

УДК 561.22

Анализ методов расчета теплопроводности новых жидких гидрофторхлорпроизводных олефинов на линии насыщения

Канд. техн. наук С. В. РЫКОВ¹, канд. техн. наук И. В. КУДРЯВЦЕВА,

д-р техн. наук В. А. РЫКОВ

Университет ИТМО

¹E-mail: togg1@yandex.ru

Рассмотрены различные корреляционные зависимости, позволяющие рассчитывать теплопроводность хладагентов, находящихся в состоянии насыщенной жидкости. Выполнен анализ этих зависимостей на примере хладагентов R1234yf, R1224yd (Z), R1233zd (E), R1234ze (E), R1243zf, R1336mzz (E), R1336mzz (Z), R365mfc и R245fa. Предложена модифицированная линейная зависимость для $\lambda^{sat}=\lambda^{sat}(T)$. Приведены статистические характеристики для модели I, в частности, рассчитано среднее абсолютное отклонение (average absolute deviation, AAD): $AAD_I=3,37\%$. Показано, что учет нелинейного характера поведения теплопроводности $\lambda^{sat}=\lambda^{sat}(T)$ от температуры позволяет повысить точность расчетов λ^{sat} по модели II: $AAD=2,39\%$. В рамках модели II, в отличие от известных корреляционных зависимостей, в окрестности критической точки, в соответствии с динамической масштабной теорией, выполняется предельный переход $\lambda^{sat}(T \rightarrow T_c) \sim \tau^\chi$, где $\tau=(T_c - T)/T_c$, T_c — критическая температура, $\chi=0,608$ — критический индекс. Полученные результаты обсуждаются.

Ключевые слова: теплопроводность, хладагенты, линия насыщения, R1234yf, R1224yd (Z), R1233zd (E), R1234ze (E), R1336mzz (E), R1336mzz (Z).

Информация о статье:

Поступила в редакцию 10.11.2021, одобрена после рецензирования 10.02.2022, принята к печати 29.04.2022

DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-2-70-76

Язык статьи — русский

Для цитирования:

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. 70–76.

DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-2-70-76

Analysis of methods for calculating the thermal conductivity of new liquid hydrofluorochlorine derivatives of olefins on the saturation line

Ph. D. S. V. RYKOV¹, Ph. D. I. V. KUDRYAVTSEVA, D. Sc. V. A. RYKOV

ITMO University

¹E-mail: togg1@yandex.ru

We consider various correlations to calculate thermal conductivity of the refrigerants in the state of a saturated liquid. An analysis of these dependencies was carried out using the example of refrigerants R1234yf, R1224yd (Z), R1233zd (E), R1234ze (E), R1243zf, R1336mzz (E), R1336mzz (Z), R365mfc, and R245fa. A modified linear dependence I for $\lambda^{sat}=\lambda^{sat}(T)$ is proposed. Statistical characteristics for the model I are given, in particular, the average absolute deviation is calculated $AAD_I=3,37\%$. It is shown that, taking into account the nonlinear nature of the behavior of thermal conductivity $\lambda^{sat}=\lambda^{sat}(T)$ on temperature, model II, makes it possible to increase the accuracy of calculations using the model II: $AAD=2,39\%$. In contrast to the known correlation dependences, within the framework of the model II, in accordance with the dynamic scale theory, the passage to the limit $\lambda^{sat}(T \rightarrow T_c) \sim \tau^\chi$ is performed in the vicinity of the critical point, where $\tau=(T_c - T)/T_c$, T_c is the critical temperature, $\chi=0,608$ is the critical index. The results are discussed.

Keywords: thermal conductivity, refrigerants, saturation line, R1234yf, R1224yd (Z), R1233zd (E), R1234ze (E), R1336mzz (E), R1336mzz (Z).

Article info:

Received 10/11/2021, approved after reviewing 10/02/2022, accepted 29/04/2022

DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-2-70-76

Article in Russian

For citation:

Rykov S. V., Kudryavtseva I. V., Rykov V. A. Analysis of methods for calculating the thermal conductivity of new liquid hydrofluorochlorine derivatives of olefins on the saturation line. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2022. No 2. p. 70–76. DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-2-70-76

Введение

Для расчета и прогнозирования теплопроводности жидких хладагентов в состоянии насыщения, λ^{sat} , используются различные методы, которые можно разбить на две основные группы. К первой группе мы отнесем методы, которые требуют наличия информации о теплопроводности исследуемого вещества [1]–[3]. Например, в работе [1] предложено уравнение:

$$\lambda = \lambda_{lr} - \lambda^* (T^*) |\lambda_{lr} - \lambda_{0,9}|. \quad (1)$$

Здесь

$$\lambda^* (T^*) = \sum_{i=1}^4 A_i [T^* - 0,9496 T_{lr}^* + 0,5139]^{4-i}, \quad (2)$$

где $T^* = T / (T_c - T_{lr})$; λ_{lr} — теплопроводность жидкого хладагента в тройной точке ($T = T_{lr}$); $\lambda_{0,9}$ — теплопроводность при температуре $T = 0,9 \cdot T_c$, T_c — критическая температура, T — абсолютная температура.

