

УДК 561.22

НОВАЯ КОРРЕЛЯЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ЖИДКИХ ГИДРОФТОРХЛОРПРОИЗВОДНЫХ ОЛЕФИНОВ, ГИДРОФТОРУГЛЕРОДОВ И ГИДРОХЛОРФТОРУГЛЕРОДОВ

© 2023 г. С. В. Рыков*, И. В. Кудрявцева, В. А. Рыков

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: togg1@yandex.ru

Поступила в редакцию 26.01.2023 г.

После доработки 25.04.2023 г.

Принята к публикации 11.05.2023 г.

Разработана корреляционная зависимость теплопроводности λ_s жидких хладагентов на линии насыщения в виде простой функции от температуры T : $\lambda_s/\lambda_0 = (1 + \tau)^2 + A\tau^{-X}$ (где λ_0 – критериальная единица, $\tau = 1 - T/T_c$, T_c – критическая температура). Данная зависимость удовлетворяет требованиям динамической масштабной теории, в частности предельному переходу $\lambda_s(T \rightarrow T_c) \rightarrow +\infty$. Предложенная корреляционная зависимость апробирована на примере описания теплопроводности 17 жидких веществ в диапазоне параметров состояния от линии насыщения до критического давления p_c , в интервале температур от температуры тройной точки T_{tr} до T_c . Рассмотренные вещества включают девять хладагентов четвертого поколения – гидрофторхлорпроизводных олефинов, семь гидрохлорфторуглеродов и гидрофторуглеродов, а также C_3H_8 . На примере описания λ_s C_3H_8 показано, что предложенная корреляционная зависимость не только качественно, но и количественно точно передает поведение λ_s в окрестности критической точки. На основе статистического анализа показано, что предложенная корреляция с существенно меньшей неопределенностью описывает данные о теплопроводности жидких гидрофторхлорпроизводных олефинов как на линии насыщения, так и в однофазной области. На основе предложенной методики впервые в интервале температур $134.3 \leq T \leq 373.15$ К рассчитана теплопроводность цис-изомера R1225ye(Z).

DOI: 10.31857/S0040364423050149

ВВЕДЕНИЕ

В связи с появлением большого числа новых холодильных агентов четвертого поколения стала актуальной задача получения новой информации об их теплофизических свойствах. Именно поэтому в настоящее время активно разрабатываются корреляционные зависимости для расчета теплопроводности λ жидких гидрофторхлорпроизводных олефинов – гидрофторолефинов (ГФО) и гидрохлорфторолефинов (ГХФО), гидрохлорфторуглеродов (ГХФУ) и гидрофторуглеродов (ГФУ) – на линии насыщения в области параметров состояния от тройной и до критической точек [1–8]. В принципе корреляционные зависимости, предназначенные для описания теплопроводности λ_s на линии насыщения, могут быть использованы [9] и для расчета λ в однофазной области в диапазоне от жидкостной ветви линии насыщения и до критического давления p_c . Однако в настоящее время отсутствуют корреляционные зависимости, которые с неопределенностью, близкой к экспериментальной, передают данные о λ жидких ГФО,

ГХФО, ГХФУ, ГФУ и пропана в данном интервале температур. Исключение, как показал анализ авторов [1], составляет корреляционная зависимость [8]. Однако для того, чтобы выполнять расчет λ_s в рамках подхода [8], необходимо иметь в качестве исходной информации данные о теплопроводности исследуемого вещества при температуре тройной точки T_{tr} , $\lambda_{tr} = \lambda(T_{tr})$ и при $T = 0.9T_c$, $\lambda_{09} = \lambda(T_{09})$, где T_c – критическая температура. Это требование не позволяет использовать данный подход к прогнозированию свойств новых хладагентов, для которых информация о λ или имеется только для узкого интервала температур, или, как в случае R1225ye(Z) [10], полностью отсутствует.

Цель данной работы – разработать корреляционную зависимость, которая: а) учитывает особенность критической точки в соответствии с динамической масштабной теорией; б) описывает теплопроводность [10–20] жидких гидрофторхлорпроизводных олефинов и гидрохлорфторуглеродов [21–42], а также пропана [43] в интервале от T_{tr} до T_c и до p_c и позволяет на основе мини-

мальной информации прогнозировать теплопроводность новых хладагентов ГФО и ГХФО в указанном диапазоне температур и давлений.

АНАЛИЗ ИЗВЕСТНЫХ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

Корреляционные модели [1–7] описывают теплопроводность λ_s жидких ГФО, ГХФО, ГХФУ, ГФУ на линии насыщения с различной точностью [1]. Однако ряд корреляций имеют общий недостаток — при описании λ_s цис- и транс-изомеров теплопроводность одного из этих изомеров описывается с существенно меньшей точностью, чем λ_s другого изомера, как это наблюдается в случае линейной корреляции [3]

$$\frac{\lambda_s}{\lambda_0} = a + bT_{rb}. \quad (1)$$

Здесь $T_{rb} = T/T_{nb}$; T_{nb} — температура кипения при нормальном давлении; a, b — постоянные коэффициенты; λ_0 — критериальная единица [44], которая в рамках подхода [3, 4] имеет вид

$$\lambda_0 = \xi^{-1} \text{Gu}^{-4}, \quad (2)$$

где $\text{Gu} = T_c/T_{nb}$; $\xi = M^{\frac{1}{2}} T_c^{\frac{1}{6}} p_c^{\frac{2}{3}}$, M — молярная масса.

Модель (1) описывает данные о λ_s транс-изомера R1234ze(E) [14] с $AAD = 0.68\%$ и $S = 0.19\%$, а λ_s цис-изомера R1234ze(Z) [10] с $AAD = 4.8\%$, $S = 1.24\%$. Здесь S и AAD [45]:

— стандартная относительная неопределенность

$$S = \sqrt{\sum_{n=1}^N \frac{\delta\lambda_n^2}{N(N-1)}}, \quad (3)$$

— абсолютное среднее отклонение

$$AAD = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |\delta\lambda_n|, \quad (4)$$

где N — количество экспериментальных данных $\lambda_{s,n}^{\text{exp}} - T_n$; $\delta\lambda_n = (\lambda_{s,n}^{\text{exp}} - \lambda_{s,n}^{\text{calc}}) / \lambda_{s,n}^{\text{exp}} \times 100, \%$; $\lambda_{s,n}^{\text{calc}}$ — значение $\lambda_s(T_n)$ (1).

В [1] предложена корреляция

$$\lambda_s(T) = \lambda_0 (C_1 + C_2\tau + C_3\tau^2), \quad (5)$$

в которой A, C_1, C_2, C_3 — постоянные коэффициенты; $\tau = 1 - T/T_c$;

$$\lambda_0 = \frac{P_c}{M^{1/5} T_c^{1/5} \text{Gu}^3} + 1.75\omega^{2.4},$$

где ω — ацентрический фактор.

Корреляция (5) так же, как и (1), описывает данные о λ_s одного из изомеров — транс-изомера R1234ze(E) [14] ($AAD = 0.786\%$, $S = 0.195\%$) — су-

щественно лучше, чем λ_s другого изомера — цис-изомера R1234ze(Z) [10] ($AAD = 6.81\%$, среднеквадратичное отклонение — 1.76%).

В [46] предложена корреляционная модель λ_s в виде (1), (2) с набором коэффициентов a и b , отличным от [3]. Там же заявлено, что предложенная корреляция (1) с $a = 2.3829$ и $b = -1.1566$ предназначена для расчета λ_s R1234ze(Z), R1234ze(E), R1233zd(E), R1224yd(Z), R1234yf. Авторские расчеты показали, что (1) [46] описывает λ_s этих хладагентов соответственно с AAD , равным: 2.98% [10], 2.45% [14], 3.60% [12], 3.66% [11], 4.99% [14]. С наибольшей неопределенностью [46] передает λ_s [20] R1234yf: $AAD = 6.53\%$. Как следует из [1], линейная корреляция [46] имеет существенно худшие расчетные характеристики по сравнению с [3]. Например, (5) описывает λ_s R1234yf из [14, 20] соответственно с $AAD = 0.66$ и 0.84% , а [46] с $AAD = 4.99$ и 6.53% . В [46] ставилась также еще одна задача: повысить точность расчета λ_s R1234ze(Z) на основе данных о теплопроводности R1234ze(E) с помощью введения в структуру (1) множителя α :

$$\frac{\lambda_s}{\lambda_0} = (a + bT_{rb})\alpha, \quad (6)$$

где $\alpha = 1.113$ и $\alpha = 1.0$ при расчете λ_s R1234ze(Z) и R1234ze(E) соответственно.

