

УДК 561.22

Молекулярно-кинетическое моделирование свойств переноса бинарной смеси разреженных газов $\text{CO}_2 + \text{R1234yf}$

Д-р техн. наук О. Б. ЦВЕТКОВ, *канд. техн. наук* Ю. А. ЛАПТЕВ¹,
канд. техн. наук В. В. МИТРОПОВ, Г. Л. ПЯТАКОВ, С. Ю. КЛИМЕНКО,
канд. техн. наук В. И. ЛЫСЕВ

¹max_iar@irbt-itmo.ru

Университет ИТМО

Рассмотрены методы оценок свойств переноса разреженных газов и бинарных газовых смесей, вопросы, связанные с особенностями их применения. Цель работы — исследование кинетических коэффициентов нового, обладающего низким потенциалом глобального потепления синтетического рабочего вещества R1234yf и бинарной смеси с диоксидом углерода $\text{CO}_2 + \text{R1234yf}$ в состоянии разреженного газа. Теоретически обоснована схема, основанная на формализме Мейсона — Мончика — Паркера, показаны ее возможности для расчета теплопроводности 2,3,3,3 — тетрафторпропена в состоянии разреженного газа. По теплопроводности смеси $\text{CO}_2 + \text{R1234yf}$ с компонентами, имеющими значительную разность масс молекул, в области разреженного газа данные получены расчетом согласно представлениям Линдсея — Бромли и теоретически обоснованному уравнению Васильевой. Результаты оценок коэффициентов переноса апробированы. Для оценки полученных в работе значений кинетических свойств рассмотренной смеси хладагентов проведено сравнение с доступными экспериментальными данными по теплопроводности смесей разреженных газов. Отмеченные расхождения с экспериментом в ряде случаев сопоставимы с погрешностью опытных данных.

Ключевые слова: свойства переноса, бинарная смесь, R1234yf, диоксид углерода, разреженный газ.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 04.05.2018, принята к печати 20.07.2018

DOI: 10.17586/1606-4313-2018-17-3-74-79

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Цветков О. Б., Лаптев Ю. А., Митропов В. В., Пятаков Г. Л., Клименко С. Ю., Лысев В. И. Молекулярно-кинетическое моделирование свойств переноса бинарной смеси разреженных газов $\text{CO}_2 + \text{R1234yf}$ // Вестник Международной академии холода. 2018. № 3. С. 74–79.

Molecular kinetic simulation for transport properties of binary $\text{CO}_2 + \text{R1234yf}$ mixture in the dilute gas state

D. Sc. O. B. TSVETKOV, *Ph. D.* Yu. A. LAPTEV¹, *Ph. D.* V. V. MITROPOV,
G. L. PAYTAKOV, S. Yu. KLIMEMENKO, *Ph. D.* V. I. LYSEV

¹max_iar@irbt-itmo.ru

ITMO University

Existing method for determining the transport properties in the rarefied gas and binary gas mixtures are reviewed and their deficiencies are discussed. Emphasis is placed on research of transport properties of the new low GWP potential warming synthetic fluid R1234yf and $\text{CO}_2 + \text{R1234yf}$ binary mixture in ideal gas state. A theoretically based correlation scheme employing the Mason — Monchick — Parker formalism has been examined and found to be useful as correlation and prediction schemes for thermal conductivity calculations in the limit zero density for dilute gas of 2,3,3,3-tetrafluoropropene. The thermal conductivity of gaseous mixtures $\text{CO}_2 + \text{R1234yf}$ at low pressures was defined by a variation of the Lindsay — Bromley relation based on the Wassiliewa — type equation developed for mixtures with large difference in molecular size. Some results are described to show how the calculations have judgment in studies of the transport properties data. Comparisons with limited amount of experimental information available indicate that the procedure allows evaluation of the transport properties of gas mixture to with a few percent.

Keywords: transport properties, binary mixture, R1234yf, carbon dioxide, dilute gas.

