

УДК 561.22

Расширенное описание температуропроводности дифторметана в окрестности критической точки*

Д-р техн. наук **О. Б. ЦВЕТКОВ**¹, канд. техн. наук **Ю. А. ЛАПТЕВ**¹,

д-р техн. наук **А. В. КЛЕЦКИЙ**¹

канд. техн. наук **В. В. МИТРОПОВ**¹, **Н. А. ГАЛАХОВА**²

¹max_iar@irbt-itmo.ru, ²natasha_galahova@mail.ru

Университет ИТМО

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 15-08-08503)

Теоретические и эмпирические подходы рассмотрены для описания поведения кинетических коэффициентов жидкостей и газов в окрестности критической точки. Кроссоверный формализм, развитый в работах Олькови и Зенгера для температуропроводности вблизи критического состояния жидкость — пар и вдали от него, рассмотрен применительно к дифторметану (хладагент HFC-32). Кинетические коэффициенты представлены как сумма двух составляющих — регулярной или базовой составляющей в отсутствие аномалий в поведении вещества и критической, сингулярной составляющей в окрестности критической точки. В критической точке однокомпонентного вещества критическая составляющая температуропроводности удовлетворяет уравнению Стокса — Эйнштейна. Для интерпретации реального поведения свойств веществ в широкой окрестности критической точки теория предусматривает использование двух скейлинговых функций, позволяющих описать аномалии в критической области и регулярную составляющую, где влияние сингулярной компоненты отсутствует. Расчет плотности, термических и калорических свойств дифторметана (хладагент HFC-32), необходимых для сопоставления теоретических и экспериментальных данных, выполнен с помощью кроссоверного уравнения состояния Рыкова с сотрудниками, позволившего описать термодинамическую поверхность в регулярной области параметров состояния и в области аномалий в поведении свойств вблизи критической области. На основании сопоставительного анализа экспериментальных и вычисленных различными способами значений в качестве расчетных критических параметров дифторметана (хладагент HFC-32) приняты: $p_{кр} = 5,7847$ МПа, $T_{кр} = 351,255$ К, $\rho_{кр} = 424$ кг/м³.

Ключевые слова: температуропроводность, хладагент HFC-32, дифторметан, сингулярность, критическое состояние.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 30.06.2017, принята к печати 24.11.2017

doi: 10.21047/1606-4313-2017-16-4-59-65

Ссылка для цитирования:

Цветков О. Б., Лаптев Ю. А., Клещкий А. В., Митропов В. В., Галахова Н. А. Расширенное описание температуропроводности дифторметана в окрестности критической точки // Вестник Международной академии холода. 2017. № 4. С. 59–65.

An extended description of the thermal diffusivity singular behavior of difluoromethane near the critical point

D. Sc. **O. B. TSVEKOV**¹, Ph. D. **Yu. A. LAPTEV**¹, D. Sc. **A. V. KLETSKII**¹,

Ph. D. **V. V. MITROPOV**¹, **N. A. GALAKHOVA**²

¹max_iar@irbt-itmo.ru, ²natasha_galahova@mail.ru

ITMO University

The validity of the available theoretical and empirical descriptions of the asymptotic and nonasymptotic behavior of the transport properties of fluids close to the critical point is examined. A crossover formalism developed by Olchow and Sengers for the thermal diffusivity near the vapor — liquid point and far away from it is considered for difluoromethane (refrigerant HFC-32). The transport properties were expressed as the sum of two contributions: regular or background in the absence of critical fluctuations and the critical part. Very close to the critical point the critical part of thermal diffusivity satisfies a Stokes — Einstein relation, but to interpret the actual behavior of the thermal diffusivity in the critical region two crossover functions have been used to describe the crossover from the singular behavior to the regular behavior where the critical part is negligible. For the calculation of the densities and the various thermodynamic properties of difluoromethane in the critical region and to make a comparison with theoretical results it was applied an accurate crossover equation of state developed by Rykov et al. describing the thermodynamic surface not only in a regular part and also in the neighborhood of critical point. For the critical temperature, pressure and density of difluoromethane (refrigerant HFC-32) have been adopted the values $p_c = 5.7847$ MPa, $T_c = 351.255$ K, $\rho_c = 424$ kg·m⁻³.

Key words: thermal diffusivity, critical region, singularity, refrigerant HFC-32, difluoromethane.

Article info:

Received 30/06/2017, accepted 24/11/2017

DOI: 10.21047/1606-4313-2017-16-4-59-65

Article in Russian

For citation:

Tsvetkov O. B., Laptev Yu. A., Kletsii A. V., Mitropov V. V., Galakhova N. A. An extended description of the thermal diffusivity singular behavior of difluoromethane near the critical point. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2017. No 4. p. 59–65.