Зависимость (1) апробирована на примере 47 веществ, сведения о λ_{lr} и $\lambda_{0,9}$ авторы [1] получили на основе базы данных REFPROP 9.1 [4]. Сведения о точности расчета по уравнению (1) теплопроводности новых хладагентов (R1336mzz (E), R1336mzz (Z) и др.) в [2] отсутствуют. Обусловлено это тем, что в базе данных [4] не приводятся данные о теплопроводности λ_{lr} этих веществ.

В [2] для расчета λ^{sat} требуется знать набор параметров, уникальных для каждого вещества, а по методике [3] для расчета λ^{sat} исследуемых веществ должна быть известна энтальпия плавления, Δh_{fus} . Это не позволяет в рамках методов [2] и [3] рассчитывать или прогнозировать λ^{sat} малоизученных и новых хладагентов.

Ко второй группе относятся методы, в рамках которых для нахождения λ^{sat} не требуется знание теплопроводности исследуемого вещества, в частности, сведения о λ_{lr} , $\lambda_{0,9}$ или Δh_{fus} . Так, Di Nicola и др. [5], в развитие подхода [3], предложили корреляционные зависимости для теплопроводности λ^{sat} в виде уравнения, не содержащего энтальпию плавления Δh_{fus} :

$$\lambda = \lambda_0 [a T_r + b p_c + c \omega + e^d M^{-d}], \quad (3)$$

$$\lambda = \lambda_0 [a T_r + b p_c + c \omega + e^d M^{-d} + f \cdot \mu], \quad (4)$$

где λ_0 , a , b , c , d , e — постоянные параметры; M — молярная масса; p_c — критическое давление; ω — ацентрический фактор, μ — дипольный момент, $T_r = T / T_c$ — пониженная температура.

В работе [6] в структуру (3) введено пониженное давление $p_r = p / p_c$:

$$\lambda = \lambda_0 (a T_r + b p_r + c \omega + d M^{-e}). \quad (5)$$

В работе [6] не определены границы применимости (5). Наш анализ (5) при давлении $p_r = p_s(T_r)$ показал, что относительная неопределенность описания теплопрово-

дности λ^{sat} хладагента R245fa составляет выше 80% (для расчета давления насыщенного пара, $p_s(T_r)$, хладагента R245fa мы использовали уравнение линии упругости [7]). Аналогичный результат мы получили и в случае хладагентов R236ea и R1233zd (E), для которых использовались данные о давлении $p_s(T_r)$ из работ [8, 9].

Ко второй группе относятся также следующие уравнения:

— уравнение Sato–Riedel [10]:

$$\lambda = \frac{1,1053}{\sqrt{M}} \frac{3 + 20(1 - T_r)^{2/8}}{3 + 20(1 - T_{rb})^{2/3}}; \quad (6)$$

— уравнение Sheffy–Johnson [11]:

$$\lambda = 1,951 \cdot [1 - 0,00126(T - T_{fus})] \cdot T_{fus}^{-0,216} \cdot M^{-9,3}; \quad (7)$$

— уравнение Latini [12]:

$$\lambda = 1,951 \cdot A \cdot (T_r - 0,1)^{0,3} (1,1 - T_r)^{-1/6}, \quad (8)$$

где A — индивидуальный параметр вещества [13, 14];

— уравнение Latini–Sotte [15]:

$$\lambda = A^* \left[\sqrt{5} (\Phi - T_r)^2 / (\Phi + T_r) \right]^s, \quad (9)$$

где $\Phi = (1 + \sqrt{5}) / 2$; $A^* = \tilde{A} T_b^v M^{-l} T_c^{-g}$; \tilde{A} , s , v , l , g — постоянные для определенной группы веществ [16];

— уравнение Gharagheizi et al. [17]:

$$\lambda = 10^{-4} \left[10\omega + 2p_c - 2T + 4,0 + 1,908 \left(T_b + \frac{1,009 B^2}{M^2} \right) + 3,9287 \left(\frac{M}{B} \right)^4 + \frac{A}{B^8} \right], \quad (10)$$

где $A = 3,8588 M^8 (1,0045 B + 6,5152 M - 8,9756)$; $B = 16,0407 M + 2T_b - 27,9074$.