Article info:

Received 04/05/2018, accepted 20/07/2018

DOI: 10.17586/1606-4313-2018-17-3-74-79

Article in Russian

For citation:

Tsvetkov O. B., Laptev Yu. A., Mitropov V. V., Paytakov G. L., Klimemenko S. Yu., Lysev V. I. Molecular kinetic simulation for transport properties of binary $\text{CO}_2 + \text{R1234yf}$ mixture in the dilute gas state. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2018. No 3. p. 74–79.

Введение

С мировой сцены уходят рабочие вещества с высоким потенциалом глобального потепления (ПГП). Кигалийская поправка к Монреальскому протоколу, принятая в октябре 2016 г., Климатический саммит в Париже (декабрь 2015 г.), имеющие целью противостоять неконтролируемому росту парникового эффекта, поставили вопрос о сокращении производства гидрофторуглеродов, среди которых HFC-134a, HFC-125, HFC-32, HFC-143a, HFC-152a, HFC-410A, HFC-404A, HFC-407C. Новые хладагенты — гидрофторолефины (HFO) обладают, по существу, одним преимуществом — значительно более низким (в сто и более раз) потенциалом глобального потепления (ПГП). К примеру, ПГП изомера пропилена R1234yf (2,3,3,3-тетрафторпропен) равен четырем, в сравнении с ПГП=580 для HFC-32, ПГП=12100 для HFC-23, ПГП=3900 для HFC-404A и ПГП=1890 для HFC-410A [1].

Гидрофторолефины являются горючими веществами, а диоксид углерода — природный хладагент с ПГП=1, не горюч, способен заменить синтетическое вещество, но создает высокое давление в системе и имеет меньшую термодинамическую эффективность [2]. Исключить пожароопасность, повысить эффективность цикла и снизить давление в системе позволяет бинарная смесь CO₂+R1234yf.

Теплофизические свойства гидрофторолефинов, выявившихся в технике низких температур в последние десятилетия, крайне немногочисленны, особенно кинетические характеристики, а по свойствам смесей подобные данные вообще отсутствуют [2].

Цели и задачи исследования

Целью настоящей работы является исследование кинетических коэффициентов нового, обладающего низким потенциалом глобального потепления, синтетического рабочего вещества R1234yf и бинарной смеси с диоксидом углерода CO₂+R1234yf в состоянии разреженного газа.

Для достижения поставленной цели проведено молекулярно-кинетическое моделирование свойств переноса смеси CO₂+R1234yf, перспективного рабочего вещества высокотемпературных тепловых насосов [2, 3]. В основу моделирования, в отличие от подхода Чепмена — Энскога [4], положена концепция Эйкена [5]: трактовка процесса переноса энергии как суммы двух ее компонентов — трансляционной и энергии внутренних степеней свободы. Одной из задач в этой связи — развитие формализма теории Мейсона-Мончика — Паркера [5], в которой, в отличие от модели Тиссэ [6], диффузия внутренней энергии ассоциируется с самодиффузией. Оставаясь в рамках классического подхода Гиршфельдера, впервые для смеси CO₂+R1234yf показана возможность использования теоретически обоснованного уравнения Васильевой в интерпретации Линдсея-Бромли [7, 8].

Фактор Эйкена

Свойства переноса разреженных газов и смесей, обычно ассоциируемые с атмосферной теплопроводностью

и вязкостью, создают базу для изучения свойств переноса сжатых газов и жидкостей, в том числе на линиях фазовых равновесий.

По Чепмену — Энскогу теплопроводность разреженного газа может быть найдена из соотношения

$$\lambda = \frac{\eta C_v}{M} f, \tag{1}$$

где η — вязкость; C_v — идеально-газовая изохорная теплоемкость; M — молекулярная масса; λ — теплопроводность; f — фактор Эйкена.