Введение

Критические явления являются не только интересным объектом исследований, но воспринимаются в ряде случаев как поразительные и феноменальные [1]. В критической точке жидкость — пар сосуществуют стабильные, метастабильные и нестабильные состояния, а переход через критическое состояние сопровождается аномалией свойств как механических, так и тепловых. С приближением к критической точке коэффициент объемного расширения стремится к бесконечности, бесконечно большое значение принимает изохорная теплоемкость, исчезает диффузия. Среди кинетических коэффициентов слабую аномалию претерпевает коэффициент вязкости, тогда как теплопроводностная диссипация энергии проявляется наиболее выраженную аномалию. Делом исключительной трудности представляется экспериментальное изучение аномалий теплопроводности в области критического состояния, поскольку по мере приближения к критической точке резко возрастает число Грасгофа, что предполагает соответствующее уменьшение используемых перепадов температур [2, 3]. Рост теплопроводности в окрестности критической точки впервые обнаружили Кардос и Зельшопп, однако, как было показано в дальнейшем, результаты этих измерений были, видимо, отягощены конвекцией. В работах Зибланда и Бартон, Улира, Столярова, Ипатьева и Теодоровича, Боровика [2] о подобных аномалиях не сообщалось. В 1958 году, исследуя теплопроводность диоксида углерода (R744), Гульднер наблюдал 6–7-кратный рост теплопроводности в окрестности критической точки [2]. Значительные максимумы теплопроводности R744 в аналогичной области наблюдали Амирханов, Михельс и Зенгерс [4, 5], а для аммиака — Нидхэм, Зибланд, Голубев и Соколова, Лейндре, Тюфо, Гаррабос и Иванов [2, 6]. Значительные максимумы теплопроводности воды и метана отмечены в работах Сироты и Ривкина, Саканиду, Ван ден Берга, Селдама и Зенгерса [7, 8] Геллера и Паулайтиса для HFC-32, Прасада, Ванга и Венарта для HC-290, Хана, Гросса и Зонга для HCFC-115 [9–11].

Описывающие асимптотику теплопроводности в окрестности критической точки уравнения, предложены Кавасаки, Феррелом, Хохенбергом, Гальпериным и др., однако описать поведение теплопроводности во всем диапазоне температур и давлений, в том числе критическую область, эти соотношения не могли [12, 13]. Полуэмпирические зависимости для решения локальных задач предлагались Родером, Нието де Кастро, Перкинсоном, Саканиду, Зенгерсом [14]. Эти уравнения, с помощью вводимых авторами параметров, успешно описыва-

ли результаты конкретных исследований теплопроводности, но не могли быть использованы в дальнейшем для оценок теплопроводности других веществ, а также вне пределов параметров, введенных авторами этих обобщений. А также не могли быть применены для объяснения полученных экспериментальных данных ряда авторов для других веществ, особенно для описания менее обширных по объему исследованных параметров, и тем более результатов, ограниченных по числу экспериментальных точек.

Методы исследования

Возможности описания температуропроводности гидрофторпроизводного метана — дифторметана (хладагент HFC-32) в предлагаемой работе оценены с использованием теоретического решения Олькови и Зенгерса в сочетании с не очень многочисленным рядом экспериментальных данных вблизи критики, прежде всего полученных методом нагретой нити в работе Геллера и Паулайтиса [9]. Экспериментальные точки по теплопроводности HFC-32 методом коаксиальных цилиндров, в том числе в области сингулярностей, получены и авторами настоящей работы [15, 16].

Дифторметан выбран как объект изучения благодаря резко возросшему интересу к нему со стороны индустрии холода, рассматривающей HFC-32 как хладагент, альтернативный обширному классу химических соединений, уходящих из техники низких температур, как имеющих при всех их положительных качествах высокий потенциал глобального потепления таких, как, например, R134a, R404A, R407C и другие [17, 18].

Особенности обработки и интерпретации опытных данных в окрестности критической точки

Аномальным образом, как уже отмечалось, изменяются свойства веществ в критическом состоянии. Исчезает диффузия, изохорная теплоемкость (C_v) и теплопроводность (λ) принимают бесконечно большие значения. Слабую логарифмическую особенность имеют в критической области кинематическая (ν) и сдвиговая (η) вязкости. Минимизируется в критическом состоянии температуропроводность (a), часто называемая тепловой диффузией, равная отношению коэффициента теплопроводности к произведению изобарной теплоемкости на плотность [19, 20].