С целью проверить предложенный метод повышения точности (1) по формуле (6) с $\alpha = 1.113$ и $\alpha = 1.0$ рассчитана λ_s R1234ze(Z) и проведено сравнение с данными λ_s^{exp} [10]. Оказалось, что AAD (6) при $\alpha = 1.113$ и $\alpha = 1.0$ равно соответственно 7.9 и 2.27% . Таким образом, введение в структуру (1) множителя $\alpha \neq 1$ только увеличило неопределенность описания λ_s R1234ze(Z).

При расчетах λ_s использованы физические характеристики хладагентов, приведенные в табл. 1.

В настоящее время для расчета и прогнозирования теплопроводности в однофазной области и на линии насыщения все шире используются корреляции $\lambda = \lambda(\rho, T)$, в рамках которых учитываются особенности критической точки [61, 62]:

$$\lambda = \lambda(\rho, T) = \lambda^0(T) + \lambda^r(\rho, T) + \lambda^{\text{cr}}(\rho, T),$$

где $\lambda^0(T), \lambda^r(\rho, T)$ — регулярные функции; $\lambda^{\text{cr}}(\rho, T)$ — нерегулярная функция, учитывающая особенности поведения теплопроводности в окрестности критической точки в соответствии с динамической масштабной теорией [63].

В рамках [61, 62] для расчета λ_s в окрестности критической точки, строго говоря, необходимо иметь уравнения состояния $p = p(\rho, T)$, которые отвечают требованиям масштабной теории (МТ) [64], или уравнения линии насыщения, также

Таблица 1. Физические свойства рассматриваемых веществ

Вещество	T_c , К	T_{nb} , К	p_c , МПа	M , г/моль	ω	Источник
R1234yf	367.85	243.67	3.3822	114.04159	0.27669*	[47, 48]
R1224yd(Z)	428.69	287.15	3.337	148.487	0.32388*	[11, 49]
R1233zd(E)	439.6	291.41	3.6237	130.4944	0.30128*	[12, 50]
R1234ze(E)	382.513	254.21	3.6349	114.0416	0.31317*	[51, 52]
R1234ze(Z)	423.27	282.878	3.5306	114.0416	0.322948*	[53]
R1243zf	376.93	247.76	3.5179	96.05113	0.26016*	[53]
R1336mzz(E)	403.53	280.58	2.7792	164.05	0.41240*	[17, 54]
R1336mzz(Z)	444.5	306.5	2.903	164.056	0.38563*	[55]
R123	456.83	300.973	3.6619	152.931	0.28192	[56]
R134a	374.21	247.076	4.05928	102.0309	0.32684	[56]
R142b	410.26	264.03	4.0548	100.495	0.232	[56]
R143a	345.86	225.909	3.7618	84.0404	0.2615	[56]
R152a	386.41	249.127	4.5168	66.05	0.27521	[56]
R245fa	427.01	288.05	3.6366	134.04794	0.3724	[56]
R365mfc	460.0	313.35	3.266	148.07452	0.377129*	[57, 58]
Пропан	369.89	231.06	4.2512	44.095642	0.1524	[59]
R1225ye(Z)	380.05	253.604*	3.529	132.03	0.31972*	[60]

* Рассчитаны авторами данной работы на основе литературных данных о давлении насыщенного пара исследованных веществ.

разработанные в рамках МТ. Такие уравнения активно разрабатываются, в том числе и для ГФО, ГХФО [65–67]. Однако, например, в [61] при расчете $\lambda = \lambda(p, T)$ используются фундаментальные уравнения состояния (ФУС), не учитывающие требования МТ. Например, в случае R1243zf в [61] используется ФУС [53]. Расчетные неопределенности для теплопроводности жидких хладагентов R1224yd(Z), R1234ze(Z), R1336mzz(Z) на линии насыщения, а R1243zf в однофазной области оценены авторами [61]: 20, 3, 3, 10% соответственно. Для оценки точности описания R1336mzz(Z) в [61] использованы только данные [18] (2017), в настоящей работе учитываются также данные [19] (2020), которые систематически отклоняются от данных [18] на 5–8%. Наиболее точная информация о λ_s из рассмотренных в [61] пяти хладагентов ГФО и ГХФО имеется для R1234ze(Z) [10]. В случае R1234ze(Z), как показал анализ, корреляции (1) [3], (5) [1], (6) [46, 4–8] описывают экспериментальные данные о λ_s [10] с $AAD = 4.8\%$, 6.81, 7.9, 1.87, 0.71, 3.6, 8.7, 0.70. С меньшей неопределенностью, чем [61], данные [10] описывают корреляции [4, 5, 8]. К недостаткам корреляции [8], как отмечалось во Введении, относится требование о включении в исходную информацию сведений о λ_s исходного вещества. Данные о λ_s R1336mzz(Z) [18] корреляции [4, 5] передают соответственно с

$AAD = 5.3\%$ и 7.2, т.е. с существенно большей неопределенностью, чем [61].

Можно сделать вывод, что для описания λ_s с малой неопределенностью (в пределах 3%) корреляции [61, 62] требуют значительно больше исходной информации о свойствах исследуемого вещества, чем корреляции [1–7]. В случае отсутствия точной информации о теплопроводности неопределенность при прогнозировании λ составляет, как в случае с R1224yd(Z) и R1243zf, 10–20%.

В данном исследовании решается задача разработки корреляционной модели, которая при описании λ_s ГФО и ГХФО: а) превосходит по своим расчетным характеристикам известные корреляционные модели; б) описывает λ_s транс- и цис-изомеров в пределах неопределенности экспериментальной информации о λ_s этих изомеров; в) позволяет на основе ограниченной информации (T_c , T_{nb} , p_c , M , ω) прогнозировать λ_s ГФО и ГХФО (на примере R1225ye(Z), R1234ze(Z)); г) описывает поведение λ_s в асимптотической окрестности критической точки в соответствии с требованиями динамической масштабной теории [63, 64, 68] корреляциями [61, 62], в рамках которых сингулярная компонента теплопроводности $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_{\text{рег}}$ на критической изохоре и линии насыщения описывается зависимостью $\Delta\lambda = \lambda^* |\tau|^{-\chi}$, где χ – критический индекс, λ^* – индивидуальная постоянная.

НОВАЯ КОРРЕЛЯЦИОННАЯ ЗАВИСИМОСТЬ $\lambda = \lambda(T)$

На основе анализа экспериментальных данных [11–20] разработана корреляционная модель, которая содержит две компоненты:

$$\frac{\lambda_s}{\lambda_0} = f_r(\tau) + f_{nr}(\tau), \quad (7)$$

где $f_r(\tau)$ – регулярная функция $\tau = 1 - T_r$; $T_r = T/T_c$; $f_{nr}(\tau)$ – нерегулярная функция τ .

Компонента $f_r(\tau)$ выбрана на основе анализа данных [1–9, 11–20] в виде

$$f_r(\tau) = (1 + \tau)^2. \quad (8)$$

Компонента $f_{nr}(\tau)$ выбрана в соответствии с требованиями масштабной теории:

$$f_{nr}(\tau) = a\tau^{-\chi}\varphi(T_r),$$

где a – постоянный коэффициент; $\varphi(T_r)$ – кроссоверная функция.