— уравнение Цветкова и др. [18]:

$$\lambda = \lambda_b (a + b T_{rb}). \quad (11)$$

Здесь

$$\lambda_b = (\xi \text{Gu}^4)^{-1}, \quad \xi = M^2 T_c^6 p_c^{-3}, \quad \text{Gu} = T_c / T_b, \quad (12)$$

где $T_{rb} = T / T_b$; T_b — температура кипения при нормальном давлении; a и b — постоянные.

— уравнение Цветкова и др. [19]:

$$\lambda = \lambda_b (a + b T_r), \quad (13)$$

где $a = 2,947 - 0,003 \cdot M$, $b = 0,00375 \cdot M - 2,43375$.

В работах [18, 19] уравнения (11) и (13) использованы для описания теплопроводности λ^{sat} перспективных хладагентов R1234yf, R1224yd (Z), R1233zd (E) и R1234ze (E). С целью повышения точности расчетов λ^{sat} в работе [18] предложено преобразовать зависимость (11) к следующему виду:

$$T_{rb} = a_1 + b_1 \lambda / \lambda_b. \quad (14)$$

Авторы [18] также установили связь между коэффициентами a_1 и b_1 уравнения (14) и химическим составом холодильных агентов R1234yf, R1224yd (Z), R1233zd (E) и R1234ze (E):

— уравнение Di Nicola G. et al [20]

$$\lambda = \lambda_0 \left[a + bT_r + d\omega + (eM)^f \right], \quad (15)$$

где $a = -0,6030$, $b = -0,1498$, $d = 0,0769$, $e = 1$, $f = -0,0525$, $\lambda_0 = 1$.

В данной работе мы поставили ряд задач. Во-первых, исследовать различные корреляционные зависимости, оригинальные и предложенные другими авторами, (3)–(15), для описания теплопроводности перспективных холодильных агентов (табл. 1). Объединим эти хладагенты в группу X . Во-вторых, провести сравнительный анализ данных корреляционных зависимостей на примере описания данных [21]–[32].

Анализ корреляционных зависимостей для расчета λ^{sat}

Уравнения (7)–(10) подробно исследованы в научной литературе. В частности, в работах [1, 2] и [4, 5] показано, что при вычислении теплопроводности λ^{sat} уравнения (6)–(10) существенно уступают в точности корреляционным зависимостям (3) и (4). Например, для хладагента R1234yf в [5] приведены следующие оценки AAD (average absolute deviation) при расчете λ^{sat} соответственно

по формулам (6), (7) и (10): $AAD_{(7)} = 18,4\%$, $AAD_{(8)} = 121,8\%$, $AAD_{(11)} = 23,3\%$. При этом авторы [5] рассчитывали AAD только на основе данных о теплопроводности λ^{sat} [21] по формуле [33]:

$$AAD = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left| \delta \lambda_n^{sat} \right|, \quad (16)$$

где $\delta \lambda_n^{sat} = 100\% \cdot (\lambda_{n,exp}^{sat} - \lambda_{n,ras}^{sat}) / \lambda_{n,exp}^{sat}$; $\lambda_{n,exp}^{sat}$ — экспериментальное значение λ^{sat} ; $\lambda_{n,ras}^{sat}$ — вычисленное значение λ^{sat} , $N = 24$.

В работе [5] для описания теплопроводности λ^{sat} хладагентов по формуле (3) предложен только один набор коэффициентов, A ($\lambda_0 = 0,5147$, $a = -0,2537$, $b = 0,0017$, $c = 0,1501$, $d = -0,2999$, $e = 1$), а для расчета λ^{sat} по уравнению (4) — два набора коэффициентов: B ($\lambda_0 = 0,6542$, $a = -0,2034$, $b = 0,0013$, $c = 0,1714$, $d = 0,3539$, $e = 1$, $f = -0,0070$, $\mu = 2,480$) и C ($\lambda_0 = 0,0025$, $a = -63,5823$, $b = 1,6465$, $c = -39,2912$, $d = -0,7216$, $e = 1$, $f = 1,4770$, $\mu = 2,480$). Наш анализ показал, что из приведенных наборов коэффициентов ни один набор не передает опытные данные [21]–[24] лучше других (табл. 2). Так, уравнение (3) точнее описывает данные [24], зато (4) с меньшей неопределенностью описывают соответственно теплопроводность R1234yf [22, 23] (используется набор коэффициентов B) и R1234ze (E) [21, 22] (используется набор коэффициентов C).

