25.2>

x (доб)	Эксперимент			Расчет			Отклонение эксперимента от расчета, %		
	$\Delta x(N_2)$	$\Delta x(Ar)$	$\Delta x(CO_2)$	$\Delta x(N_2)$	$\Delta x(Ar)$	$\Delta x(CO_2)$	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3
$x(N_2)/x(CO_2)=1,005, T_1 = 280 \text{ K}, T_2 = 800 \text{ K}$									
0,105	0,0164	-0,0025	-0,014	0,0162	-0,0024	-0,0139	1,22	4,00	0,71
0,310	0,0162	-0,0069	-0,0093	0,0165	-0,0068	-0,0097	1,85	1,45	4,30
0,507	0,0149	-0,0088	-0,0061	0,0152	-0,0090	-0,0062	2,01	2,27	1,64
0,708	0,0116	-0,0084	-0,0032	0,0113	-0,0082	-0,0032	2,59	2,38	0,00
0,908	0,0045	-0,0036	-0,0009	0,0043	-0,0035	-0,0008	4,44	2,78	11,11
$x(Ar)/x(CO_2)=1,006, T_1 = 300 \text{ K}, T_2 = 900 \text{ K}$									
0,112	0,0082	-0,0010	-0,0072	0,0080	-0,0009	-0,0071	2,44	10,00	1,39
0,298	0,0161	-0,0071	-0,0090	0,0163	-0,0069	-0,0094	1,24	2,82	4,44
0,497	0,0186	-0,0089	-0,0097	0,0190	-0,0089	-0,0101	2,15	0,00	4,12
0,712	0,0156	-0,0075	-0,0081	0,0152	-0,0072	-0,0080	2,56	4,00	1,23
0,895	0,0069	-0,0031	-0,0038	0,0068	-0,0032	-0,0036	1,45	3,23	5,26
Среднее отклонение эксперимента от расчета, %							2,28	3,30	3,22

Рисунок 1 - Зависимость термодиффузионного разделения Δx системы N₂ – Ar – CO₂ при $x(Ar)/x(CO_2)=1,755$ от $x(N_2)$ при температурах $T_1 = 280 \text{ K}, T_2 = 800 \text{ K}$:

○, □, Δ – экспериментальные значения Δx для N₂, Ar и CO₂;
 — — расчет по формуле (1)

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.132.25.3>

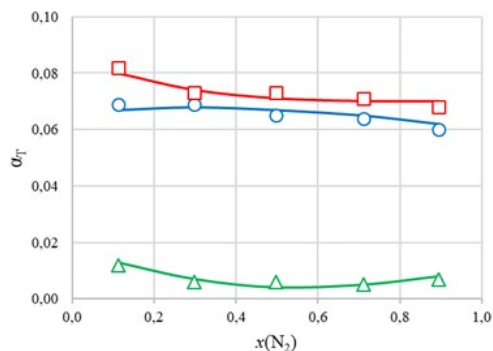


Рисунок 2 - Зависимость термодиффузионных постоянных α_{ij}^T системы $N_2 - Ar - CO_2$ при $x(Ar)/x(CO_2)=1,006$ от $x(N_2)$, при $T_1 = 280$ К и $T_2 = 800$ К:

○, □, Δ – эксперимент для $\alpha_T(N_2-Ar)$, $\alpha_T(N_2-CO_2)$, $\alpha_T(Ar-CO_2)$;
 — — расчет по формуле (3)

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.132.25.4>

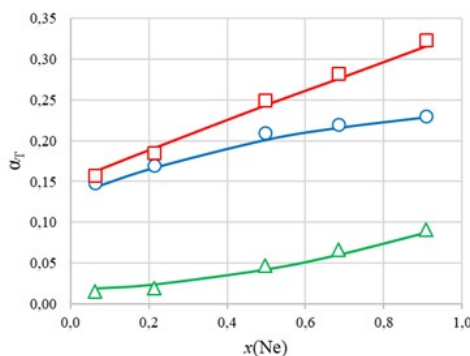


Рисунок 3 - Зависимость термодиффузионных постоянных α_{ij}^T системы $Ne - Ar - CO_2$ при $x(Ar)/x(CO_2)=0,998$ от $x(Ne)$, при $T_1 = 280$ К и $T_2 = 800$ К:

○, □, Δ – эксперимент для $\alpha_T(Ne-Ar)$, $\alpha_T(Ne-CO_2)$, $\alpha_T(Ar-CO_2)$;
 — — расчет по формуле (3)

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.132.25.5>

Для части газовых смесей измерения проводились следующим образом. При фиксированном отношении мольных долей двух компонентов, равном 0,25, 1,00 и 4,00 исследовалась зависимость термодиффузионной постоянной от мольной доли третьего компонента. По такой схеме проведено исследование следующих смесей: $Ar - CO_2$ в зависимости от концентраций Ne и N_2 (см. рис. 4-5).

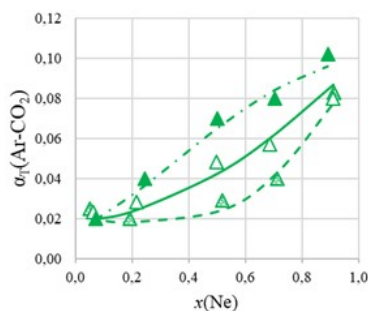


Рисунок 4 - Зависимость величины термодиффузионной постоянной $\alpha_T(Ar-CO_2)$ от содержания третьего компонента при $T_1 = 280$ К, $T_2 = 800$ К в газовой системе $Ne - Ar - CO_2$ от мольной доли $x(Ne)$:

○, □, Δ – эксперимент для $\alpha_T(Ar-CO_2)$ при $x(Ar)/x(CO_2) = 0,252; 0,998$ и $4,007$;
 — — расчет по формуле (3)

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.132.25.6>

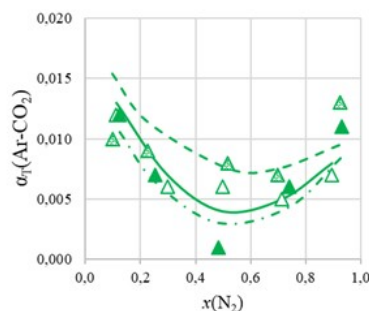


Рисунок 5 - Зависимость величины термодиффузионной постоянной $\alpha_T(\text{Ar-CO}_2)$ от содержания третьего компонента при $T_1 = 280 \text{ K}$, $T_2 = 800 \text{ K}$ в газовой системе $\text{N}_2 - \text{Ar} - \text{CO}_2$ от мольной доли $x(\text{N}_2)$:

○, □, Δ – эксперимент для $\alpha_T(\text{Ar-CO}_2)$ при $x(\text{Ar})/x(\text{CO}_2) = 0,252; 0,998$ и $4,007$; — – расчет по формуле (3)

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.132.25.7>

Как показывают измерения, величина термодиффузионного разделения и ее концентрационная зависимость весьма существенно меняется при изменении состава смеси (см. рис. 1). Разделение данного компонента может быть увеличено или уменьшено подбором соответствующего соотношения компонентов смеси. Следует также отметить, что теоретические значения разделения, вычисленные по формуле (1), хорошо согласуются с измеренными.

Для экспериментальных значений термодиффузионных постоянных также было проведено сопоставление с расчетами по полуэмпирической формуле (4), показавшее неплохое согласие между ними (см. рис. 2–5). Исключение составляют значения $\alpha_T(\text{Ar-CO}_2)$ в системе Ne-Ar-CO_2 (см. рис. 5). Большой разброс в данном случае связан с малыми значениями термодиффузионной постоянной.

Заключение

Главным результатом данной работы является получение термодиффузионных характеристик для ранее не исследованной газовой системы $\text{Ne} - \text{Ar} - \text{CO}_2$, а также расширение объема экспериментальных данных по термодиффузии в системе $\text{N}_2 - \text{Ar} - \text{CO}_2$. Проанализировав полученные данные можно сделать вывод о сложном характере зависимости термодиффузионных характеристик от состава исследованных трехкомпонентных газовых смесей.