В расчетах теплопроводности R1234yf (2,3,3,3-тетрафторпропен) принята гипотеза существования двух составляющих — энергии поступательного движения молекул λ_{tr} и внутренней энергии λ_{int}

$$\lambda = \lambda_{tr} + \lambda_{int} = (C_{v,tr} f_{tr} + C_{v,int} f_{int}) \eta, \tag{2}$$

где $C_{v,tr}$ — составляющая изохорной теплоемкости, связанная с поступательным движением молекул; $C_{v,int}$ — составляющая изохорной теплоемкости, обусловленная внутренней энергией молекул; f_{tr}, f_{int} — значения фактора Эйкена, связанные, соответственно, с поступательным движением молекул и внутренней энергией молекул.

По Эйкену [5]

$$f_{tr} = 5/2, \quad f_{int} = 1. \tag{3}$$

Необходимость обмена энергией между различными степенями свободы интерпретировали по Мейсону и Мончику, т. е. теплоемкость $C_{v,int}$ представили как сумму колебательных $C_{v,col}$ и $C_{v,r}$ вращательных мод [5]

$$C_{v,int} = C_{v,col} + C_{v,r} \tag{4}$$

Роль неупругих столкновений молекул рассмотрена при определении f_{tr}, f_{int}

$$f_{tr} = \frac{5}{2} \left[1 - \frac{5N}{\pi} \left(\frac{C_{v,r}}{RZ_r} + \frac{C_{v,col}}{RZ_{col}} \right) \right], \tag{5}$$

$$f_{int} = L \left[1 - \frac{5N}{\pi} \left(\frac{C_{v,r}}{C_{v,int} Z_r} + \frac{C_{v,col}}{C_{v,int} Z_{col}} \right) \right], \tag{6}$$

$$N = 1 - \frac{5}{2} L, \tag{7}$$

$$L = \frac{\rho D}{\mu}, \tag{8}$$

где ρ — плотность газа, D — коэффициент самодиффузии; Z_r, Z_{col} — числа столкновений для вращательной и колебательной релаксации.

Числа столкновений для вращательной релаксации, исходя из допущения, что для линейной молекулы 2,3,3,3-тетрафторпропена $Z_{col} \gg Z_r$, рассчитывали по Паркеру [4, 5]

$$Z_{np} = Z_{np}^{\infty} \left[1 + \frac{\pi^{3/2}}{2} \left(\frac{1}{T^*} \right)^{1/2} + \left(\frac{\pi^2}{4} + 2 \right) \frac{1}{T^*} + \pi^{3/2} \left(\frac{1}{T^*} \right)^{3/2} \right]^{-1}, \tag{9}$$

здесь $T^* = T / (\varepsilon/k)$, T — температура, К; ε/k — глубина потенциальной ямы, К; значение $Z_{\text{вп}}^{\infty} = 25$ [9].

Коэффициент диффузии внутренней энергии принимали равным коэффициенту самодиффузии, что позволило для модели потенциала Леннард — Джонса 12:6 комплекс

$$\frac{\rho D}{\eta} = \frac{6}{5} \left[\frac{\Omega^{(2,2*)}}{\Omega^{(1,1*)}} \right] \quad (10)$$

считать неизменным и равным 1,328 [9].

Параметр Камерлинг-Оннеса

$$\eta_{\text{кр}}^* = \frac{M^{1/3} P_{\text{кр}}^{2/3}}{T_{\text{кр}}^{1/3}} \quad (11)$$

использовали при определении динамической вязкости. Для описания температурной зависимости вязкости использовали рекомендации Филиппова [10]

$$\eta / \eta_{\text{кр}} = f(\tau), \quad (12)$$

$$\eta_{\text{кр}} / \eta_{\text{кр}}^* = 15,8. \quad (13)$$

В уравнениях (11) — (13) $p_{\text{кр}}$ и $T_{\text{кр}}$ — соответственно давление и температура в критической точке тетрафторпропена; $\eta_{\text{кр}}$ — значения динамической вязкости разреженного газа при $T_{\text{кр}}$, $\tau = T/T_{\text{кр}}$ — приведенная температура.