Особенностью интерпретации и обработки опытных данных по кинетическим свойствам является выделение

базовой (регулярной) и сингулярной или критической составляющих коэффициентов переноса [2]

$$\lambda = \lambda_B + \Delta\lambda, \quad (1)$$

$$a = a_B + \Delta a, \quad (2)$$

$$\eta = \eta_B + \Delta\eta, \quad (3)$$

Согласно теории связанных мод критических явлений, сингулярная составляющая температуропроводности Δa в ближайшей окрестности критической точки удовлетворяет уравнению Стокса — Эйнштейна [12, 13]

$$\Delta a = \frac{\Delta\lambda}{\rho C_p} \rightarrow \frac{Rk_B T}{6\pi\eta\xi} \text{ при } \xi \rightarrow \infty, \quad (4)$$

где ξ — корреляционная длина; R — универсальная амплитуда; ρ — плотность; C_p — изобарная теплоемкость; $\Delta\lambda$ — критическая аномалия теплопроводности; k_B — постоянная Больцмана; T — температура; η — сдвиговая вязкость.

Уравнение (4) справедливо только в малой окрестности критической точки. Интерпретация реального поведения кинетических характеристик в широкой окрестности критической области связана с необходимостью учета неасимптотических составляющих с помощью введения универсальной динамической скейлинговой функции $\Omega(q\xi)$

$$\Delta a = R \frac{Rk_B T}{6\pi\eta\xi} \Omega(q\xi). \quad (5)$$

Функция $\Omega(q\xi)$ оценивалась в работах Кавасаки и Ло, Бурштейна и Зенгерса, Паладина и Пешти. Согласно Паладину и Пешти [12, 13]

$$\Omega(q\xi) = \Omega(x) = [\Omega_k(x)]^{1-x_\eta} (1+x^2)^{x_\eta}. \quad (6)$$

Здесь $\Omega_k(q\xi)$ — функция Кавасаки.

$$\Omega_k(q\xi) = \Omega_k(x) = \frac{3}{4x^2} [1 + x^2 + (x^3 - x^{-1}) \arctg x],$$

где $x_\eta = 3/43$, $R = 1,0375$. Значения универсальной константы R могут меняться от 0,79 до 1,2.

Из полуэмпирических кроссоверных функций наиболее известны функции Базю [12]

$$F(\Delta\tau, \Delta r) = \sqrt{\Delta r} \exp(-A_\tau \Delta\tau^2 - A_r \Delta r^4) \quad (7)$$

и Ленеиндре [12]

$$F(\Delta\tau, \Delta r) = \frac{X(T)^2}{X(T)^2 + (\rho - \rho_{кр})^2}, \quad (8)$$

где $\Delta\tau = (T - T_{кр})/T_{кр}$, $\Delta r = (\rho - \rho_{кр})/\rho_{кр}$, A_τ , A_r и $X(T)$ — произвольно выбираемые параметры.

Эмпирические демпинговые функции апробированы для описания критических аномалий ряда хладагентов HCFC-115 и HC-290 [10, 11].

Теоретически обоснованное соотношение, предложенное Зенгерсом и Олькови [13, 21], выбрано в настоящей работе

$$\Delta a = \frac{Rk_B T}{6\pi\eta\xi} (\Omega - \Omega_0). \quad (9)$$

Здесь Ω , Ω_0 — динамические скейлинговые функции

$$\Omega = \frac{2}{\pi} \left[\left(\frac{C_p - C_v}{C_p} \right) \arctg x + \frac{C_v}{C_p} x \right]; \quad (10)$$

$$\Omega_0 = \frac{2}{\pi} \left\{ 1 - \exp \left[- \frac{1}{x^{-1} + \frac{(x\rho_{кр}/\rho)^2}{3}} \right] \right\}, \quad (11)$$

где $x = q_D \xi$, C_p , C_v — теплоемкость изобарная и изохорная, $\rho_{кр}$ — плотность в критической точке.

Кроссоверная функция Ω_0 , следуя Зенгерсу и Олькови, учитывает небольшую, но конечную величину сингулярности вдали от критической точки, присущей так называемой долговременной составляющей аномального эффекта коэффициентов переноса.

Корреляционную длину ξ находили согласно [13, 21]

$$\xi = \xi_0 \left(\frac{\Delta\chi}{\Gamma} \right)^{\frac{v}{\gamma}}, \quad (12)$$

где

$$\Delta\chi = \chi(\rho, T) - \chi(\rho, T_r) \frac{T_r}{T}, \quad (13)$$

$$\chi = \rho \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_T \frac{p_{кр}}{\rho_{кр}^2}, \quad (14)$$

здесь χ — восприимчивость, $p_{кр}$ — критическое давление, T_r — температура, выбираемая в предположении, что при $T_r > T_{кр}$ критической аномалией можно пренебречь.