Отметим, что уравнения, рассчитанные на основе формул (11) и (14) практически с одинаковой точностью

Таблица 1

Физические свойства хладагентов

Table 1

Physical properties of refrigerants

Вещество	T_c , К	T_b , К	p_c , бар	M , г/моль
R1234yf	367,85	243,67	33,822	114,04159
R245fa	427,01	288,198	36,51	134,04794
R365mfc	460,0	313,3	32,66	148,07452
R1224yd (Z)	428,69	287,15	33,37	148,487
R1233zd (E)	439,52	291,41	36,237	130,4944
R1234ze (E)	382,513	254,18	36,349	114,0416
R1243zf	376,93	247,76	35,179	96,05113
R1336mzz (E)	403,53	280,58	27,792	164,05
R1336mzz (Z)	444,5	306,5	29,03	164,056

Таблица 2

AAD, рассчитанные для (3), (4), (6), (10), (11), (13)–(15)

Table 2

AAD calculated for (3), (4), (6), (10), (11), (13)–(15)

Хладагент	No*	AAD								
		(3), A	(4), B	(4), C	(6)**	(10)**	(11)	(13)	(14)	(15)
R365mfc	[24]	4,85	11,8	13,5	7,9	4,4	8,6	6,9	7,94	11,0
R1234ze (E)	[22]	5,8	6,09	2,72	13,0	12,4	0,62	2,6	0,69	12,5
	[21]	4,2	4,75	3,55	—	—	1,30	3,69	0,93	12,2
R1234yf	[23]	6,52	5,17	5,78	18,4	23,3	3,51	5,4	3,53	16,9
	[22]	8,67	2,55	7,84	—	—	4,65	7,75	4,73	19,9

* — ссылка на источник, ** — значения AAD [5]

описывают λ^{sat} (табл. 2) и в целом имеют меньшее AAD по сравнению с уравнениями (3)–(10). Заметим, что в работах [22, 27] приведены сведения о теплопроводности, λ , R1234yf, R1234ze (E) и R1233zd (E) только для однофазной области, поэтому мы нашли λ^{sat} путем экстраполяции λ на линии упругости, [9, 34], этих хладагентов.

Новая линейная корреляционная модель для λ^{sat}

Наш анализ корреляционных зависимостей, предложенных авторами работ [5, 18, 19], выполненный выше (табл. 2), показал, что линейная функция (11) позволяет с более высокой точностью описать теплопроводность R1234ze (E) и R1234yf на жидкостной ветви линии насыщения, чем уравнения (3)–(10). Поэтому, сначала мы рассмотрели насколько можно повысить точность расчетов λ^{sat} хладагентов группы X. На основе анализа опытной информации [21]–[32] мы оптимизировали линейную зависимость $\lambda(T) = f(T) = C_1 + C_2 T_r$ и привели ее к виду:

$$\lambda = f_1(T_r) = \lambda_r (a_1 + b_1 T_r), \tag{19}$$

Здесь $a_1 = 0,1284002$, $b_1 = -0,093050614$, а λ_r задается равенством:

$$\lambda_r = p_c^{U_1} (A_1 T_c^{H_1} \text{Gi}^4)^{-1}, \tag{20}$$

где $U_1 = 16 / 15$, $H_1 = 1 / 6$, $A_1 = \sqrt[5]{100}$.

Для корреляционной зависимости (19) мы рассчитали AAD_[n], где [n] — ссылка на номер источника, для каждого хладагента группы X: AAD_[21] = 1,6%, AAD_[21] = 0,44% и AAD_[22] = 1,4%, AAD_[22] = 1,6% для R1234yf и R1234ze (E), соответственно; AAD_[23] = 0,84%; AAD_[24] = 5,7%; AAD_[25] = 6,7%; AAD_[26] = 2,9%; AAD_[27] = 1,7%; AAD_[28] = 2,2%; AAD_[29] = 3,7%; AAD_[30] = 8,6%; AAD_[31] = 4,5%; AAD_[32] = 2,7%.

Максимальное значение AAD наблюдается для хладагента R1336mzz (E). Это, в частности, обусловлено тем, что между данными [29] и [30] имеет место расхождение до 6% (рис. 1).

Новая нелинейная корреляционная модель

В работе [29] приводятся опытные данные о λ^{sat} хладагента R1336mzz (E) из которых следует, что поведение λ^{sat} на жидкостной ветви линии насыщения должно описываться нелинейной функцией. С другой стороны, нелинейный характер функции $\lambda^{sat} = \lambda^{sat}(T)$ вблизи критической точки следует из современной теории критических явлений [35] и это поведение имеет сингулярный характер:

$$\lambda^{sat}(T \rightarrow T_c) \rightarrow \tau^{-\chi}, \tag{21}$$

где $\chi = \gamma - \nu$ — критический индекс теплопроводности на линии насыщения; γ — критический индекс, выбран в соответствии с рекомендациями [36]: $\gamma = 1,239$; ν — критический показатель радиуса корреляции (в рамках трехмерной модели Изинга $\nu = 0,631$).