Экспериментальные значения термодиффузионных постоянных, полученные в рамках исследования, сравнены с рассчитанными по предложенной нами ранее полуэмпирической формуле. Между результатами эксперимента и значениями, рассчитанными по приведенным методикам, наблюдается неплохое согласие, среднее отклонение составляет около 3%. Это позволяет рекомендовать указанную формулу для расчета термодиффузионных характеристик в трехкомпонентных газовых системах, содержащих N_2 , Ne , Ar и CO_2 при давлениях, близких к атмосферному.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Григорьев Б.А. Теплофизические свойства и фазовые равновесия газовых конденсатов и их фракций / Б.А. Григорьев, А.А. Герасимов, Г.А. Ланчаков — М.: МЭИ, 2007. — 344 с.
2. Шашков А.Г. Фактор термодиффузии газовых смесей / А.Г. Шашков, А.Ф. Золотухина, В.Б. Василенко — Минск: Белорусская наука, 2007. — 239 с.
3. Казанцев С.А. Уравнение состояния и теплофизические свойства углеводородов. / С.А. Казанцев, Г.С. Дьяконов, А.В. Климов и др. // Научно-технический сборник. Вести газовой науки. — 2011. — 2(7). — с. 166-180.
4. Гиршфельдер Д. Молекулярная теория газов и жидкостей / Д. Гиршфельдер, Ч. Кертис, Р. Берд — М.: ИИЛ, 1961. — 929 с.
5. Laranjeira M.F. An Elementary Theory of Thermal and Pressure Diffusion in Gaseous Binary and Complex Mixtures: I. General Theory. / M.F. Laranjeira // Physica. — 1960. — 26. — p. 409-416.
6. Van der Valk F. Thermal Diffusion in Ternary Mixtures. I. Theory. / F. Van der Valk // Phys. — 1963. — Vol. 29. — 5. — p. 417-426.
7. Вальдман Л.В. Явления переноса в газах при среднем давлении. / Л.В. Вальдман // Термодинамика газов; — М.: Машиностроение, 1970. — с. 169-414.