В рамках предложенного подхода сингулярная составляющая $\Delta\lambda$ теплопроводности на линии насыщения имеет вид $\Delta\lambda = \lambda_0 a \tau^{-\chi} \varphi(T_r)$, где $\lambda_0 a$ – индивидуальный коэффициент, так как критериальная единица λ_0 определяется для каждого вещества на основе его индивидуальных характеристик. Значение критического индекса χ выбрано на основе рекомендаций [68, 69]: $\chi = 0.61$. Это значение χ согласуется с [62], где принято $\chi = 0.609$.

Зависимость (7) позволяет описать теплопроводность жидкого хладагента на линии насыщения от T_{tr} до T_c .

Наряду с зависимостью (7) рассмотрен ее частный случай, непосредственно следующий из (8) и предназначенный для описания теплопроводности в интервале температур от T_{tr} до $0.98T_c$:

$$\sqrt{\frac{\lambda_s}{\lambda_0}} = 1 + \tau. \quad (9)$$

Согласно (9), в рамках данного подхода критериальная единица λ_0 , в отличие от подходов [1–4], имеет определенный физический смысл. Действительно, из (9) следует, что в критической точке выполняется равенство

$$\lambda_s(T = T_c) = \lambda_0.$$

Таким образом, корреляционная единица λ_0 в рамках предложенного подхода совпадает со значением регулярной составляющей теплопроводности (7) в критической точке.

В данном исследовании критериальная единица λ_0 выбрана в виде

$$\lambda_0 = \frac{\tilde{T}_{nb}^v \tilde{p}_c}{\tilde{M}^l \tilde{T}_c^g \omega^\eta} \lambda_1, \quad (10)$$

где v, l, g, η – постоянные параметры; $\tilde{T}_{nb} = T_{nb}/T_0$, $\tilde{T}_c = T_c/T_0$, $T_0 = 1$ К; $\tilde{p}_c = p_c/p_0$, $p_0 = 1$ МПа; $\tilde{M} = M/M_0$, $M_0 = 1$ г/моль; $\lambda_1 = 1$ Вт/(м К).

Кроссоверная функция выбрана по аналогии с [70] в виде экспоненты:

$$\varphi(t) = \exp(-c\sqrt{\tau}/T_r),$$

где c – универсальный параметр.

Параметры v, l, g, η в (10) найдены на основе данных [11–20] с помощью компьютерной программы SVD [71] по минимуму функционала

$$\Phi = \sum_{n=1}^N \Omega_n (\lambda_{s,n}^{\text{exp}} - \lambda_{s,n}^{\text{calc}})^2, \quad (11)$$

где $\lambda_{s,n}^{\text{exp}} = \lambda_{s,n}^{\text{exp}}(T_n)$ – экспериментальное значение теплопроводности [11–20]; $\lambda_{s,n}^{\text{calc}} = \lambda_s(T_n)$ – значение λ_s (7); Ω_n – “вес” экспериментальной точки $\lambda_{s,n}^{\text{exp}} - T_n$.

В результате получено $v = 8.548425011863$, $l = 0.6274806067016$, $g = 8.203363697562$, $\eta = 0.1075301331766$, $\chi = 0.61$, $a = 0.153$.

Затем на основе анализа экспериментальной информации [11–20] и результатов [63, 68] выбран параметр $c = 20$ таким, чтобы отношение $\phi = \Delta\lambda/\lambda_s$ при $T_r = 0.9953$ удовлетворяло условию $\phi \approx 0.5$. Выбор $\phi = 0.5$ при $T_r = 0.9953$ обусловлен тем, что, как следует из анализа графической информации [62], в случае насыщенной жидкости критическое усиление теплопроводности при температуре $T = (0.996 \pm 0.0015)T_c$ достигает 50% (рис. 1, маркер 8). Значение $T_r = 0.9953$ принадлежит указанному температурному интервалу, а отклонение $\delta\lambda = 100(\lambda_s^{\text{exp}} - \lambda_s^{\text{calc}})/\lambda_s^{\text{exp}}$ (в %) значения λ_s^{calc} , рассчитанного на основе (7), от значения $\lambda_s^{\text{exp}} = 0.2431$ Вт/(м К) [1, 72] составляет 0.07% (рис. 1, маркер 5).

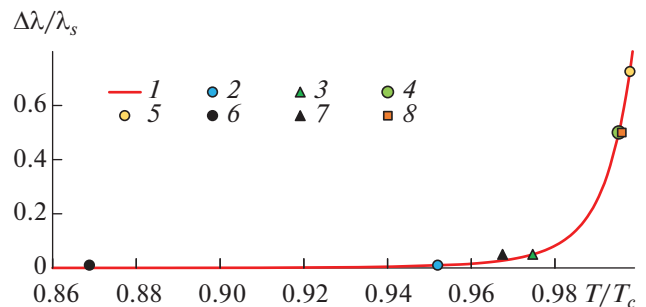


Рис. 1. Степень влияния критического усиления $\phi = \Delta\lambda/\lambda_s$: 1 – результаты расчета по (7); 2 – граница критического усиления 1%, 3 – 5%, 4 – 50%; 5 – пропан (0.2431 Вт/(м К), 369.12 К) [1, 72]; 6 – граница критического усиления 1%, 7 – 5%, 8 – 50% по результатам [62].

Точность расчета λ_s для ряда хладагентов оценивалась на основе статистических характеристик (3), (4) и [45]:

$$BIAS = \sum_{n=1}^N \frac{\delta\lambda_n}{N}, \quad SDV = \sqrt{\sum_{n=1}^N \frac{(\delta\lambda_n - BIAS)^2}{N-1}}, \quad (12)$$

$$RSM = \sqrt{\sum_{n=1}^N \frac{\delta\lambda_n^2}{N}}.$$

Для оценки точности предложенной корреляции использовалась характеристика $MARD = \max|\delta\lambda_n|$ для каждой группы экспериментальных данных ГФО и ГФХО из табл. 1.

Точность расчетов по предложенной методике не уступает [1] (хорошие расчетные характеристики корреляций [1] отмечены в [73]) для R1234yf, R1336mzz(E), R1336mzz(Z), но существенно выше в случае цис-изомера R1234ze(Z): по (5) — $AAD = 6.81\%$, (7), (9) — 0.61% (табл. 2), 0.57% (табл. 3).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для проверки точности (7) при описании λ_s ГФО и ГФХО рассчитаны статистические характеристики (3), (4), (12) и $MARD$ (табл. 3).

Точности описания λ_s корреляциями (7), (9) в диапазоне $T_{tr} \leq T \leq 0.98T_c$ практически совпадают (табл. 2, 3). Но в окрестности критической точки (9) существенно уступает (7). Так, для пропана отклонение λ_s , рассчитанной на основе (9),

от значения (0.2431 Вт/(м К), 369.12 К) [72] достигает 60%. В то же время в случае (7), как отмечено выше, это отклонение составляет 0.07%. Заметим, 0.2431 Вт/(м К) при 369.12 К получено в [1] путем экстраполяции экспериментальных данных [72] на изотерме $T = 369.12$ К на линию упругости пропана. Таким образом, корреляция (7) позволяет описывать λ_s в окрестности критической точки без потери точности при $T_{tr} \leq T \leq 0.98T_c$ и может использоваться для прогнозирования в отличие от (9) при $T > 0.98T_c$.

Выполнена проверка возможности использования корреляции (9) для прогнозирования λ в однофазной области в диапазонах давлений $p_s \leq p \leq p_c$ и температур $T_{tr} \leq T \leq 0.98T_c$. Результаты этого исследования приведены в табл. 4. Корреляция (9) описывает λ в однофазной области практически с той же точностью, как в случае λ_s (табл. 2). В указанной области параметров состояния корреляция (9) позволяет прогнозировать λ хладагентов (табл. 1) с той же точностью, что и (7). При этом использовать (7) для прогнозирования поведения λ в окрестности критической точки рекомендуется только на линии насыщения.