В качестве функции, удовлетворяющей условию (21), мы выбрали нелинейную зависимость:

$$\lambda(T) = f(T) = \lambda_r (C_1 + C_2 \tau + C_3 \tau^2 + C_4 \tau^{-\chi}), \tag{22}$$

где $\tau = 1 - T_r$, $C_1 = 0,03356131$, $C_2 = 0,08564192$, $C_3 = 0,02549055$, $C_4 = 5,607693 \cdot 10^{-4}$; $\chi = 0,608$.

Как и в случае линейной зависимости (19) мы рассчитали AAD для каждого хладагента группы X: AAD_[21] = 0,55%, AAD_[21] = 1,3% и AAD_[22] = 0,87%, AAD_[22] = 1,8% для R1234yf и R1234ze (E), соответственно; AAD_[23] = 1,03%; AAD_[24] = 5,4%; AAD_[25] = 6,9%; AAD_[26] = 2,5%; AAD_[27] = 1,1%; AAD_[28] = 4,2%; AAD_[29] = 3,0%; AAD_[30] = 5,5%; AAD_[31] = 3,5%; AAD_[32] = 3,7%.

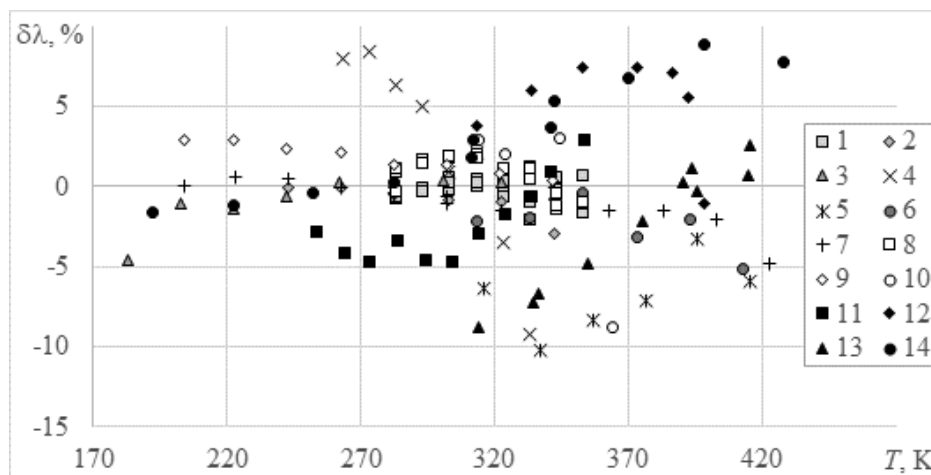


Рис. 1. Относительные отклонения теплопроводности на жидкостной ветви линии насыщения $\delta\lambda = (\lambda - f(T)) / \lambda \cdot 100\%$, рассчитанные по уравнению (21), от данных: 1 — R1234yf [21]; 2 — R1234yf [22]; 3 — R245fa [23]; 4 — R365mfc [24]; 5 — R1224yd (Z) [25]; 6 — R1233zd (E) [26]; 7 — R1233zd (E) [27]; 8 — R1234ze (E) [21]; 9 — R1234ze (E) [22]; 10 — R1243zf [28]; 11 — R1336mzz (E) [29]; 12 — R1336mzz (E) [30]; 13 — R1336mzz (Z) [31]; 14 — R1336mzz (Z) [32]

Fig. 1. Relative deviations of thermal conductivity on the liquid branch of the saturation line $f \delta\lambda = (\lambda - f(T)) / \lambda \cdot 100\%$, calculated according to equation (21), from: 1 — R1234yf [21]; 2 — R1234yf [22]; 3 — R245fa [23]; 4 — R365mfc [24]; 5 — R1224yd (Z) [25]; 6 — R1233zd (E) [26]; 7 — R1233zd (E) [27]; 8 — R1234ze (E) [21]; 9 — R1234ze (E) [22]; 10 — R1243zf [28]; 11 — R1336mzz (E) [29]; 12 — R1336mzz (E) [30]; 13 — R1336mzz (Z) [31]; 14 — R1336mzz (Z) [32]

Как это будет показано ниже, учет нелинейной зависимости теплопроводности λ^{sat} от температуры в уравнении (22) привел, по сравнению с линейными зависимостями (11), (13) и (19), к уменьшению значений AAD и ряда других статистических характеристик.

