

УДК 536.71

Давление насыщенного пара ряда гидрофторолефинов

Канд. техн. наук С. В. РЫКОВ¹, канд. техн. наук И. В. КУДРЯВЦЕВА¹,
Д-р техн. наук В. А. РЫКОВ¹, канд. техн. наук Д. В. КОНЯЕВ²

¹Университет ИТМО

²ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова

E-mail: togg1@yandex.ru

Предложена модель линии упругости $p=p_s(T)$, учитывающая как особенности критической точки (T_c, p_c, ρ_c), так и поведение давления насыщенного пара p_s в окрестности тройной точки ($T_{tr}, p_{tr}, \rho_{tr}$). На основе предложенной модели $p_s(T)$ обобщена вся имеющаяся информация (479 экспериментальных точек) о давлении p_s хладагентов R1243zf, R1336mzz (E) и R1336mzz (Z) и разработаны уравнения линии упругости для интервала температур от T_{tr} до T_c . Для этих хладагентов, на основе разработанных уравнений давления насыщенного пара, $p_s=p_s(T)$, рассчитаны значения ацентрического фактора и нормальной температуры Бойля. Выполнена статистическая оценка уравнений линии упругости: для R1243zf, R1336mzz (E) и R1336mzz (Z) получены соответственно следующие значения среднего абсолютного отклонения (AAD): Yin J. et al (2020), AAD=0,0182%; Sakoda N. et al (2021), AAD=0,034%; Li Sh. (2020), AAD=0,0426%. Полученные результаты обсуждаются.

Ключевые слова: хладагенты, давление насыщенного пара, R1243zf, R1336mzz (E), R1336mzz (Z), гидрофторолефины.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 17.03.2022, одобрена после рецензирования 01.08.2022, принята к печати 12.08.2022

DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-4-76-83

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Рыков С. В., Кудрявцева И. В., Рыков В. А., Коняев Д. В. Давление насыщенного пара ряда гидрофторолефинов. // Вестник Международной академии холода. 2022. № 4. С. 76–83. DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-4-76-83

Saturated vapor pressure of hydrofluoroolefins

Ph. D. S. V. RYKOV¹, Ph. D. I. V. KUDRYAVTSEVA¹, D. Sc. V. A. RYKOV¹, Ph. D. D. V. KONJAEV²

¹ITMO University

²Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping

E-mail: togg1@yandex.ru

A model of saturated vapor pressure $p=p_s(T)$ is proposed, which takes into account both the features of the critical point (T_c, p_c, ρ_c) and the behavior of the saturated vapor pressure p_s in the vicinity of the triple point ($T_{tr}, p_{tr}, \rho_{tr}$). Based on the proposed model $p_s(T)$, all available information (479 experimental points) on the pressure of the refrigerants R1243zf, R1336mzz (E) and R1336mzz (Z) is generalized and the equations for the elasticity line are developed for the temperature range from T_{tr} to T_c . For these refrigerants, on the basis of the developed equations for saturated vapor pressure $p_s=p_s(T)$, the values of the acentric factor and the normal Boyle temperature are calculated. A statistical evaluation of the elasticity line equations was performed: for R1243zf, R1336mzz (E), and R1336mzz (Z) the following mean absolute deviation (AAD) values were obtained respectively: Yin J. et al (2020), AAD=0.0182%; Sakoda N. et al (2021), AAD=0.034%; Li Sh. (2020), AAD=0.0426%. The results obtained are discussed.

Keywords: refrigerants, saturated vapor pressure, R1243zf, R1336mzz (E), R1336mzz (Z), hydrofluoroolefins.