Результаты расчетов для R1234yf

Полученные значения теплопроводности и вязкости 2,3,3,3-тетрафторпропена аппроксимированы в интервале 240–360 К соотношениями

$$\lambda = C + DT + ET^2, \quad (14)$$

$$\eta = F + GT + HT^2, \quad (15)$$

где T — температура, К.

Коэффициенты уравнений (14)–(15) представлены в табл. 1.

В сопоставимом интервале температур для 2,3,3,3-тетрафторпропена подтверждаются, полученные с помощью программы REFPROP DATABASE Ver. 7.0, в пределах возможных погрешностей, результаты работы по теплопроводности разреженного газа.

Кинетические коэффициенты проверяли на согласованность, рассматривались безразмерные величины

$$\eta_r = \eta / \eta_{\text{кр}}; \quad (16)$$

$$\lambda_r = \lambda / \lambda_{\text{кр}}; \quad (17)$$

$$C_{v,r} = C_v / C_{v,\text{кр}}, \quad (18)$$

где $C_{v,r}$, λ_r , η_r — приведенные значения теплоемкости, теплопроводности и вязкости; C_v , $\lambda_{\text{кр}}$, $\eta_{\text{кр}}$ — значения изохорной теплоемкости, теплопроводности и вязкости тетрафторпропена при $T = T_{\text{кр}} = 367,85$ К.

Согласно расчетам, $\eta_{\text{кр}} = 14,203$ мПа·с; $C_{v,\text{кр}} = 107,4758$ Дж/моль; $\lambda_{\text{кр}} = 0,01921$ Вт/(м·К). Выполненные расчеты представлены в табл. 2.

Из данных табл. 2 получено практически постоянное приведенное значение фактора Эйкена f_r

$$f_r = \frac{\lambda_r}{C_{v,r} \eta_r}, \quad (19)$$

причем во всем температурном диапазоне значения фактора f_r близки к единице. Впервые это важное обстоятельство отмечено Расторгуевым Ю. Л. [11] для воды и углеводородов, как показатель проверки качества данных.

Смеси разреженных газов

Рассмотрены апробированные подходы теории теплопроводности для газовых смесей по Чепмену, Энскогу, Гиршфельдеру, Кертиксу, Васильевой, Шашкову и Абраменко [12]. Теоретически обоснованное уравнение для бинарной смеси предложено Гиршфельдером

$$\lambda_{\text{см}} = \lambda_{\text{см}}^* + \frac{\lambda_1 - \lambda_1^*}{1 + \frac{D_{11,\text{int}}}{D_{12,\text{int}}} \cdot \frac{x_2}{x_1}} + \frac{\lambda_2 - \lambda_2^*}{1 + \frac{D_{22,\text{int}}}{D_{12,\text{int}}} \cdot \frac{x_1}{x_2}}, \quad (20)$$

где x_1 , x_2 — мольные концентрации первого и второго компонентов смеси; $D_{11,\text{int}}$, $D_{22,\text{int}}$ — коэффициенты самодиффузии внутренней энергии компонентов; $D_{12,\text{int}}$ — коэффициент взаимной диффузии внутренней энергии; λ_1^* , λ_2^* — значения теплопроводности компонентов смеси в одноатомном приближении; $\lambda_{\text{см}}^*$ — теплопроводность бинарной смеси в одноатомном приближении.