Анализ результатов исследования

С целью получить объективную характеристику, предложенных нами корреляционных зависимостей (19) и (22), произведен расчет для моделей (11), (13), (19) и (22) по группе хладагентов X (в этой группе 147 опытных точек) не только AAD (16) (табл. 3) но и другие статистические характеристики, включая BIAS (systematic deviation), SDV (standard deviation), RMS (Root-mean square deviation) и СКО (среднеквадратические отклонения) [33, 37]:

$$\text{BIAS} = \left(\sum \delta\lambda_i \right) / N,$$

$$\text{SDV} = \sqrt{\left[\sum (\delta\lambda_i - \text{BIAS})^2 \right] / (N - 1)}, \quad (23)$$

$$\text{RMS} = \sqrt{\left[\sum (\delta\lambda_i)^2 \right] / N},$$

$$\text{СКО} = \sqrt{\left[\sum (\delta\lambda_i)^2 \right] / [N \cdot (N - 1)]}. \quad (24)$$

Таблица 3

Статистические характеристики уравнений (11), (13), (19), (22)

Table 3

Statistical characteristics of the equations (11), (13), (19), (22)

Уравнение	СКО	AAD	BIAS	SDV	RSM
(11)	0,40	3,82	0,669	4,80	4,83
(13)	0,499	4,62	-0,016	6,05	6,03
(19)	0,337	2,72	-0,076	4,08	4,07
(22)	0,285	2,39	-0,116	3,46	3,45

Как следует из табл. 3, модель (22) превосходит по своим расчетным характеристикам модели (11), (13) и (19), которые не учитывают нелинейный характер поведения λ^{sat} в широком интервале температур.

В работе [18] предложен метод прогнозирования λ^{sat} на основе анализа химических формул хладагентов из группы Y : R1234yf ($\text{CF}_3\text{CF}=\text{CH}_2$), R1234ze (E) ($\text{CF}_3\text{CH}=\text{CHF}$), R1233zd (E) ($\text{CF}_3\text{CH}=\text{CHCl}$) и R1224yd (Z) ($\text{CF}_3\text{CF}=\text{CHCl}$), и получены расчетные зависимости для каждого холодильного агента из группы Y :

$$T_{rb} = a_i^* + b^* \lambda / \lambda_b, \quad (25)$$

где $b^* = -0,8316$, $a_1^* = 1,96$ (R1234yf), $a_2^* = 2,0$ (R1234ze (E)), $a_3^* = 2,04$ (R1233zd (E)) и $a_4^* = 2,08$ (R1224yd (Z)).

Наши расчеты показывают, что в рамках корреляционных моделей (25), (11) и (22) значения λ^{sat} описываются с максимальной неопределенностью $\left| \delta\lambda^{sat} \right|_{\max}$ соответственно в пределах: 14,4%, 5,6% и 2,9% для R1234yf [21, 22]; 3,6%, 3,3% и 2,9% для R1234ze (E) [21, 22]; 5,2%, 8,0% и 5,1% для R1233zd (E) [26, 27]; 11,8%,

8,7% и 10,2% для R1224yd (Z) [25]. Из приведенных значений $\left| \delta\lambda^{sat} \right|_{\max}$ следует, что модель (25) уступает по своим расчетным характеристикам моделям (11) и (22). Так максимальная относительная неопределенность $\left| \delta\lambda^{sat} \right|_{\max}$ при расчете λ^{sat} по (25) от данных [22] для R1234yf достигает 14,4%, а в случае моделей (11) и (22) имеем соответственно $\left| \delta\lambda^{sat} \right|_{\max} = 5,6\%$ и $\left| \delta\lambda^{sat} \right|_{\max} = 2,0\%$.

Выводы

Результаты произведенного исследования установили, что из известных корреляционных зависимостей (3)–(15) линейная зависимость (11) с наименьшей неопределенностью описывает теплопроводность λ^{sat} новых хладагентов из группы гидрофторхлорпроизводных олефинов. Нами показано (см. табл. 3), что можно повысить точность расчетов по линейной зависимости, $\lambda = \lambda_b(a + bT_b)$, если привести ее к виду (19), (20). Однако дальнейшее совершенствование методики [18] связано с учетом нелинейного характера поведения λ^{sat} как функции температуры, уравнение (22). При описании λ^{sat} мы учли в (22) не только нелинейный характер $\lambda^{sat}(T)$ в регулярной области термодинамической поверхности, но и вблизи критической точки. Уравнение (22), в соответствии с требованиями современной динамической масштабной теории [35], передает поведение $\lambda^{sat}(T)$ вблизи критической точки, в частности, выполняется предельный переход $\lambda^{sat}(T \rightarrow T_c) \rightarrow \infty$. В результате, предложенная нами корреляционная зависимость (22), не только удовлетворяет требованиям современной физики [35], но и существенно меньшей неопределенностью описывает λ^{sat} , чем корреляционные зависимости (3)–(15) (см. табл. 2 и 3). Таким образом, мы показали, что дальнейшее повышение точности расчетов и повышение надежности прогнозирования теплопроводности λ^{sat} новых хладагентов связано с разработкой корреляционных зависимостей, типа (22), учитывающих нелинейный характер поведения теплопроводности $\lambda^{sat} = \lambda^{sat}(T)$ как вблизи, так и вдали от критической точки системы жидкость–пар.