В табл. 4 приведены статистические характеристики для хладагента R1243zf, который отсутствует в табл. 2, 3. Это обусловлено тем, что для R1243zf имеются данные $\lambda-T$ только в однофазной области (всего восемь экспериментальных точек при $p < p_c$), и оказалось, что этого количе-

Таблица 2. Статистические характеристики λ_s (9)

Вещество	Источник	N	S	AAD	$BIAS$	SDV	СКО
R1234yf	[14, 20]	30	0.196	0.739	0.163	1.06	1.06
R1224yd(Z)	[11]	6	1.29	2.56	−0.445	3.11	2.87
R1233zd(E)	[12, 13]	19	0.347	1.24	−0.357	1.47	1.47
R1234ze(E)	[14, 20]	32	0.241	1.02	−0.399	1.3	1.34
R1234ze(Z)	[10]	7	0.311	0.61	−0.181	0.799	0.762
R1336mzz(E)	[16, 17]	18	1.32	4.76	0.977	5.51	5.44
R1336mzz(Z)	[18, 19]	21	1.16	4.1	−1.61	5.05	5.18
Все ГФО и ГФХО	—	133	0.27	2.03	−0.261	3.11	3.11
R245fa	[21, 22]	13	0.683	1.9	−0.292	2.44	2.37
R365mfc	[23]	8	2.36	4.87	−1.56	6.46	6.24
R123	[24–29]	82	0.227	1.78	1.41	1.48	2.04
R134a	[24, 25, 8–34]	78	0.569	4.24	2.9	4.1	5
R142b	[35–38]	17	0.854	2.84	2.51	2.39	3.42
R143a	[39, 40]	12	1.02	2.88	−0.238	3.52	3.37
R152a	[5, 35, 38, 39, 41, 42]	39	0.547	2.23	−1.18	3.2	3.37
Все ГФУ и ГХФУ	—	249	0.236	2.85	1.28	3.5	3.72
Пропан	[43]	13	0.832	2.18	1.86	2.29	2.88
Все вещества	—	395	0.176	2.55	0.782	3.42	3.5

Таблица 3. Статистические характеристики λ_s (7)

Вещество	Источник	N	S	AAD	$BIAS$	SDV	СКО	$MARD$
R1234yf	[20]	24	0.151	0.524	0.0801	0.734	0.723	1.9
R1234yf	[14]	6	0.515	0.903	−0.492	1.14	1.15	2.4
R1224yd(Z)	[11]	6	1.08	2	−1.01	2.4	2.41	4.28
R1233zd(E)	[12]	6	0.964	1.78	−1.71	1.44	2.16	3.92
R1233zd(E)	[13]	13	0.399	1.18	0.0797	1.44	1.38	3.08
R1234ze(E)	[20]	24	0.289	1	−0.753	1.19	1.39	3.06
R1234ze(E)	[14]	8	0.504	1.14	0.577	1.28	1.33	2.06
R1234ze(Z)	[10]	7	0.311	0.57	−0.181	0.8	0.762	1.49
R1336mzz(E)	[17]	11	1.15	3.27	−2.93	2.26	3.63	5.28
R1336mzz(E)	[16]	7	2.79	6.47	3.35	6.45	6.84	10.9
R1336mzz(Z)	[18]	10	2.08	5.05	−4.92	4.04	6.24	11
R1336mzz(Z)	[19]	11	1.16	3.06	1.18	3.65	3.67	6.57
Все вещества	—	133	0.26	1.95	−0.571	2.94	2.98	11

Таблица 4. Точность описания данных о λ ГФО и ГФХО (9) в однофазной области

Вещество	Источник	N	S	AAD	$BIAS$	SDV	СКО	$MARD$
R1234yf	[14]	76	0.131	0.955	0.117	1.13	1.13	2.57
R1224yd(Z)	[11]	46	0.314	1.61	−0.154	2.12	2.11	4.92
R1233zd(E)	[13]	193	0.1	1.2	0.489	1.3	1.39	2.78
R1233zd(E)	[12]	43	0.174	0.993	0.533	1	1.13	2.36
R1234ze(E)	[14]	89	0.161	1.3	0.82	1.27	1.51	2.85
R1243zf	[15]	8	1.34	2.86	−1.9	3.21	3.55	6.94
R1336mzz(E)	[16]	42	0.976	6.02	6.02	1.7	6.25	8.54
R1336mzz(E)	[17]	55	0.516	3.45	−3.05	2.28	3.79	6.69
R1336mzz(Z)	[18]	36	1.11	6.15	−6.15	2.3	6.55	9.36
R1336mzz(Z)	[19]	165	0.321	3.14	1.55	3.82	4.11	9.48
Все вещества	—	753	0.117	2.32	0.394	3.2	3.22	9.48

ства данных недостаточно, чтобы их экстраполировать по псевдоизотермам на линию насыщения. Как следует из сравнения табл. 2–4, точности описания теплопроводности остальных ГФО и ГФХО корреляциями (7), (9) в состоянии насыщения и в однофазной области сопоставимы. Например, для R1234yf и R1234ze(E) соответственно на линии насыщения $AAD = 0.739$, 1.02% (табл. 2), а в однофазной области $AAD = 0.955$, 1.3% (табл. 2). Так как для R1243zf в однофазной области $AAD = 2.8\%$ (табл. 4), то значение AAD для R1243zf оценивается на линии насыщения в 3%.

Отклонения λ_s ГФО и ГФХО (табл. 1), рассчитанных на основе (7) и (9), от соответствующих экспериментальных данных не превышают 11% на линии насыщения (табл. 2, рис. 2) и 9.48% в однофазной области (табл. 4).

Также оценена возможность использования (7), (9) для расчета λ_s ГХФУ и ГФУ (рис. 3, 4).

Предложенные корреляции описывают основной массив экспериментальной информации [21–42] о λ_s ГХФУ и ГФУ (табл. 1) в пределах $\delta\lambda = \pm 5\%$ (рис. 3, 4). Только в пяти из 249 экспериментальных точек [10–43] (табл. 1, рис. 3–4) на линии насыщения и в однофазной области $|\delta\lambda| > 10\%$. При этом при поиске на основе (11) параметров v , l , g , η для критериальной единицы λ_0 (10) “вес” каждой экспериментальной точки ГХФУ, ГФУ [21–42] и R1234ze(Z) [10] приравнен нулю: $\Omega_n = 0$.

Проведена оценка границ критического усиления теплопроводности на основе (7): в интервале изменения T_r от 0.952 до 0.9747 параметр ϕ растет от 1 до 5%, в интервале от 0.9747 до 0.9953 ϕ меняется от 5 до 50%, а при $T_r > 0.9953$ параметр ϕ больше 50% (рис. 1).

Таким образом, из данного исследования видно, что область критического усиления составля-

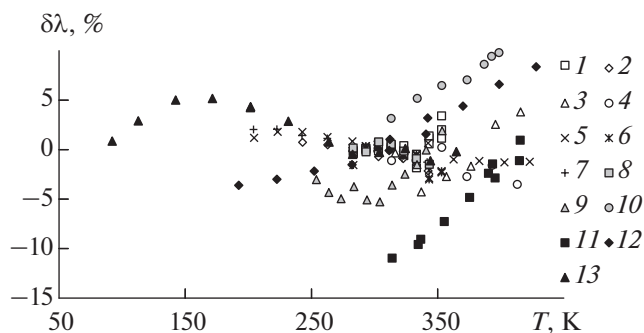


Рис. 2. Относительные отклонения $\delta\lambda$ теплопроводности насыщенных жидких хладагентов: 1 – R1234yf [20], 2 – R1234yf [14], 3 – R1224yd(Z) [11], 4 – R1233zd(E) [12], 5 – R1233zd(E) [13], 6 – R1234ze(E) [20], 7 – R1234ze(E) [14], 8 – R1234ze(Z) [10], 9 – R1336mzz(E) [17], 10 – R1336mzz(E) [16], 11 – R1336mzz(Z) [18], 12 – R1336mzz(Z) [19], 13 – пропан [43].