Для смеси $\text{CO}_2 + \text{R1234yf}$ принята интерпретация уравнения Гиршфельдера в форме уравнения А. Васильевой [13, 14]

$$\lambda_{\text{см}} = \frac{\lambda_1}{1 + A_{12} \frac{x_2}{x_1}} + \frac{\lambda_2}{1 + A_{21} \frac{x_1}{x_2}}. \quad (21)$$

В расчетах коэффициентов A_{ij} использована схема Линдсея — Бромли [13]

Таблица 1

Коэффициенты уравнений (14) и (15) ($\lambda \cdot 10^3$, Вт/(м·К); $\eta \cdot 10^6$, Па·с)

Table 1

Coefficients for the equations (14) and (15) ($\lambda \cdot 10^3$, Wt/(m·K); $\eta \cdot 10^6$, Pa·s)

Коэффициенты					
C	D	E	F	G	H
$-3,957 \cdot 10^{-1}$	$2,119 \cdot 10^{-2}$	$8,728 \cdot 10^{-5}$	0,21626	0,03881	$-2,15055 \cdot 10^{-6}$

Таблица 2

Значения приведенных температур, теплоемкости, вязкости и теплопроводности 2,3,3,3-тетрафторпропена

Table 2

Reduced temperature, thermal capacity, viscosity, and thermal conductivity of 2,3,3,3- tetrafluoropropen

T, К	Параметры			
	τ	η_r	$C_{v,r}$	λ_r
253,15	0,6882	0,6973	0,7811	0,5497
273,15	0,7426	0,7506	0,8192	0,6200
303,15	0,8241	0,8297	0,8765	0,7314
323,15	0,8785	0,8825	0,9143	0,8100
343,15	0,9329	0,9352	0,9529	0,8933
363,15	0,9872	0,9877	0,9910	0,9792

$$A_{ij} = \frac{1}{4} \left\{ 1 + \left[\frac{\eta_i}{\eta_j} \left(\frac{M_j}{M_i} \right)^{3/4} \cdot \frac{T + S_i}{T + S_j} \right]^{1/2} \right\}^2 \frac{T + S_{ij}}{T + S_i}, \quad (22)$$

$$\frac{1}{\lambda_{cm}} = \sum_i^n \frac{x_i}{\lambda_i}. \quad (23)$$

здесь η_i, η_j — динамические вязкости компонентов бинарной смеси i и j ; M_i, M_j — молекулярные массы компонентов; T — температура; λ_i, λ_j — значения коэффициентов теплопроводности компонентов; x_i, x_j — мольные доли компонентов; S_i, S_j — постоянные Сазерленда; $S_{ij} = (S_i S_j)^{-2}$, $S_i = 1,5T_{0,i}$; $S_j = 1,5T_{0,j}$; $T_{0,i}, T_{0,j}$ — температуры насыщения для компонентов смеси при $p=0,1$ МПа. Коэффициенты уравнения (22) и значения A_{ij} сведены в табл. 3.

Соотношение (23) применялось в работе [8] для апробации данных о теплопроводности зеотропа HFC-407C ($x_{R125} = 17,96\%$, $x_{R134a} = 43,93\%$, $x_{R32} = 38,11\%$). Аналогичное сопоставление расчетов по уравнениям (21) и (23) для теплопроводности смеси 2,3,3,3-тетрафторпропен+CO₂ дано в табл. 5, а для тройной смеси, в сравнении с экспериментальными данными Геллера [16], в табл. 6.

Корреляции и анализ данных для смеси CO₂+R1234yf

Кинетические коэффициенты диоксида углерода взяты из справочных данных [7, 9]. Теплопроводность смеси определена для двух мольных концентраций диоксида углерода (табл. 4) [2].

При апробации метода расчета и полученных данных смеси по CO₂+R1234yf использована эмпирическая корреляция, рекомендованная в [8, 15]

Расхождения практически не выходят за погрешность эксперимента для смеси HFC-407C (см. табл. 6) и несколько большие для смеси CO₂+R1234yf при концентрации диоксида углерода $x=0,7737$ (см. табл. 5). С учетом величин реальных отличий между экспериментальными данными для чистых хладагентов и, тем более, для смесевых композиций, достигающих 10% и более [9], анализ полученных данных позволяет проявить обоснованный оптимизм в оценке их достоверности.