Результаты и обсуждение

Модель Зенгерса — Олькови использована для описании сингулярностей в критической области дифторметана. Выбор дифторметана (хладагент HFC-32) связан с Кигалийской поправкой 2016 г., принятой на 28-м совещании Сторон Монреальского протокола по веществам, разрушающим озоновый слой. Данный документ, являясь неукоснительным международным соглашением, исходит из обязательного, с точки зрения международного права, поэтапного прекращения производства и потребления гидрофторуглеродов (ГФУ). Причем через 20 лет уровень потребления ГФУ от базового уровня для развитых стран не должен превышать 15%, а в ближайшей перспективе — до 2020 г. речь идет о прекращении производства и потребления озоноразрушающих веществ, в частности, HCFC-22 и HCFC-123. Альтернативные решения по замене гидрохлорфторуглеродов основаны на ГФУ и, особенно, на их зеотропных смесях, наиболее часто используемых в индустрии холода — R404A, R407C, R410A. Их главный недостаток — высокий потенциал глобального потепления (ПГП), поэтому особый интерес представляет именно ГФУ-32 (HFC-32) с ПГП много меньшим, чем потенциалы упомянутых зеотропов [17, 18].

Таблица 1
Универсальные и системно зависимые константы

Table 1
The universal and system specific constants

Экспоненты	Значения	Амплитуды	Значения
γ	1,239	ξ_0	0,181 нм
Ψ	0,57	q_D^{-1}	0,217 нм
ν	0,630	Γ	0,0639
—	—	R	1,01

В проведенных расчетах амплитуда ξ_0 корреляционной длины для HFC-32 принята как для метана, равной 0,181 нм, а $T_r = 1,5T_{кр}$. Эффективная величина q_D , в принципе зависящая от температуры и давления, рассматривалась как постоянная, а сдвиговая вязкость — как не претерпевающая аномалий в области критической точки. Значения принятых в расчетах универсальных и системно зависимых констант иллюстрирует табл. 1 [8, 21].

Значение теплопроводности в критической области вычисляли согласно выражению

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_B, \quad (15)$$

где λ_B — регулярная или базовая теплопроводность в отсутствии критических флуктуаций, λ — экспериментальное значение теплопроводности.

Регулярную составляющую λ_B интерпретировали как сумму двух слагаемых

$$\lambda_B = \lambda_0 + \Delta\lambda(\rho, T). \quad (16)$$

Здесь λ_0 — теплопроводность в состоянии разреженного газа; $\Delta\lambda(\rho, T)$ — избыточная часть регулярной теплопроводности.

Интерес к диформетану стимулировал обширные экспериментальные исследования кинетических коэф-

фициентов и равновесных свойств этого хладагента. В табл. 2 приведен список экспериментальных работ по теплопроводности диформетана с указанием метода исследования, оценок погрешности измерений, диапазонов исследований и числа экспериментальных точек.

При обработке оригинальных опытных данных по теплопроводности использовались аналитические соотношения, рекомендованные авторами этих работ. В случае их отсутствия расчет вели по обобщенным зависимостям, полученным авторами настоящей работы по данным собственных измерений и опубликованных литературных источников.

Предложены соотношения для состояния разреженного газа

$$\lambda_0 = -7,056 + 5,239 \cdot 10^{-2} T + 3,921 \cdot 10^{-5} T^2 \quad (17)$$

и избыточной теплопроводности диформетана в состоянии жидкости или сжатого газа

$$\Delta\lambda(\rho, T) = 13,291(\omega\tau^{0,05}) + 16,850(\omega\tau^{0,05})^2, \quad (18)$$

где T — температура, К; ρ — плотность, кг/м³; $\omega = \rho/\rho_{кр}$; $\tau = T/T_{кр}$; $\rho_{кр}$, $T_{кр}$ — соответственно критические плотность и температура.

Равновесные свойства диформетана рассчитаны по единому уравнению состояния [32], полученному Рыковым С. В., Кудрявцевой И. В., Рыковым В. А., Полторацким М. И. и Свердловым А. В. на основе обработки наиболее значимых результатов измерений по сжимаемости и теплоемкости

$$Z(\rho, T) = Z(\rho, T)_B + Z(\rho, T)_{ir}, \quad (19)$$

где $Z = (\rho, T)_B$ — регулярная, базовая составляющая сжимаемости; $Z = (\rho, T)_{ir}$ — нерегулярная составляющая сжимаемости. В области малых плотностей уравне-