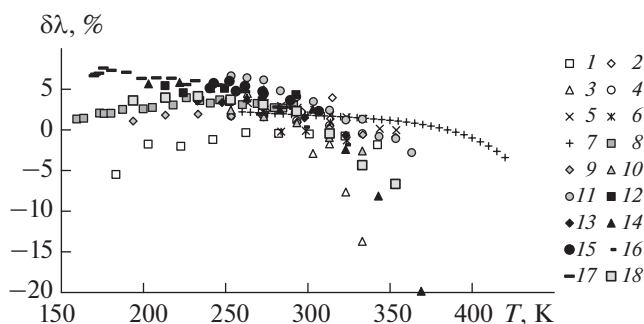


Рис. 3. Относительные отклонения $\delta\lambda$ теплопроводности насыщенных жидких хладагентов: 1 – R245fa [21], 2 – R245fa [22], 3 – R365mfc [23], 4 – R123 [24], 5 – R123 [25], 6 – R123 [26], 7 – R123 [27], 8 – R123 [28], 9 – R123 [29], 10 – R134a [24], 11 – R134a [25], 12 – R134a [30], 13 – R134a [31], 14 – R134a [32], 15 – R134a [33], 16 – R134a [34], 17 – R134a [28], 18 – R134a [29].

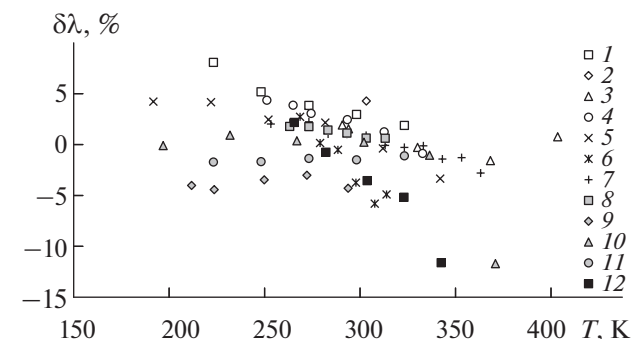


Рис. 4. Относительные отклонения $\delta\lambda$ теплопроводности насыщенных жидких хладагентов: 1 – R142b [35], 2 – R142b [36], 3 – R142b [37], 4 – R142b [38], 5 – R143a [39], 6 – R143a [40], 7 – R152a [25], 8 – R152a [41], 9 – R152a [42], 10 – R152a [39], 11 – R152a [35], 12 – R152a [38].

ет для насыщенной жидкости не $0.87 \leq T_r \leq 1$ [62], а $0.952 \leq T_r \leq 1$, т.е. в 2.7 раза меньше (рис. 1). Однако область критического усиления от 5 до 50% в случае [62] и данного исследования отличается только в 1.26 раза. О том, что область влияния критического усиления все же уже, чем приведенная в [62], по мнению авторов, свидетельствуют:

– экспериментальные данные о теплопроводности R134a [32], R1336mzz(E) [16], R142b [37], R143a [39] и пропана [43] (рис. 5). Действительно, теплопроводность всех перечисленных веществ строго убывает вплоть до $T_r = 0.9886$ (рис. 5б), т.е. значительного критического усиления в данной области, согласно экспериментальной информации [16, 32, 37, 39, 43], не наблюдается. По-видимому, неопределенность экспериментальных данных о λ_s [16, 32, 37, 39, 43] при $T_r > 0.98T_c$ требует уточнения;

– регулярная составляющая уравнения (7), которая выделена в (9), воспроизводит экспериментальные данные [10–43] с той же точностью, что и уравнение (7). При этом в области $0.98 < T_r < 0.9886$, которая относится к окрестности критической точ-

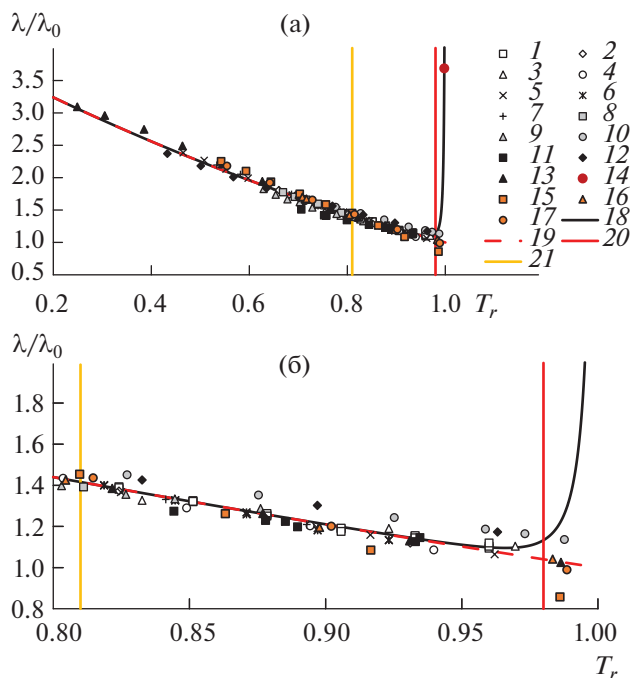


Рис. 5. Поведение теплопроводности насыщенной жидкости: 1 – R1234yf [20], 2 – R1234yf [14], 3 – R1224yd(Z) [11], 4 – R1233zd(E) [12], 5 – R1233zd(E) [13], 6 – R1234ze(E) [20], 7 – R1234ze(E) [14], 8 – R1234ze(Z) [10], 9 – R1336mzz(E) [17], 10 – R1336mzz(E) [16], 11 – R1336mzz(Z) [18], 12 – R1336mzz(Z) [19], 13 – пропан [43], 14 – пропан [72], 15 – R134a [32], 16 – R142b [37], 17 – R143a [39]; 18 – результаты расчета по (7), 19 – (9); 20 – граница $T_r = 0.98$, 21 – $T_r = 0.81$ [62].

ки, точность описания экспериментальных данных [16, 32, 37, 39, 43] уравнением (9) выше, чем уравнением (7) (рис. 5б). И это при том, что в рамках (9) не учитывается критическое усиление.

Таким образом, корреляция (7) позволяет описывать λ_s , как и корреляция (9), без потери точности в интервале $T_{tr} < T < 0.98T_c$, она удовлетворяет требованиям современной физики критических явлений [63, 64, 68, 69] и может использоваться для прогнозирования λ_s в окрестности критической точки при $T > 0.98T_c$.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ R1225YE(Z)

Для прогнозирования λ_s на основе (7), (9) необходимо иметь информацию о M , T_c , p_c , T_{nb} и ω исследуемого вещества. Поскольку для R1225ye(Z) эта информация носит противоречивый характер [60, 74], на основе данных о давлении насыщенного пара [60] разработано уравнение $p_s = p_s(T)$ в форме [75]:

$$p_s = p_c \exp(-A_0 \tau^2 / T_r) \times (1 + A_1 \tau + A_2 \tau^{2-\alpha} + A_3 \tau^{2-\alpha+\Delta} + A_4 \tau^4), \quad (13)$$

где α — критический индекс изохорной теплоемкости; Δ — неасимптотический критический индекс; A_i , $i \in \{1, 2, 3, 4\}$ — постоянные коэффициенты.

Критические параметры выбраны следующими: $T_c = 380.05$ К, $p_c = 3.529$ МПа [60], α и Δ в соответствии с масштабной теорией [64] — $\alpha = 0.11$ и $\Delta = 0.5$, коэффициенты A_i установлены в ходе поиска минимума функционала:

$$\Phi = \sum_{i=1}^{23} (p_{s,i}^{\text{exp}} - p_{s,i}^{\text{calc}})^2,$$

где $p_{s,i}^{\text{calc}} = p_s(T_{s,i}^{\text{exp}})$ — значение давления, рассчитанное по уравнению (13); $p_{s,i}^{\text{exp}}$ — данные [60].

Результаты расчета: $A_0 = 13.84$, $A_1 = 7.590628192$, $A_2 = 34.02317981$, $A_3 = -37.23730205$, $A_4 = 19.86215060$.

Ацентрический фактор $\omega = 0.31972$ определен на основе (13) по формуле [1]

$$\omega = -\log_{10}(p_s(T_1)/p_c) - 1,$$

где $T_1 = 0.7T_c = 266.035$ К.

Температура кипения при нормальном давлении, рассчитанная на основе (13), $T_{nb} = 253.604$ К.