Литература/References

1. 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.
2. Mehmedi-Kartalaie A., Mohammadi Nafchi A., Hashemi-Moghaddam H., Vakili M. H. An Empirical Correlation for Estimation of the Thermal Conductivity of Saturated Liquid Refrigerants. *Phys. Chem. Res.* 2019. V. 7. P. 167–180.
3. Di Nicola G., Ciarrocchi E., Pierantozzi M., Stryjek R. A new equation for the thermal conductivity prediction of pure liquid compounds. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2014. V. 116. P. 135–140.
4. Lemmon E. W., Huber M. L., McLinden M. O. REFPROP: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties, NIST Standard Reference Database. Version 9.1. 2018.
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. 168–176.

6. Amooy 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, No. 2. P. 392–396.
7. Рыков С. В., Кудрявцева И. В., Попов П. В., Нурдыева М. Метод моделирования линии фазового равновесия R-245fa. // Вестник Международной академии холода. 2021. № 3. С. 65–74. DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-3-65-74 [Rykov S. V., Kudryavtseva I. V., Popov P. V., Nuryseva M. R-245fa phase equilibrium line modeling method. *Journal of International Academy of Refrigeration.* 2021. No 3. p. 65–74. DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-3-65-74. (in Russian)]
8. Рыков С. В., Кудрявцева И. В., Рыков В. А., Свердлов А. В., Нурдыева М. Анализ различных моделей среднего диаметра линии фазового равновесия R236ea // Вестник Международной академии холода. 2019. № 3. С. 87–93. [Rykov S. V., Kudryavtseva I. V., Rykov V. A., Sverdlov A. V., Nuryseva M. Analysis of various models of the average diameter of phase equilibrium line R236ea. *Journal of International Academy of Refrigeration.* 2019. No 3. p. 87–93. (in Russian)]
9. 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. P. 012113.
10. Poling B. E., Prausnitz J. M., O'Connell J. P. The Properties of Gases and Liquids. 2001. 5th ed. McGraw-Hill, New York.
11. Scheffy W. Y., Johnson, E. F., Thermal Conductivities of Liquids at High Temperatures. *J. Chem. Eng. Data.* 1961. V. 6. P. 245–249.
12. Baroncini C., Di Filippo P., Latini, G., Pacetti M. Thermal conductivity of liquids: comparison of predicted values with experimental results at different temperatures. *High Temp.-High Press.* 1979. V. 11. P. 581–586.
13. Baroncini C., Di Filippo P., Latini G. Thermal conductivity estimation of the organic and inorganic refrigerants in the saturated liquid state. *Int. J. Refrig.* 1983. V. 6. P. 60–62.
14. Latini G., Baroncini C., Pierpaoli P. Liquids under pressure: an analysis of methods for thermal conductivity prediction and a general correlation. *High Temp.-High Press.* 1987. V. 19. P. 43–50.
15. Latini G., Sotte M. Refrigerants of the methane, ethane and propane series: thermal conductivity calculation along the saturation line. *Int. J. Air-Conditioning Refrig.* 2011. V. 19. P. 37–43.
16. Latini G., Sotte M. Thermal conductivity of refrigerants in the liquid state: A comparison of estimation methods. *Int. J. Refrig.* 2012. V. 35. P. 1377–1383.
17. Gharagheizi F., Ilani-Kashkouli P., Sattari M., Mohammadi A. H., Ramjugernath D., Richon D. Development of a General Model for Determination of Thermal Conductivity of Liquid Chemical Compounds at Atmospheric Pressure. *AIChE J.* 2013. V. 59. P. 1702–1708.
18. Цветков О. Б., Митропов В. В., Лантев Ю. А. Теплопроводность жидких гидрофторхлорпроизводных олефинов. Корреляции и априорные оценки // Вестник Международной академии холода. 2021. № 3. С. 75–80. DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-3-75-80. [Tsvetkov O. B., Mitropov V. V., Laptev Yu. A. Thermal conductivity of liquid hydrofluorochloroderivatives of olefins. Correlations and a priori estimates. *Journal of International Academy of Refrigeration.* 2021. No 3. p. 75–80. DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-3-75-80. (in Russian)]
19. 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. P. 032021.
20. 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. 1–10.
21. Miyara A., Fukuda R., Tsubaki K. Thermal conductivity of saturated liquid of R1234ze (E) +R32 and R1234yf+R32 mixtures. *Trans. of the JSRAE.* 2011. V. 28, No. 4. P. 435–443.
22. 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. 4868–4874.
23. 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, No 9. P. 3286–3294.
24. Froba A. P., Krzeminski K., Leipertz A. Thermophysical Properties of 1,1,1,3,3-Pentafluorobutane (R365mfc). *Int. J. Thermophys.* 2004. V. 25, No. 4. P. 987–1004.
25. 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. 221–228.
26. 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. 174–180.
27. 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. 2659–2665.
28. 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. (in press). <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2021.07.019>
29. 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, No 26. P. 9592–9601.
30. 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. 109–117.
31. Alam Md. J., Islam 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. 220–227.
32. 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.
33. Колобаев В. А., Рыков С. В., Кудрявцева И. В., Устюжанин Е. Е., Попов П. В., Рыков В. А., Свердлов А. В., Козлов А. Д. Методика построения уравнения состояния и термодинамических таблиц для хладагента нового поколения // Измерительная техника. 2021. № 2. С. 9–15. [Kolobaev V. A.,