Таблица 2

Экспериментальные исследования теплопроводности диформетана

Table 2

Experimental study of thermal conductivity difluoromethane

Авторы	Год	Метод	Число опытных точек	Диапазон температур, К	Диапазон плотностей, кг·м ⁻³	Погрешность, %
Ята Дж. и др. [22]	1996	МНН (не стац.)	27	253,43–324,09	—	±1%
Гросс У., Зонг И. В. [23]	1996	МНН (не стац.)	80	233,45–344,95	1,79–1170,9	±1,6% (жидкость); ±2% (пар)
Пападаки М., Вейкхем В. А. [24]	1993	МНН (не стац.)	10	205,42–302,56	940,3–1261,4	±1%
Геллер В. З., Пападаки М. Е. [9]	1994	МНН (стац.)	122	253–427	1,663–689,1	±1% (критика ±5%)
Гребеньков А. Ж. и др. [25]	1994	МКЦ (стац.)	96	275,1–403,0	—	±3,5%
Ассаел М. Д., Каригианнис Л. [26]	1995	МНН (не стац.)	27	253,15–313,75	900–1161	±0,5%
Танака Дж. И др. [27]	1995	МНН (не стац.)	53	283,15–333,15	1,894–134,8	±1%
Ро С. Т. и др. [28]	1995	МНН (не стац.)	24	223,15–323,15	—	±2%
Сун Л.-К. и др. [29]	1997	МНН (не стац.)	20	254,51–341,76	—	±3%
Ро С. Т. и др. [30]	1997	МНН (не стац.)	24	232,65–322,95	—	±2%
Ленейндре Б. и др. [31]	2001	МКЦ (стац.)	613	299,22–465,61	1,35–1105,0	±1,5%
Цветков О. Б., Лаптев Ю. А. [15]	2014	МКЦ (стац.)	20	296,93–366,07	—	±2,5%
Цветков О. Б. и др. [16]	2016	МКЦ (стац.)	33	294,72–356,63	80–1000	±2,5% (критика ±5%)

Таблица 3

Температуропроводность дифторметана на изотермах $\tau = 1,00426$ и $\tau = 1,01684$

Table 3

Temperature conductivity of a difluoromethane on isotherms $\tau = 1.00426$ and $\tau = 1.01684$

ω	Величины						
	$\chi(T, \rho)$	$\chi(T_c, \rho)$	ξ , нм	Ω	Ω_0	$a_{\text{экс}} \cdot 10^8$, м ² /с	$a_{\text{рас}} \cdot 10^8$, м ² /с
	Изотерма $\tau = 1,00426$						
0,6849	4,575	0,134	1,299	1,165	0,024	1,257	1,559
1,2493	9,587	0,245	2,267	1,245	0,026	0,793	0,882
1,3170	5,622	0,258	1,701	1,324	0,051	1,200	1,402
1,5410	1,368	0,304	0,699	1,154	0,275	3,134	3,168
Изотерма $\tau = 1,01684$							
0,6870	2,727	0,135	1,174	1,214	0,030	1,452	2,325
0,9981	9,393	0,295	2,252	1,308	0,027	0,828	1,017
1,0993	6,961	1,320	1,766	1,246	0,053	0,921	1,186
1,3424	2,798	0,389	1,144	1,323	0,171	1,959	2,414

ние (19) переходит в вириальное уравнение состояния и удовлетворяет степенным законам масштабной гипотезы в асимптотической окрестности критической точки. Критическим индексам и критическим параметрам присвоены значения: $\alpha = 0,11$; $\beta = 0,325$; $\gamma = 1,24$; $T_{\text{кр}} = 351,25496$ К; $\rho_{\text{кр}} = 424$ кг/м³; $p_{\text{кр}} = 5,78246$ МПа [32]. Рассчитаны значения плотности, давлений, изохорной и изобарной теплоемкости, восприимчивости в регулярной части термодинамической поверхности и вблизи критической точки.

Табл. 3 иллюстрирует результаты расчетов температуропроводности дифторметана согласно (9) ($a_{\text{рас}}$) на изотермах $\tau = 1,00426$ и $\tau = 1,01684$ и на основании совместной обработки данных по теплопроводности и расчетов равновесных свойств по уравнению состояния ($a_{\text{экс}}$).

Выявлено, что температуропроводность уменьшается с приближением к критической области, причем минимум на изотермах тем более заметный, чем ближе

температура критической точки. Как показывает табл. 3, результаты, полученные из экспериментов, подтверждают выводы теории.

Выводы

В работах по исследованию аномального поведения характеристик рабочих веществ техники низких температур в критической точке, как правило, используют локальные и произвольные эмпирические функции.