8. Фокин Л.Р. Транспортные свойства смеси разреженных газов N₂ – H₂ в базе данных ЭПИДИФ. / Л.Р. Фокин, А.Н. Калашников // Теплофизика высоких температур. — 2009. — 47(5). — с. 643-655.
9. Фокин Л.Р. Транспортные свойства разреженных газов. Система водород-метан. / Л.Р. Фокин, А.Н. Калашников, А.Ф. Золотухина // Инженерно-физический журнал. — 2011. — 84(6). — с. 1306-1317.
10. Шашков А.Г. Транспортные свойства смесей разреженных нейтральных газов, система водород-аргон. / А.Г. Шашков, А.Ф. Золотухина, Л.Р. Фокин // Инженерно-физический журнал. — 2010. — 83(1). — с. 188-208.
11. Deb S.K. Temperature Dependence of Thermal Diffusion Factors in Ternary Mixtures. / S.K. Deb, A.K. Barua // Phys. Fluids. — 1967. — Vol. 10. — 5. — p. 992-994.
12. Deb S.K. Thermal Diffusion in Ternary Gas Mixtures. / S.K. Deb, A.K. Barua // Physica. — 1967. — Vol. 34. — 3. — p. 438-444.
13. Deb S.K. Thermal Diffusion in the Ternary System Helium-Neon-Carbon Dioxide. / S.K. Deb, A.K. Barua // Trans. Faraday Soc. — 1968. — Vol. 64. — p. 358-362.
14. Sielanko J. Thermal Diffusion in a Multicomponent Gaseous Mixture. / J. Sielanko // Postepy Poland Fiz. — 1972. — Vol. 23. — p. 271-280.
15. Богатырев А.Ф. Зависимость термодиффузионного разделения бинарной смеси от добавки третьего компонента. / А.Ф. Богатырев, Л.Ю. Васильченко, Л.И. Криволапова // Научное обозрение. — 2010. — 3. — с. 37-39.
16. Богатырев А.Ф. Термодиффузия в трехкомпонентных газовых системах / А.Ф. Богатырев, О.А. Куликова // Научное обозрение. — 2012. — 3. — с. 160-166.
17. Богатырев А.Ф. Метод расчета термодиффузионного разделения в трехкомпонентных газовых системах / А.Ф. Богатырев, О.А. Куликова, М.А. Незовитина // Научное обозрение. — 2013. — 3. — с. 184-190.
18. Куликова О.А. Методика измерения термодиффузионного разделения в многокомпонентных газовых системах / О.А. Куликова // Информационные технологии, энергетика и экономика: сборник трудов 9-й МНТК студентов и аспирантов. — Смоленск: Универсум, 2012. — Т. 2. — с. 132-134
19. Богатырев А.Ф. Термодиффузионное разделение в плотных трехкомпонентных газовых системах / А.Ф. Богатырев, М.А. Незовитина // Научное обозрение. — 2012. — 2. — с. 123-128.
20. Богатырев А.Ф. Измерение и расчет термодиффузионного разделения в трехкомпонентных газовых системах / А.Ф. Богатырев, О.А. Куликова // Научно-технический сборник Вести газовой науки. — 2013. — 1(12). — с. 36-40.
21. Богатырев А.Ф. Температурная и концентрационная зависимости термодиффузионного разделения в трехкомпонентных газовых системах / А.Ф. Богатырев, О.А. Макеенкова, М.А. Незовитина // Инженерно-физический журнал. — 2014. — Т. 87. — 5. — с. 1205-1214
22. Богатырев А.Ф. Исследование молекулярного массопереноса в многокомпонентных газовых системах в неизотермических условиях / А.Ф. Богатырев, О.А. Куликова // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. — 2013. — 3-4. — с. 127-130