- Rykov S. V., Kudryavtseva I. V., Ustyuzhanin E. E., Popov P. V., Rykov V. A., Sverdlov A. V., Kozlov A. D. Methodology for constructing the equation of state and thermodynamic tables for a new generation refrigerant. *Measuring equipment*. 2021. No. 2. pp. 9–15. (in Russian)]
34. 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 Conference Proceedings*. 2020. V. 2285. P. 030070.
35. *Ma Ш.* Современная теория критических явлений. М.: Мир. 1980. 298 с. [Ma Sh. Modern theory of critical phenomena. Moscow: Mir. 1980. 298 p. (in Russian)]
36. Rykov S. V., Rykov V. A., Kudryavtseva I. V., Ustyuzhanin E. E., Sverdlov A. V. Fundamental equation of state of argon, satisfying the scaling hypothesis and working in the region of high temperatures and pressures. *Mathematica Montisnigri*. 2020. V. 47. P. 124–136.
37. Рыков С. В., Кудрявцева И. В., Рыков В. А., Нурышева М., Курбанов Б. Х. Линия фазового равновесия этана // Вестник Международной академии холода. 2021. № 2. С. 98–104. DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-2-98-104 [Rykov S. V., Kudryavtseva I. V., Rykov V. A., Nurysheva M., Kurbanov B. Kh. Ethane phase equilibrium line. Journal of International Academy of Refrigeration. 2021. No 2. p. 98–104. DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-2-98-104. (in Russian)]

Сведения об авторах

Рыков Сергей Владимирович

К. т. н., доцент факультета энергетики и экотехнологий Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, togg1@yandex.ru

Кудрявцева Ирина Владимировна

К. т. н., доцент факультета систем управления и робототехники Университета ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, togg1@yandex.ru

Рыков Владимир Алексеевич

Д. т. н., профессор, Университет ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, togg1@yandex.ru

Information about authors

Rykov Sergey V.

Ph. D., Associate Professor of Faculty of Energy and Ecotechnology of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, togg1@yandex.ru

Kudryavtseva Irina V.

Ph. D., Associate Professor of department of Faculty of Control Systems and Robotics of ITMO University, 49 Kronverksky Pr., St. Petersburg, 197101 Russia, togg1@yandex.ru

Rykov Vladimir A.

D. Sc., Professor, ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, togg1@yandex.ru



Статья доступна по лицензии
Creative Commons «Attribution-NonCommercial»



27-я международная выставка «Оборудование, технологии, сырье и ингредиенты для пищевой и перерабатывающей промышленности» 10-14 октября 2022 г.

«Агропродмаш» – международная выставка оборудования, машин и ингредиентов для пищевой и перерабатывающей промышленности – на протяжении двух десятилетий демонстрирует лучшие мировые достижения, способствуя внедрению новых современных технологий российскими предприятиями пищевой и перерабатывающей промышленности.

Организатор выставки:

ЦВК «Экспоцентр», 123100, Россия, Москва, Краснопресненская набережная, 14
Телефон: +7 (499) 795-37-23
Факс: +7 (495) 609-41-68
E-mail: voronin@expocentr.ru
Web: <https://www.agroprod mash-expo.ru/>