Теоретически обоснованный кроссоверный формализм Олькови — Зенгерса, апробированный в настоящей работе для интерпретации сингулярности температуропроводности дифторметана, показал свою доброкачественность при описании конкретных экспериментальных данных и возможную перспективность для прогностических оценок свойств переноса новых веществ в области сингулярностей, сопровождающих окрестность критической точки.

Литература

- Новиков И. И. Термодинамика спинодалей и фазовых переходов. — М.: Наука, 2000. 165 с.
- Алтунин В. В. Теплофизические свойства двуокиси углерода. — М.: Изд-во стандартов, 1975. 546 с.
- Тарзиманов А. А., Сальманов Р. С. Перенос тепла за счет естественной конвекции в узких цилиндрических зазорах. Сб. научн. тр. «Теплофизические свойства газов» — М.: Наука, 1976. С. 49–51.
- Амирханов Д. Г. Экспериментальное исследование температуропроводности двуокиси углерода в окрестности критической области: автореф. дисс. канд. техн. наук. — Казань: КХТИ, 1973.
- Sengers J. V. Thermal conductivity measurements at elevated gas densities including the critical region: Ph. D. Thesis. — Amsterdam: University of Amsterdam, 1962. 126 p.
- Иванов Д. Ю. Критическое поведение неидеализированных систем. — М.: Физматлит, 2003. 248 с.

References

- Novikov I. I. Thermodynamics spinodals and phase transitions. Moscow, Nauka, 2000. 165 p. (in Russian)
- Altunin V. V. Thermophysical properties of carbon dioxide. Moscow, Publishing house of standards, 1975. 546 p. (in Russian)
- Tarzimanov A. A., Salmanov R. S. heat Transfer due to natural convection in a narrow cylindrical gaps. Collection of scientific papers «Thermophysical properties of gases». Moscow, Nauka, 1976. p. 49–51. (in Russian)
- Amirkhanov D. G. Experimental study of the thermal conductivity of carbon dioxide near critical region: the dissertation author's Ph. D. Kazan, 1973. (in Russian)
- Sengers J. V. Thermal conductivity measurements at elevated gas densities including the critical region: Ph. D. Thesis. Amsterdam: University of Amsterdam, 1962. 126 p.
- Ivanov D. Y. Critical behavior deidealization systems. Moscow, Fizmatlit, 2003. 248 p. (in Russian)