Таблица 3

Коэффициенты уравнения (22)

Table 3

Coefficients for the equation (22)

Компоненты смеси	Параметры					
	M_p , кг/моль	T_{0i} , К	S_i	S_{ij}	A_{12}	A_{21}
R1234yf	114,042	245,15	367,725	327,694	1,6852	0,6460
CO ₂	44,011	191,63	292,02			

Таблица 4

Теплопроводность бинарной смеси CO₂+R1234yf

Table 4

Thermal conductivity of CO₂+R1234yf binary mixture

Концентрация CO ₂	$\lambda_{cm} \cdot 10^3$, Вт/(м·К) при температуре, К					
	253,15	273,15	303,15	323,15	343,15	363,15
$x=0,1996$	10,79	12,15	14,28	15,77	17,35	18,96
$x=0,7737$	13,07	14,60	16,96	1857	20,23	21,93

Таблица 5

Сравнение расчетов по уравнениям (21) и (23) для смеси CO₂+R1234yf

Table 5

Calculations by equations (21) and (23) for CO₂+R1234yf mixture

Расчет по уравнению	$\lambda_{см} \cdot 10^3$, Вт/(м·К) при $x_{CO_2} = 0,1996$ и температурах, К			
	253,15	303,15	323,15	363,15
(21)	10,79	14,28	15,77	18,96
(23)	11,00	14,54	16,05	19,28
$\lambda(21)/\lambda(23)$	0,981	0,982	0,982	0,983
Расчет по уравнению	$\lambda_{см} \cdot 10^3$, Вт/(м·К) при $x_{CO_2} = 0,7737$ и температурах, К			
	253,105	303,15	323,15	363,15
(21)	13,07	16,96	18,57	21,93
(23)	12,47	16,14	17,66	20,78
$\lambda(21)/\lambda(23)$	1,048	1,051	1,052	1,055

Таблица 6

Сравнение расчетов по корреляции (23) для тройного зетропа HFC-407C ($\lambda_{см, расч}$) с данными эксперимента ($\lambda_{см, эксп}$) [16]

Table 6

Calculations by correlation (23) HFC-407C zeotrope ($\lambda_{см, расч}$) and the experimental data ($\lambda_{см, эксп}$) [16]

Данные	$\lambda_{см} \cdot 10^3$, Вт/(м·К) при температурах, К		
	253,27	314,26	389,70
Расчет по (23) $\lambda_{см, расч}$	9,77	14,34	20,12
Эксперимент [16] $\lambda_{см, эксп}$	9,68	14,40	20,12

Выводы

Рассмотрена бинарная смесь разреженных газов — диоксида углерода CO₂ с гидрофторолефином R1234yf. Теоретические подходы использованы для описания теплопроводности разреженных газов с учетом формализма Мейсона — Мончика — Паркера для чистых веществ, представлений Линдсея — Бромли и Васильевой для смеси газов. Получены значения теплопроводности R1234yf,

рассмотрен фактор Эйкена для смеси CO₂+R1234yf в температурном диапазоне 250÷360 К. Проведена апробация использованных подходов для смесей газов, в том числе, сравнением с достоверными экспериментальными данными. Безусловно, в дальнейшем необходимы именно массивы опытных результатов, подкрепленных теоретическими исследованиями в области широкого спектра теплофизических свойств гидрофторолефинов и их смесей.