23. Богатырев А.Ф. Термодиффузия в разреженных трехкомпонентных газовых системах / А.Ф. Богатырев, Б.А. Григорьев, О.А. Макеенкова // Научно-технический сборник Вести газовой науки. — 2016. — 4 (28). — с. 50-55.
24. Bogatyrev A.F. Calculational Method in Treating Thermal Diffusion Characteristics in Ternary Gas Mixtures / A.F. Bogatyrev, O.A. Makeenkova, M.A. Nezovitina // Advanced Studies in Theoretical Physics. — 2014. — Vol. 8. — 28. — p. 1199-1204.
25. Незовитина М.А. Зависимость термодиффузионной постоянной смеси двух газов от добавки третьего / М.А. Незовитина, А.Ф. Богатырев, О.А. Макеенкова // Инженерно-физический журнал. — 2016. — Т. 89. — 3. — с. 728-735.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Grigor'ev B.A. Teplofizicheskie svoystva i fazovy'e ravnovesiya gazovy'x kondensatov i ix frakcij [Thermophysical Properties and Combinations of Gas Condensates and Their Fractions] / B.A. Grigor'ev, A.A. Gerasimov, G.A. Lanchakov — M.: MEI, 2007. — 344 p. [in Russian]
2. Shashkov A.G. Faktor termodiffuzii gazovy'x smesey [Thermal Diffusion Factor of Gas Mixtures] / A.G. Shashkov, A.F. Zolotuxina, V.B. Vasilenko — Minsk: Belorusskaya nauka, 2007. — 239 p. [in Russian]
3. Kazancev S.A. Uravnenie sostoyaniya i teplofizicheskie svoystva uglevodorodov [Equation of State and Thermophysical Properties of Hydrocarbons]. / S.A. Kazancev, G.S. D'yakovon, A.V. Klimov et al. // Nauchno-technicheskij sbornik. Vesti gazovoj nauki [Scientific and Technical Collection. Proceedings of Gas Science]. — 2011. — 2(7). — p. 166-180. [in Russian]
4. Girshfel'der D. Molekulyarnaya teoriya gazov i zhidkostej [Molecular Theory of Gases and Liquids] / D. Girshfel'der, Ch. Kertis, R. Berd — M.: IIL, 1961. — 929 p. [in Russian]
5. Laranjeira M.F. An Elementary Theory of Thermal and Pressure Diffusion in Gaseous Binary and Complex Mixtures: I. General Theory. / M.F. Laranjeira // Physica. — 1960. — 26. — p. 409-416.
6. Van der Valk F. Thermal Diffusion in Ternary Mixtures. I. Theory. / F. Van der Valk // Phys. — 1963. — Vol. 29. — 5. — p. 417-426.
7. Val'dman L.V. Yavleniya perenosa v gazax pri srednem davlenii [Transport Phenomena in Gases at Medium Pressure]. / L.V. Val'dman // Thermodynamics of Gases; — M.: Mashinostroenie, 1970. — p. 169-414. [in Russian]
8. Fokin L.R. Transportny'e svoystva smesi razrezhenny'x gazov N₂ – H₂ v baze danny'x E'PIDIF [Transport Properties of a Mixture of Rarefied Gases N₂ – H₂ in the EPIDIF Database]. / L.R. Fokin, A.N. Kalashnikov // Teplofizika vy'sokix temperatur [Thermophysics of High Temperatures]. — 2009. — 47(5). — p. 643-655. [in Russian]
9. Fokin L.R. Transportny'e svoystva razrezhenny'x gazov. Sistema vodorod-metan [Transport Properties of Rarefied Gases. Hydrogen-Methane System]. / L.R. Fokin, A.N. Kalashnikov, A.F. Zolotuxina // Inzhenerno-fizicheskij zhurnal [Engineering Physics Journal]. — 2011. — 84(6). — p. 1306-1317. [in Russian]