7. Sirota A. M., Latynin V. I., Belyaeva G. M. Экспериментальное исследование максимумов теплопроводности воды в критической области// Теплоэнергетика. 1973. № 8. С. 9–11.
8. Sakonidou E. P., Van den Berg H. R., Ten Seldam C. A., Sengers J. V. The thermal conductivity of methane in the critical region // *J. Chem. Phys.* 1996. Vol. 105 (23). P. 10535–10555.
9. Geller V. Z., Paulaitis M. E. Thermal conductivity of difluoromethane (HFC-32) in the supercritical region // Prepr. 12th Symposium on Thermophysical Properties, Boulder, USA, 1994.
10. Hahne E., Gross U., Song Y. W. The thermal conductivity of R115 in the critical region// *Int. J. Thermophys.* 1989. Vol. 10, No 3. P. 687–700.
11. Prasad R. C., Wang G., Venart J. E. S. The thermal conductivity of propane// *Int. J. Thermophys.* 1989. Vol. 10, no 5. P. 1013–1027.
12. Tufeu R., Desmarest Ph., Le Neindre B. Decay rate of critical fluctuations in steam and in dilute steam — NaCl mixtures // *Int. J. Thermophys.* 1989. Vol. 10, No 2. P. 397–408.
13. Olchowy G. A. Crossover from singular to regular behavior of the transport properties of fluids in the critical region / PhD thesis, Univ. of Maryland, 1989.
14. Castro de N. C. F., Roder H. M. The thermal conductivity of argon at 300,65 K; evidence for a critical enhancement// 8th Symposium on Thermophysical Properties. Abstracts. Gaithersburg, 1981. 132 p.
15. Цветков О. Б., Лантев Ю. А. О теплопроводности дифторметана (HFC — 32) в состоянии разреженного газа// Вестник Международной академии холода. 2014. № 3. С. 22–26.
16. Цветков О. Б., Лантев Ю. А., Рыков С. В., Галахова Н. А., Исмагилов Н. Г. О теплопроводности R32 в критической области// Вестник Международной академии холода. 2016. № 4. С. 80–84.
17. Целиков В. Н. Кигалийская поправка к Монреальскому протоколу по веществам, разрушающим озоновый слой: перспективы и последствия// Холодильная техника. 2017. № 4. С. 4–6.
18. Цветков О. Б., Лантев Ю. А. Постпарижские синдромы устойчивого развития техники низких температур // Холодильная техника. 2016. № 4. С. 19–22.
19. Филиппов Л. П. Исследование теплопроводности жидкостей. — М.: Изд-во МГУ, 1970. 239 с.
20. Фишер М. Природа критического состояния. — М.: Мир, 1968. 222 с.
21. Olchowy G. A., Sengers J. V. A simplified representation for the thermal conductivity of fluids in the critical region// *Int. J. Thermophys.* 1989. Vol. 2, № 2. P. 417–426.
22. Yata J., Hori M., Kobayashi K., Minaniyama T. Thermal conductivity of alternative refrigerants in the liquid phase// *Int. J. Thermophys.* 1996. Vol. 17, No 3. P. 561–571.
23. Gross U., Song Y. W. Thermal conductivities of new refrigerants R125 and R32 measured by the transient hot-wire method // *Int. J. Thermophys.* 1996. Vol. 17, No 3. P. 607–619.
24. Papadaki M., Wakeham W. A. Thermal conductivity of R32 and R125 in the liquid phase at the saturation vapor pressure // *Int. J. Thermophys.* 1993. Vol. 14. P. 1215–1220.
25. Experimental study of thermal conductivity of some refrigerants and speed of sound in their liquid phase/ A. J. Grebenkov, Yu. G. Kotelevsky, V. V. Saplitza, O. V. Beljaeva, T. A. Zajatz, B. D. Timofeev // *Proc. Commission B1 IIR, Padova, 1994. P. 419–429.*
7. Sirota A. M., Latynin V. I., Belyaeva G. M. Experimental study of the maxima of the thermal conductivity of water in the critical region. *Teploenergetika*. 1973. No. 8. P. 9–11. (in Russian)
8. Sakonidou E. P., Van den Berg H. R., Ten Seldam C. A., Sengers J. V. The thermal conductivity of methane in the critical region. *J. Chem. Phys.* 1996. Vol. 105 (23). P. 10535–10555.
9. Geller V. Z., Paulaitis M. E. Thermal conductivity of difluoromethane (HFC-32) in the supercritical region. Prepr. 12th Symposium on Thermophysical Properties, Boulder, USA, 1994.
10. Hahne E., Gross U., Song Y. W. The thermal conductivity of R115 in the critical region. *Int. J. Thermophys.* 1989. Vol. 10, No 3. P. 687–700.
11. Prasad R. C., Wang G., Venart J. E. S. The thermal conductivity of propane. *Int. J. Thermophys.* 1989. Vol. 10, no 5. P. 1013–1027.
12. Tufeu R., Desmarest Ph., Le Neindre B. Decay rate of critical fluctuations in steam and in dilute steam — NaCl mixtures. *Int. J. Thermophys.* 1989. Vol. 10, No 2. P. 397–408.
13. Olchowy G. A. Crossover from singular to regular behavior of the transport properties of fluids in the critical region. PhD thesis, Univ. of Maryland, 1989.
14. Castro de N. C. F., Roder H. M. The thermal conductivity of argon at 300,65 K; evidence for a critical enhancement. 8th Symposium on Thermophysical Properties. Abstracts. Gaithersburg, 1981. 132 p.
15. Tsvetkov O. B., Laptev Yu. A. On the thermal conductivity of deformity (HFC — 32) in the state of rarefied gas. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2014. No. 3. P. 22–26. (in Russian)
16. Tsvetkov O. B., Laptev Yu. A., Rykov S. V. Galakhova N. A., Ismagilov N. G. On the thermal conductivity of R32 in the critical region. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2016. No. 4. P. 80–84. (in Russian)
17. Tselikov V. N. Kigali amendment to the Montreal Protocol on substances that Deplete the ozone layer: prospects and implications. *Kholodil'naya Tekhnika*. 2017. No. 4. p. 4–6. (in Russian)
18. Tsvetkov O. B., Laptev Yu. A. Postalische syndromes of sustainable development technique of low temperatures. *Kholodil'naya Tekhnika*. 2016. No. 4. p. 19–22. (in Russian)
19. Filippov L. P. Study of thermal conductivity of liquids. Moscow, Izd-vo MGU, 1970. 239 p. (in Russian)
20. Fisher M. Nature of a critical state. Moscow, Mir, 1968. 222 p. (in Russian)
21. Olchowy G. A., Sengers J. V. A simplified representation for the thermal conductivity of fluids in the critical region. *Int. J. Thermophys.* 1989. Vol. 2, No 2. P. 417–426.
22. Yata J., Hori M., Kobayashi K., Minaniyama T. Thermal conductivity of alternative refrigerants in the liquid phase. *Int. J. Thermophys.* 1996. Vol. 17, No 3. P. 561–571.
23. Gross U., Song Y. W. Thermal conductivities of new refrigerants R125 and R32 measured by the transient hot-wire method. *Int. J. Thermophys.* 1996. Vol. 17, No 3. P. 607–619.
24. Papadaki M., Wakeham W. A. Thermal conductivity of R32 and R125 in the liquid phase at the saturation vapor pressure. *Int. J. Thermophys.* 1993. Vol. 14. P. 1215–1220.
25. Experimental study of thermal conductivity of some refrigerants and speed of sound in their liquid phase/ A. J. Grebenkov, Yu. G. Kotelevsky, V. V. Saplitza, O. V. Beljaeva, T. A. Zajatz, B. D. Timofeev. *Proc. Commission B1 IIR, Padova, 1994. P. 419–429.*