Литература

References

1. Damanski P. A., Brignoli R., Brown J. S., Kazakov A. E., McLinden M. O. Low — GWP refrigerants for medium and high-pressure applications. // International Journal of Refrigeration. 2017. Vol. 84. P. 198–209.
2. Juntarachat N., Valtz A., Coquelet C., Privat R., Jaubert J. N. Experimental measurements and correlation of vapor-liquid equilibrium and critical data for the CO₂+R1234yf and CO₂+R1234ze (E) binary mixtures// International Journal of Refrigeration. 2014. Vol. 47. P. 141–152.
3. Coulomb D. The refrigerants future: the phase down of HFCs and its consequences // Вестник Международной академии холода. 2014. № 1. С. 3–6.
4. Ферцигер Д., Капер Г. Математическая теория процессов переноса в газах. — М.: Мир, 1976. 556 с.
5. Mason E. A., Monchik L. Heat conductivity of polyatomic and polar gases// J. Chem. Phys. 1962. Vol. 36. P. 1622–1639.
6. Millat J., Wakeham W. A. The correlation and prediction of thermal conductivity and other properties of gases at zero density// Int. J. Thermophysics. 1989. Vol. 10, No 5. P. 983–993.
1. Damanski P. A., Brignoli R., Brown J. S., Kazakov A. E., McLinden M. O. Low — GWP refrigerants for medium and high-pressure applications. International Journal of Refrigeration. 2017. Vol. 84. P. 198–209.
2. Juntarachat N., Valtz A., Coquelet C., Privat R., Jaubert J. N. Experimental measurements and correlation of vapor-liquid equilibrium and critical data for the CO₂+R1234yf and CO₂+R1234ze (E) binary mixtures. International Journal of Refrigeration. 2014. Vol. 47. P. 141–152.
3. Coulomb D. The refrigerants future: the phase down of HFCs and its consequences. Vestnik Mezhdunarodnoj akademii kholoda. 2014. No 1. С. 3–6.
4. Ferziger D., Kaper G. Mathematical theory of transport processes in gases. Moscow: Mir, 1976. 556 p. (in Russian)
5. Mason E. A., Monchik L. Heat conductivity of polyatomic and polar gases. J. Chem. Phys. 1962. Vol. 36. P. 1622–1639.
6. Millat J., Wakeham W. A. The correlation and prediction of thermal conductivity and other properties of gases at zero density. Int. J. Thermophysics. 1989. Vol. 10, No 5. P. 983–993.

7. *Vargaftik N. B.* Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. — М.: Наука, 1972. 720 с.
8. *Цветков О. Б., Лаптев Ю. А.* О теплопроводности смесей гидрофторуглеродов в состоянии разреженного газа// Вестник Международной академии холода. 2015. № 3. С. 68–72.
9. *Алтунин В. В.* Теплофизические свойства двуокиси углерода. — М.: Изд-во стандартов, 1975. 546 с.
10. *Филиппов Л. П.* Подобие свойств веществ. — М.: Изд-во МГУ, 1978. 256 с.
11. *Расторгуев Ю. Л.* Исследование теплопроводности воды, индивидуальных углеводородов, нефтей, нефтепродуктов, кремнеорганических соединений и жидких растворов в широкой области параметров состояния: дисс....д. т. н. Грозный, 1970. 357 с.
12. *Шашков А. Г., Абраменко Т. Н.* Теплопроводность газовых смесей. — М.: Энергия, 1970. — 288 с.
13. *Schreiber M., Vesovic V., Wakeham W. A.* Thermal conductivity of multicomponent polyatomic dilute gas mixtures// *Int. Journal Thermophys.* 1997. Vol. 18, N 4. P. 925–937.
14. *Wassiliewa A.* Warmeleitung in Gasgemischen // *Phys. Zeit.* 1904. Vol. 5, N 22. P. 737–742.
15. *Gilmore T. F., Comings E. W.* Thermal conductivity of binary mixtures of carbon dioxide, nitrogen, and ethane at high pressures: comparison with correlation and theory// *AIChE Journal.* 1966. Vol. 12. P. 1172–1178.
16. *Geller V. Z., Nemzer B. V., Cheremnyk U. V.* Thermal conductivity of the refrigerant mixtures R404A, R407A, R410A, and R507// *Int. J. Thermophys.* 2001. Vol. 22. P. 1035–1043.
7. *Vargaftik N. B.* Handbook of thermophysical properties of gases and liquids. Moscow: Science, 1972. 720 p. (in Russian)
8. *Tsvetkov O. B., Laptev Yu. A.* Thermal conductivity of mixtures of the rarefied gaseous hydrofluorocarbons. *Vestnik Mezhdunarodnoj akademii kholoda.* 2015. No 3. p. 68–72. (in Russian)
9. *Altunin V. V.* Thermophysical properties of carbon dioxide. Moscow, 1975. 546 p. (in Russian)
10. *Filippov L. P.* Similarity of properties of substances. Moscow, 1978. 256 p. (in Russian)
11. *Rastorguev Yu. L.* Study of the thermal conductivity of water, individual hydrocarbons, oils, petroleum products, organosilicon compounds and liquid solutions in a wide range of state parameters: Diss. DSc. Grozny, 1970. 357 p. (in Russian)
12. *Shashkov A. G., Abramenko T. N.* The thermal conductivity of gas mixtures. Moscow: Energy, 1970. 288 p. (in Russian)
13. *Schreiber M., Vesovic V., Wakeham W. A.* Thermal conductivity of multicomponent polyatomic dilute gas mixtures. *Int. Journal Thermophys.* 1997. Vol. 18, N 4. P. 925–937.
14. *Wassiliewa A.* Warmeleitung in Gasgemischen. *Phys. Zeit.* 1904. Vol. 5, N 22. P. 737–742.
15. *Gilmore T. F., Comings E. W.* Thermal conductivity of binary mixtures of carbon dioxide, nitrogen, and ethane at high pressures: comparison with correlation and theory. *AIChE Journal.* 1966. Vol. 12. P. 1172–1178.
16. *Geller V. Z., Nemzer B. V., Cheremnyk U. V.* Thermal conductivity of the refrigerant mixtures R404A, R407A, R410A, and R507. *Int. J. Thermophys.* 2001. Vol. 22. P. 1035–1043.