10. Shashkov A.G. Transportny'e svoystva smesey razrezhenny'x nejtral'ny'x gazov, sistema vodorod-argon [Transport Properties of Rarefied Neutral Gas Mixtures, Hydrogen-Argon System]. / A.G. Shashkov, A.F. Zolotuxina, L.R. Fokin // *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal* [Engineering Physics Journal]. — 2010. — 83(1). — p. 188-208. [in Russian]
11. Deb S.K. Temperature Dependence of Thermal Diffusion Factors in Ternary Mixtures. / S.K. Deb, A.K. Barua // *Phys. Fluids*. — 1967. — Vol. 10. — 5. — p. 992-994.
12. Deb S.K. Thermal Diffusion in Ternary Gas Mixtures. / S.K. Deb, A.K. Barua // *Physica*. — 1967. — Vol. 34. — 3. — p. 438-444.
13. Deb S.K. Thermal Diffusion in the Ternary System Helium-Neon-Carbon Dioxide. / S.K. Deb, A.K. Barua // *Trans. Faraday Soc.* — 1968. — Vol. 64. — p. 358-362.
14. Sielanko J. Thermal Diffusion in a Multicomponent Gaseous Mixture. / J. Sielanko // *Postepy Poland Fiz.* — 1972. — Vol. 23. — p. 271-280.
15. Bogatyrev A.F. Zavisimost' termodiffuzionnogo razdeleniya binarnoj smesi ot dobavki tret'ego komponenta [Dependence of the Thermal Diffusion Separation of a Binary Mixture on the Addition of the Third Component]. / A.F. Bogatyrev, L.Yu. Vasil'chenko, L.I. Krivolapova // *Nauchnoe obozrenie* [Scientific Review]. — 2010. — 3. — p. 37-39. [in Russian]
16. Bogatyrev A.F. Termodiffuziya v trekhkomponentnykh gazovykh sistemah [Thermal Diffusion in Ternary Gas Mixtures] / A.F. Bogatyrev, O.A. Kulikova // *Nauchnoye obozrenie* [Science Review]. — 2012. — 3. — p. 160-166. [in Russian]
17. Bogatyrev A.F. Metod rascheta termodiffuzionnogo razdeleniya v trekhkomponentnykh gazovykh sistemah [Method of Calculation of Thermodiffusion Separation in Ternary Gas Systems] / A.F. Bogatyrev, O.A. Kulikova, M.A. Nezovitina // *Nauchnoye obozreniye* [Science Review]. — 2013. — 3. — p. 184-190. [in Russian]
18. Kulikova O.A. Metodika izmereniya termodiffuzionnogo razdeleniya v mnogokomponentnykh gazovykh sistemah [Method of Measuring Thermodiffusion Separation in Multicomponent Gas Systems] / O.A. Kulikova // *Informacionnye tekhnologii, energetika i ekonomika: sbornik trudov 9-j MNTK studentov i aspirantov* [Information Technology, Energy and Economics: Collected Papers of the IX International Science-Technical Conference of Students and Aspirants]. — Smolensk: Universum, 2012. — Vol. 2. — p. 132-134. [in Russian]
19. Bogatyrev A.F. Termodiffuzionnoye razdeleniye v plotnykh trekhkomponentnykh gazovykh sistemakh [Thermal-Diffusion Separation in Solid Ternary Gaseous Systems] / A.F. Bogatyrev, M.A. Nezovitina // *Nauchnoye obozreniye* [Science Review]. — 2012. — 2. — p. 123-128. [in Russian]
20. Bogatyrev A.F. Izmereniye i raschet termodiffuzionnogo razdeleniya v rekhkomponentnykh gazovykh sistemakh [Measurements and Calculations of Thermal Diffusion Separation in Ternary Gaseous Systems] / A.F. Bogatyrev, O.A. Kulikova // *Nauchno-tehnicheskij sbornik Vesti gazovoy nauki* [Scientific-Technical Collection Book Proceedings of Gas Sciences]. — 2013. — 1(12). — p. 36-40. [in Russian]
21. Bogatyrev A.F. Temperaturnaya i kontsentratsionnaya zavisimosti termodiffuzionnogo razdeleniya v trekhkomponentnykh gazovykh sistemakh [Temperature and Concentration Dependencies for Thermal-Diffusion Separation in Ternary Gas Systems] / A.F. Bogatyrev, O.A. Makeenkova, M.A. Nezovitina // *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal* [Journal of Engineering Physics and Thermophysics]. — 2014. — Vol. 87. — 5. — p. 1205-1214. [in Russian]
22. Bogatyrev A.F. Issledovaniye molekulyarnogo massoperenosa v mnogokomponentnykh gazovykh sistemakh v neizotermicheskikh usloviyakh [Investigation of Molecular Mass Transfer in Multicomponent Gaseous Systems Being in Non-Isothermal Conditions]. / A.F. Bogatyrev, O.A. Kulikova // *Izvestiya vysshih ucebnykh zavedenij. Problemy energetiki* [Power Engineering: Research, Equipment, Technology]. — 2013. — 3-4. — p. 127-130. [in Russian]
23. Bogatyrev A.F. Termodiffuziya v razrezhennykh trekhkomponentnykh gazovykh sistemakh [Thermal Diffusion in Rarefied Ternary Gas Systems] / A.F. Bogatyrev, B.A. Grigoryev, O.A. Makeenkova // *Nauchno-tehnicheskij sbornik Vesti gazovoy nauki* [Scientific-Technical Collection Book Proceedings of Gas Sciences]. — 2016. — 4(28). — p. 50-55. [in Russian]
24. Bogatyrev A.F. Calculational Method in Treating Thermal Diffusion Characteristics in Ternary Gas Mixtures / A.F. Bogatyrev, O.A. Makeenkova, M.A. Nezovitina // *Advanced Studies in Theoretical Physics*. — 2014. — Vol. 8. — 28. — p. 1199-1204.
25. Nezovitina M.A. Zavisimost termodiffuzionnoy postoyannoy smesi dvukh gazov ot dobavki tretyego [Dependence of Thermal-Diffusion Constant for Binary Gas Mixture from a Third Gas Additive] / M.A. Nezovitina, A.F. Bogatyrev, O.A. Makeenkova // *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal* [Journal of Engineering Physics and Thermophysics]. — 2016. — Vol. 89. — 3. — p. 728-735. [in Russian]