26. Assael M. J., Karagiannidis L. Measurements of thermal conductivity of liquid R32, R124, R125, and R141b // *Int. J. Thermophysics*. 1995. Vol. 16, No 4. P. 851–865.
27. Tanaka Y., Matsua S., Taya S. Gaseous thermal conductivity of difluoromethane (HFC-32), pentafluoroethane (HFC-125) and their mixtures // *Int. J. Thermophysics*. 1995. Vol. 16. No 1. P. 121–131.
28. Ro S. T., Kim J. Y., Kim D. S. Thermal conductivity of R32 and its mixtures with R134a // *Intern. J. Thermophysics*. 1995. Vol. 16, N 5. P. 1193–1201.
29. Sun Li-Qun, Zhu Ming-Shan, Han Li-Zhong, Lin Zhao-Zhuang. Thermal conductivity of gaseous difluoromethane and pentafluoromethane near the saturation line // *J. Chem. Eng. Data*. 1997. Vol. 42, № 1. P. 179–182.
30. Ro S. T., Kim M. S., Jeong S. U. Liquid thermal conductivity of binary mixtures of difluoromethane (R32) and pentafluoroethane (R125) // *Int. J. Thermophysics*. 1997. Vol. 18, no 4. P. 991–999.
31. Le Neindre B., Garrabos Y. Measurements of the thermal conductivity of HFC-32 (difluoromethane) in the temperature range from 300 to 465 K at pressures up to 50 MPa // *Int. J. Thermophysics*. 2001. Vol. 22, no 3. P. 701–722.
32. Рыков С. В., Кудрявцева И. В., Рыков В. А., Полторацкий М. И., Сverdlov A. B. Уравнение состояния хладагента R32 // *Холодильная техника*. 2016. № 11. С. 34–37.
26. Assael M. J., Karagiannidis L. Measurements of thermal conductivity of liquid R32, R124, R125, and R141b. *Int. J. Thermophysics*. 1995. Vol. 16, No 4. P. 851–865.
27. Tanaka Y., Matsua S., Taya S. Gaseous thermal conductivity of difluoromethane (HFC-32), pentafluoroethane (HFC-125) and their mixtures. *Int. J. Thermophysics*. 1995. Vol. 16. No 1. P. 121–131.
28. Ro S. T., Kim J. Y., Kim D. S. Thermal conductivity of R32 and its mixtures with R134a. *Int. J. Thermophysics*. 1995. Vol. 16, N 5. P. 1193–1201.
29. Sun Li-Qun, Zhu Ming-Shan, Han Li-Zhong, Lin Zhao-Zhuang. Thermal conductivity of gaseous difluoromethane and pentafluoromethane near the saturation line. *J. Chem. Eng. Data*. 1997. Vol. 42, No 1. P. 179–182.
30. Ro S. T., Kim M. S., Jeong S. U. Liquid thermal conductivity of binary mixtures of difluoromethane (R32) and pentafluoroethane (R125). *Int. J. Thermophysics*. 1997. Vol. 18, no 4. P. 991–999.
31. Le Neindre B., Garrabos Y. Measurements of the thermal conductivity of HFC-32 (difluoromethane) in the temperature range from 300 to 465 K at pressures up to 50 MPa. *Int. J. Thermophysics*. 2001. Vol. 22, no 3. P. 701–722.
32. Rykov S. V., Kudryavtseva I. V., Rykov V. A., Poltoratsky M. I., Sverdlov V. A. Equation of state of refrigerant of R32. *Kholodil'naya Tekhnika*. 2016. No. 11. p. 34–37. (in Russian)

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_jar@irbt-itmo.ru

Клецкий Александр Владимирович

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

Галахова Наталья Александровна

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

Kletskii Aleksandr Vladimirovich

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

Galakhova Natalia Aleksandrovna

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