Полученные значения ω и T_{nb} отличаются от данных [60] — $\omega = 0.3256$ и $T_{nb} = 253.62$ К, и особенно от [74] (патент US2013/0079562): $\omega = 0.2730$ и $T_{nb} = 255.44$ К.

О точности описания данных [60] уравнением (13) можно судить по характеристикам, рассчитанным на основе (3), (4), (12): $AAD = 0.121\%$, $S = 0.021\%$, $BIAS = 0.00041\%$. Заметим, уравнение линии упругости, предложенное в [60], не удовлетворяет требованиям МТ и описывает те же экспериментальные данные с $BIAS = -0.0081\%$.

Результаты расчета λ_s R1225ye(Z) на основе (9) представлены в табл. 5. Как отмечалось, характеристики R1225ye(Z), необходимые для расчета λ_s , приведены также в [74], и они существенно отличаются от характеристик R1225ye(Z), см. табл. 1. Поэтому выполнена дополнительная проверка результатов расчета λ_s R1225ye(Z) на основе (9). Как отмечалось в [1, 76], одним из наиболее надежных методов прогнозирования λ_s холодильных агентов является корреляция [8]

$$\lambda_s = \lambda_{tr} - \sum_{i=1}^4 A_i [g(T^{**})]^{4-i} |\lambda_{tr} - \lambda_{09}|, \quad (14)$$

где $g(T^{**}) = T^* - a_1 T_{tr}^* + a_2$, $T^* = T / (T_c - T_{tr})$, $T_{tr}^* = T_{tr} / (T_c - T_{tr})$.

Поэтому с целью дополнительной проверки результатов табл. 5 на основе (9) рассчитаны значения $\lambda_{09} = \lambda_s(T = 0.9T_c)$ и $\lambda_{tr} = \lambda_s(T = T_{tr})$ (значение $T_{tr} = 135.30$ К для R1225ye(Z) приведено в [77]). Затем по формуле (9) рассчитана λ_s в диапазоне от T_{tr} до 375.15 К (табл. 5).

Оказалось, что результаты расчета λ_s R1225ye(Z) на основе (9), (14) удовлетворительно, с неопределенностью $|\delta\lambda_s| < 2.2\%$, согласуются в интервале $0.35 \leq T/T_c \leq 0.98$, тогда как, например, расхождение между экспериментальными данными [16, 17] для R1336mzz(E), [18, 19] для R1336mzz(Z) характеризуется $|\delta\lambda_s| > 6\%$ (рис. 2).

Таблица 5. Теплопроводность λ_s R1225ye(Z)

T , К	λ_s , Вт/(м К)	T , К	λ_s Вт/(м К)
134.30	0.1235	253.15	0.0811
138.15	0.1220	263.15	0.0779
143.15	0.1201	273.15	0.0748
153.15	0.1162	283.15	0.0718
163.15	0.1124	293.15	0.0688
173.15	0.1087	303.15	0.0659
183.15	0.1050	313.15	0.0630
193.15	0.1014	323.15	0.0602
203.15	0.0978	333.15	0.0575
213.15	0.0944	343.15	0.0548
223.15	0.0909	353.15	0.0522
233.15	0.0876	363.15	0.0497
243.15	0.0843	373.15	0.0472

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложены корреляционные модели (7), (9) теплопроводности λ_s жидких ГФО и ГФХО на линии насыщения, во-первых, описывающие λ_s в диапазоне от тройной точки и до $0.98T_c$ в пределах неопределенности экспериментальных данных этих хладагентов. Во-вторых, модели описывают λ_s цис- и транс-изомеров с одинаковой точностью. Полученные на основе (9) результаты о λ_s цис-изомера R1225ye(Z) подтверждаются результатами расчетов, выполненных на основе корреляции [8]. В-третьих, показано, что предложенные корреляционные модели могут быть использованы для расчета теплопроводности жидких ГФО и ГФХО в однофазной области вплоть до критических давлений $p \leq p_c$. В-четвертых, установлено, что корреляционные модели (7), (9) могут использоваться при прогнозировании λ_s не только ГФО и ГФХО (как показано на примере R234ze(Z)), но и ГФУ, ГХФУ.

Корреляционная модель (7) учитывает особенности критической области в соответствии с динамической масштабной теорией критической точки и, как это показано на примере расчета λ_s пропана при $T = 0.9981T_c$, позволяет прогнозировать λ_s в температурном интервале $T_{tr} < T < T_c$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыков С.В., Кудрявцева И.В. Теплопроводность жидких гидрофторолефинов и гидрохлорфторолефинов на линии насыщения // ЖФХ. 2022. Т. 96. № 10. С. 1421.
2. Кудрявцева И.В., Рыков С.В., Рыков В.А. Математическое моделирование теплопроводности жидких гидрофторолефинов // Научно-технический вестник Поволжья. 2021. № 12. С. 205.
3. Цветков О.Б., Митропов В.В., Лантев Ю.А. Теплопроводность жидких гидрофторхлорпроизводных олефинов. Корреляции и априорные оценки // Вестник Международной академии холода. 2021. № 3. С. 75.
4. Tsvetkov O.B., Mitropov V.V., Prostorova A.O., Laptev Yu.A. Thermal Conductivity Prediction of Trans-1-Chloro-3,3,3-Trifluoropropene (R1233zd (E)) // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1683. 032021.
5. Di Nicola G., Ciarrocchi E., Coccia G., Pierantozzi M. Correlations of Thermal Conductivity for Liquid Refrigerants at Atmospheric Pressure or near Saturation // Int. J. Refrig. 2014. V. 45. P. 168.
6. Tomassetti S., Coccia G., Pierantozzi M., Di Nicola G. Correlations for Liquid Thermal Conductivity of Low GWP Refrigerants in the Reduced Temperature Range 0.4 to 0.9 from Saturation Line to 70 MPa // Int. J. Refrig. 2020. V. 117. P. 358.
7. Di Nicola G., Pierantozzi M., Petrucci G., Stryjek R. Equation for the Thermal Conductivity of Liquids and an Artificial Neural Network // J. Thermophys. Heat Transfer. 2016. V. 30. P. 1.
8. Yang S., Tian J., Jiang H. Corresponding State Principle Based Correlation for the Thermal Conductivity of Saturated Refrigerants Liquids from T_{tr} to $0.90T_c$ // Fluid Phase Equilib. 2020. V. 509. P. 112459.
9. Amooey A.A. A New Equation for the Thermal Conductivity of Liquid Refrigerants over Wide Temperature and Pressure Ranges // J. Eng. Phys. Thermophys. 2017. V. 90. № 2. P. 392.
10. Ishida H., Mori S., Kariya K., Miyara A. Thermal Conductivity Measurements of Low GWP Refrigerants with Hot-wire Method // 24th Int. Congress of Refrigeration (ICR). Yokohama, August 16–22, 2015. P. 683.
11. Alam Md.J., Yamaguchi K., Hori Y., Kariya K., Miyara A. Measurement of Thermal Conductivity and Viscosity of cis-1-Chloro-2,3,3,3-tetrafluoropropene (R-1224yd(Z)) // Int. J. Refrig. 2019. V. 104. P. 221.
12. Alam Md.J., Islam M.A., Kariya K., Miyara A. Measurement of Thermal Conductivity and Correlations at Saturated State of Refrigerant trans-1-Chloro-3,3,3-trifluoropropene (R-1233zd(E)) // Int. J. Refrig. 2018. V. 90. P. 174.
13. Perkins R.A., Huber M.L. Measurement and Correlation of the Thermal Conductivity of trans-1-Chloro-3,3,3-trifluoropropene (R1233zd(E)) // J. Chem. Eng. Data. 2017. V. 62. P. 2659.
14. Perkins R.A., Huber M.L. Measurement and Correlation of the Thermal Conductivity of 2,3,3,3-Tetrafluoroprop-1-ene (R1234yf) and trans-1,3,3,3-Tetrafluoropropene (R1234ze(E)) // J. Chem. Eng. Data. 2011. V. 56. P. 4868.
15. Kim D., Liu H., Yang X., Yang F., Morfitt J., Arami-Niya A., Ryu M., Duan Y., May E.F. Thermal Conductivity Measurements and Correlations of Pure R1243zf and Binary Mixtures of R32 + R1243zf and R32 + R1234yf // Int. J. Refrig. 2021. V. 131. P. 990.
16. Mondal D., Kariya K., Tuhin A.R., Miyoshi K., Miyara A. Thermal Conductivity Measurement and Correlation at Saturation Condition of HFO Refrigerant trans-1,1,1,4,4,4-Hexafluoro-2-butene (R1336mzz(E)) // Int. J. Refrig. 2021. V. 129. P. 109.
17. Haowen G., Xilei W., Yuan Zh., Zhikai G., Xiaohong H., Guangming Ch. Experimental and Theoretical Research on the Saturated Liquid Thermal Conductivity of HFO-1336mzz(E) // Ind. Eng. Chem. Res. 2021. V. 60. P. 9592.
18. Alam Md., Islam J.M.A., Kariya K., Miyara A. Measurement of Thermal Conductivity of cis-1,1,1,4,4,4-Hexafluoro-2-butene (R-1336mzz(Z)) by the Transient Hot-wire Method // Int. J. Refrig. 2017. V. 84. P. 220.
19. Perkins R.A., Huber M.L. Measurement and Correlation of the Thermal Conductivity of cis-1,1,1,4,4,4-Hexafluoro-2-butene // Int. J. Thermophys. 2020. V. 41. P. 103.
20. Miyara A., Fukuda R., Tsubaki K. Thermal Conductivity of Saturated Liquid of R1234ze(E) + R32 and R1234yf + R32 Mixtures // Trans. JSRAE. 2011. V. 28. P. 435.
21. Perkins R.A., Huber M.L., Assael M.J. Measurements of the Thermal Conductivity of 1,1,1,3,3-Pentafluoropropane (R245fa) and Correlations for the Viscosity and Thermal Conductivity Surfaces // J. Chem. Eng. Data. 2016. V. 61. P. 3286.
22. Yata J., Hori M., Niki M., Isono Y., Yanagitani Y. Coexistence Curve of HFC-134a and Thermal Conductivity of HFC-245fa // Fluid Phase Equilib. 2000. V. 174. P. 221.