Сведения об авторах

Цветков Олег Борисович

д. т. н., профессор кафедры теплофизики и теоретических основ тепло-хладотехники Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, tsvetkov@corp.ifmo.ru

Лаптев Юрий Александрович

к. т. н., ст. научн. сотрудник, тьютор кафедры теплофизики и теоретических основ тепло-хладотехники Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, max_iar@irbt-itmo.ru

Митропов Владимир Викторович

к. т. н., доцент кафедры теплофизики и теоретических основ тепло-хладотехники Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, v_mit@mail.ru

Пятаков Георгий Леонидович

ассистент кафедры теплофизики и теоретических основ тепло-хладотехники Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, max_iar@irbt-itmo.ru

Клименко Сергей Юрьевич

аспирант кафедры теплофизики и теоретических основ тепло-хладотехники Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, max_iar@irbt-itmo.ru

Лысев Владимир Иванович

к. т. н., доцент кафедры инженерного проектирования систем жизнеобеспечения Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, max_iar@irbt-itmo.ru

Information about authors

Tsvetkov Oleg Borisovich

D. Sc., professor of Department of Thermophysics and theoretical bases heating and refrigerating engineers of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, tsvetkov@corp.ifmo.ru

Laptev Yury Aleksandrovich

Ph. D., tutor of Department of Thermophysics and theoretical bases heating and refrigerating engineers of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, max_iar@irbt-itmo.ru

Mitropov Vladimir Viktorovich

Ph. D., associate professor of Department of Thermophysics and theoretical bases heating and refrigerating engineers of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, v_mit@mail.ru

Paytakov Georgij Leonidovich

Assitant of Department of Thermophysics and theoretical bases heating and refrigerating engineers of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, max_iar@irbt-itmo.ru

Klimenko Sergej Yurevich

graduate student of Department of Thermophysics and theoretical bases heating and refrigerating engineers of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, max_iar@irbt-itmo.ru

Lysev Vladimir Ivanovich

Ph. D., associate professor of Department of engineering design of life support systems of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, max_iar@irbt-itmo.ru