23. Froba A.P., Krzeminski K., Leipertz A. Thermophysical Properties of 1,1,1,3,3-Pentafluorobutane (R365mfc) // Int. J. Thermophys. 2004. V. 25. P. 987.
24. Assael M.J., Karagiannidis E. Measurements of the Thermal Conductivity of R22, R123, and R134a in the Temperature Range 250–340 K at Pressures up to 30 MPa // Int. J. Thermophys. 1993. V. 14. P. 183.
25. Gross U., Song Y.W., Hahne E. Thermal Conductivity of the New Refrigerants R134a, R152a, and R123 Measured by the Transient Hot-wire Method // Int. J. Thermophys. 1992. V. 13. P. 957.
26. Tanaka Y., Miyake A., Kashiwagi H., Makita T. Thermal Conductivity of Liquid Halogenated Ethanes under High Pressures // Int. J. Thermophys. 1988. V. 9. P. 465.
27. Tanaka Y., Sotani T. Thermal Conductivity and Viscosity of 2,2-Dichloro-1,1,1-Trifluoroethane (HCFC-123) // Int. J. Thermophys. 1996. V. 17. P. 293.
28. Tsvetkov O.B., Laptev Yu.A., Asambaev A.G. Thermal Conductivity of Refrigerants R123, R134a, and R125 at Low Temperatures // Int. J. Thermophys. 1994. V. 15. P. 203.
29. Ueno Y., Kobayashi Y., Nagasaka Y., Nagashima A. Thermal Conductivity of CFC Alternatives: Measurements of HCFC-123 and HFC-134a in the Liquid Phase by the Transient Hot-wire Method // Trans. JSME. Ser. B. 1991. V. 57. № 541. P. 3169.
30. Gurova A.N., Mardolcar U.V., Nieto de Castro C.A. The Thermal Conductivity of Liquid 1,1,1,2-Tetrafluoroethane (HFC 134a) // Int. J. Thermophys. 1997. V. 18. P. 1077.
31. Jeong S.U., Kim M.S., Ro S.T. Liquid Thermal Conductivity of Binary Mixtures of Pentafluoroethane (R125) and 1,1,1,2-Tetrafluoroethane (R134a) // Int. J. Thermophys. 1999. V. 20. P. 55.
32. Laesecke A., Perkins R.A., Nieto de Castro C.A. Thermal Conductivity of R134a // Fluid Phase Equilib. 1992. V. 80. P. 263.
33. Papadaki M., Schmitt M., Seitz A., Stephan K., Taxis B., Wakeham W.A. Thermal Conductivity of R134a and R141b within the Temperature Range 240–307 K at the Saturation Vapor Pressure // Int. J. Thermophys. 1993. V. 14. P. 173.
34. Ro S.T., Kim J.Y., Kim D.S. Thermal Conductivity of R32 and Its Mixture with R134a // Int. J. Thermophys. 1995. V. 16. P. 1193.
35. Kim S.H., Kim D.S., Kim M.S., Ro S.T. The Thermal Conductivity of R22, R142b, R152a, and Their Mixtures in the Liquid State // Int. J. Thermophys. 1993. V. 14. P. 937.
36. Perkins R.A., Laesecke A., Nieto de Castro C.A. Polarized Transient Hot Wire Thermal Conductivity Measurements // Fluid Phase Equilib. 1992. V. 80. P. 275.
37. Sousa A.T., Fialho P.S., Nieto de Castro C.A., Tufeu R., Le Neindre B. The Thermal Conductivity of 1-Chloro-1,1-Difluoroethane (HCFC-142b) // Int. J. Thermophys. 1992. V. 13. P. 383.
38. Yata J., Hori M., Kurahashi T., Minamiyama T. Thermal Conductivity of Alternative Fluorocarbons in Liquid Phase // Fluid Phase Equilib. 1992. V. 80. P. 287.
39. Haynes W.M. Thermophysical Properties of HFC-143a and HFC-152a. Final Report for ARTI MCLR Project № 660-50800. Boulder, CO: NIST, 1994.
40. Yata J., Hori M., Kobayashi K., Minamiyama T. Thermal Conductivity of Alternative Refrigerants in the Liquid Phase // Int. J. Thermophys. 1996. V. 17. P. 561.
41. Gross U., Song Y.W., Hahne E. Measurements of Liquid Thermal Conductivity and Diffusivity by the Transient Hot-strip Method // Fluid Phase Equilib. 1992. V. 76. P. 273.
42. Gurova A.N., Mardolcar U.V., Nieto de Castro C.A. Thermal Conductivity of 1,1-Difluoroethane (HFC-152a) // Int. J. Thermophys. 1999. V. 20. P. 63.
43. Marsh K.N., Perkins R.A., Ramires M.L.V. Measurement and Correlation of the Thermal Conductivity of Propane from 86 K to 600 K at Pressures to 70 MPa // J. Chem. Eng. Data. 2002. V. 47. P. 932.
44. Филуппов Л.П. Прогнозирование теплофизических свойств жидкостей и газов. М.: Энергоатомиздат, 1988. 168 с.
45. Kolobaev V.A., Popov P.V., Kozlov A.D., Rykov S.V., Kudryavtseva I.V., Rykov V.A., Sverdlov A.V., Ustyuzhanin E.E. Methodology for Constructing the Equation of State and Thermodynamic Tables for a New Generation Refrigerant // Measurement Techniques. 2021. V. 64. P. 109.
46. Цветков О.Б., Лантнев Ю.А., Мумонов В.В. Стереоизометрические особенности теплопроводности галопропеннов на линии насыщенной жидкости // Материалы Восьмой Российской национальной конференции по теплообмену. Москва, 17–22 октября 2022. В 2-х т. Т. 2. М.: Изд-во МЭИ, 2022. С. 217.
47. Richter M., McLinden M.O., Lemmon E.W. Thermodynamic Properties of 2,3,3,3-Tetrafluoroprop-1-ene (R1234yf): Vapor Pressure and p - p - T Measurements and an Equation of State // J. Chem. Eng. Data. 2011. V. 56. P. 3254.
48. Fang Y., Ye G., Ni H., Jiang Q., Bao K., Han X., Chen G. Vapor–Liquid Equilibrium for the Binary Systems 1,1,2,3,3,3-Hexafluoro-1-propene (R1216) + 2,3,3,3-Tetrafluoroprop-1-ene (R1234yf) and 1,1,2,3,3,3-Hexafluoro-1-propene (R1216) + trans-1,3,3,3-Tetrafluoropropene (R1234ze(E)) // J. Chem. Eng. Data. 2020. V. 65. P. 4215.
49. Fedele L., Bobbo S., Scattolini M., Zilio C., Akasaka R. HCFO Refrigerant cis-1-Chloro-2,3,3,3 Tetrafluoropropene [R1224yd(Z)]: Experimental Assessment and Correlation of the Liquid Density // Int. J. Refrig. 2020. V. 118. P. 139.
50. Mondéjar M.E., McLinden M.O., Lemmon E.W. Thermodynamic Properties of trans-1-Chloro-3,3,3-trifluoropropene (R1233zd(E)): Vapor Pressure, (p , ρ , T) Behavior, and Speed of Sound Measurements, and Equation of State // J. Chem. Eng. Data. 2015. V. 60. P. 2477.
51. Thol M., Lemmon E.W. Equation of State for the Thermodynamic Properties of trans-1,3,3,3-Tetrafluoropropene [R-1234ze(E)] // Int. J. Thermophys. 2016. V. 37. P. 28.
52. Di Nicola G., Brown J.S., Fedele L., Bobbo S., Zilio C. Saturated Pressure Measurements of trans-1,3,3,3-Tetrafluoroprop-1-ene (R1234ze(E)) for Reduced Temperatures Ranging from 0.58 to 0.92 // J. Chem. Eng. Data. 2012. V. 57. P. 2197.
53. Akasaka R., Lemmon E.W. Fundamental Equations of State for cis-1,3,3,3-Tetrafluoropropene [R-1234ze(Z)] and 3,3,3-Trifluoropropene (R-1243zf) // J. Chem. Eng. Data. 2019. V. 64. P. 4679.

54. *Sakoda N., Higashi Y., Akasaka R.* Measurements of *PvT* Properties, Vapor Pressures, Saturated Densities, and Critical Parameters for trans-1,1,1,4,4,4-Hexafluoro-2-butene (R1336mzz(E)) // *J. Chem. Eng. Data*. 2021. V. 66. P. 734.
55. *McLinden M.O., Akasaka R.* Thermodynamic Properties of cis-1,1,1,4,4,4-Hexafluorobutene [R-1336mzz(Z)]: Vapor Pressure, (*p*, *p*, *T*) Behavior, and Speed of Sound Measurements and Equation of State // *J. Chem. Eng. Data*. 2020. V. 65. P. 4201.
56. *Lemmon E.W., Huber M.L., McLinden M.O.* Refprop: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties, NIST Standard Reference Database. Version 9.1, National Institute of Standard and Technology, Gaithersburg, MD, 2018.
57. *Lemmon E.W., Span R.* Thermodynamic Properties of R-227ea, R-365mfc, R-115, and R-1311 // *J. Chem. Eng. Data*. 2015. V. 60. P. 3745.
58. *Froba A.P., Krzeminski K., Leipertz A.* Thermophysical Properties of 1,1,1,3,3-Pentafluorobutane (R365mfc) // *Int. J. Thermophys.* 2004. V. 25. P. 987.
59. *Lemmon E.W., McLinden M.O., Wagner W.* Thermodynamic Properties of Propane. III. A Reference Equation of State for Temperatures from the Melting Line to 650 K and Pressures up to 1000 MPa // *J. Chem. Eng. Data*. 2009. V. 54. P. 3141.
60. *Fedele L., Di Nicola G., Brown J.S., Colla L., Bobbo S.* Saturated Pressure Measurements of cis-Pentafluoroprop-1-ene (R1225ye(Z)) // *Int. J. Refrig.* 2016. V. 69. P. 243.
61. *Huber M.L.* NISTIR 8209. Models for Viscosity, Thermal Conductivity, and Surface Tension of Selected Pure Fluids as Implemented in Refprop v10.0., 2018. 271 p.
62. *Perkins R.A., Sengers J.V., Abdulgatov I.M., Huber M.L.* Simplified Model for the Critical Thermal-Conductivity Enhancement in Molecular Fluids // *Int. J. Thermophys.* 2013. V. 34. P. 191.
63. *Kadanoff L., Swift J.* Transport Coefficients near the Liquid-gas Critical Point // *Phys. Rev.* 1968. V. 166. P. 89.
64. *Ма Ш.* Современная теория критических явлений. М.: Мир, 1980. 298 с.
65. *Rykov V.A., Rykov S.V., Sverdlov A.V.* Fundamental Equation of State for R1234yf // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019. V. 1385. 012013.
66. *Колобаев В.А., Рыков С.В., Кудрявцева И.В., Устюжанин Е.Е., Попов П.В., Рыков В.А., Козлов А.Д.* Термодинамические свойства хладагента R1233zd(E): методика построения фундаментального уравнения состояния и табулированные данные // *Измерительная техника*. 2022. № 5. С. 22.
67. *Rykov S.V., Kudryavtseva I.V., Sverdlov A.V., Rykov V.A.* Calculation Method of R1234yf Phase Equilibrium Curve within Temperature Range from 122.6 K to 367.85 K // *AIP Conf. Proc.* 2020. V. 2285. 030070.
68. *Le Guillou J.C., Zinn-Justin J.* Accurate Critical Exponents from the ϵ -expansion // *J. Phys. Lett.* 1985. V. 46. P. 137.
69. *Киселев С.Б.* Масштабное уравнение состояния индивидуальных веществ и бинарных растворов в широкой окрестности критических точек // *Обзоры по теплофизическим свойствам веществ*. М.: Изд-во ИВТАН, 1989. № 2(76). 150 с.
70. *Kudryavtseva I.V., Rykov V.A., Rykov S.V., Ustyuzhanin E.E.* A New Variant of a Scaling Hypothesis and a Fundamental Equation of State Based on It // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2018. V. 946. 012118.
71. *Форсайт Дж., Малькольм Н., Моулер К.* Машинные методы математических вычислений. М.: Мир, 1980. 280 с.
72. *Le Neindre B.* Measurements of the Thermal Conductivity of Propane at the Approach of the Coexistence Line // *Fluid Phase Equilib.* 2017. V. 450. P. 1.
73. *Pierantozzi M., Tomassetti S., Di Nicola G.* Modeling Liquid Thermal Conductivity of Low-GWP Refrigerants Using Neural Networks // *Appl. Sci.* 2023. V. 13. P. 260.
74. *Advances in New Heat Transfer Fluids: From Numerical to Experimental Techniques*. 2017. Taylor & Francis Group, 523 p.
75. *Rykov S.V., Kudryavtseva I.V., Rykov V.A., Ustyuzhanin E.E.* Description of the Liquid–Vapor Phase Equilibrium Line of Pure Substances within the Bounds of Scale Theory Based on the Clapeyron Equation // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021. V. 2057. 012113.
76. *Рыков С.В., Кудрявцева И.В., Рыков В.А.* Анализ методов расчета теплопроводности новых жидких гидрофторхлорпроизводных олефинов на линии насыщения // *Вестник Международной академии холода*. 2022. № 2. С. 70.
77. *Tomassetti S., Di Nicola G., Kondou Ch.* Triple Point Measurements for New Low-global-warming-potential Refrigerants: Hydro-fluoro-olefins, Hydro-chloro-fluoro-olefins, and Trifluoroiodomethane // *Int. J. Refrig.* 2022. V. 133. P. 172.