Article info:

Received 17/03/2022, approved after reviewing 01/08/2022, accepted 12/08/2022

DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-4-76-83

Article in Russian

For citation:

Rykov S. V., Kudryavtseva I. V., Rykov V. A., Konjaev D. V. Saturated vapor pressure of hydrofluoroolefins. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2022. No 4. p. 76–83. DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-4-76-83

Введение

Сведения о давлении насыщенного пара, p_s , в широком диапазоне температур имеют важное значение в науке и технике, в частности, при проектировании и эксплуатации систем жизнеобеспечения, холодильного и криогенного оборудования. Высокоточные измерения зависимости p_s от температуры позволяют, во-первых, уточнить ряд физических характеристик вещества, таких как критическая температура и давление, во-вторых, рассчитать ацентрический фактор, ω , и нормальную температуру кипения, T_{nb} , а также первую производную $p'_s(T)$, которая входит в модифицированное уравнение Клапейрона-Клаузиуса, описывающее плотность насыщенного пара [1]. Использование уравнения упругости $p_s = p_s(T)$ позволяет эффективно, как показано в [2], рассчитывать по фундаментальным уравнениям состояния линию насыщения в интервале от температуры тройной точки, T_{tr} , до критической температуры, T_c . Данные о факторе ω и температуре T_{nb} эффективно также используются при расчете и прогнозировании переносных характеристик вещества. Например, теплопроводности на жидкостной ветви линии насыщения [3, 4].

В настоящее время происходит переход в холодильной промышленности, климатической отрасли к новым холодильным агентам — гидрофторхлорпроизводных олефинов. Проводятся интенсивные теплофизические исследования этих холодильных агентов, непрерывно появляются новые данные, в частности, о давлении p_s этих хладагентов. Цель данной работы — это, во-первых, обобщить известные данные о p_s трех холодильных агентах нового поколения (гидрофторолефинов, ГФО): R1243zf ($CF_3CH=CH_2$), R1336mzz (E) ($CF_3CH=CHCF_3$) и R1336mzz (Z) ($CF_3CH=CHCF_3$). Во-вторых, разработать обобщенную физически обоснованную модель линии

упругости, которая удовлетворяет требованиям масштабной теории критической точки [5]. В-третьих, на основе предложенных уравнений линии упругости рассчитать ацентрический фактор и нормальную температуру кипения. В табл. 1 приведены физические характеристики исследуемых хладагентов, а также ссылки на источники этих характеристик [6]–[11].

Математическая модель давления насыщенного пара

Результаты исследования давления насыщенного пара рассматриваемых хладагентов приведены в работах [8, 10, 12–23]. Для аппроксимации этих данных мы разработали следующее уравнение:

$$p_s(T) = p_c e^{-\frac{a_0}{t} \tau^2} \left(1 + a_1 \tau + a_2 |\tau|^{2-\alpha} + a_3 |\tau|^{2-\alpha+\Delta} + \sum_{i=4}^7 a_i \tau^{s_i} \right), \quad (1)$$

где p_c — критическое давление; $t = T / T_c$ — приведенная температура; $\tau = t - 1$; α — критический индекс изохорной теплоемкости; Δ — неасимптотический критический индекс; a_i — постоянные коэффициенты; $s_i \in N$ — показатели степени; N — множество натуральных чисел.

Согласно выражению (1), в рамках данной модели в окрестности критической точки обеспечен, в соответствии с требованиями МТ, предельный переход второй производной p''_s :

$$p''_s(T \rightarrow T_c) \sim |\tau|^{-\alpha} \Big|_{T \rightarrow T_c} \rightarrow +\infty. \quad (2)$$

В окрестности критической точки модель (1) согласуется с моделью Вегнера [24]:

Таблица 1

Физические характеристики хладагентов

Table 1

Physical characteristics of refrigerants

Вещество	№	T_c , К	№	T_{tr} , К	№	p_c , МПа	№	M , г/моль
R1243zf	[7]	376,93	[6]	122,80	[7]	3,5179	[7]	96,05113
R1336mzz (E)	[8]	403,53	[4]	200,15	[8]	2,7792	[9]	164,05
R1336mzz (Z)	[10]	444,50	[11]	182,65	[10]	2,9030	[10]	164,056

Таблица 2

Коэффициенты уравнения линии упругости

Table 2

Coefficients for the equation of elasticity line

Вещество		R1243zf	R1336mzz(E)	R1336mzz(Z)
i	s_i	a_i	a_i	a_i
0	0	9,6	9,6	9,6
1	0	7,421645996946581	8,135013508372767	7,939084871676906
2	0	40,522790396158165	56,000570171058364	22,47616392381647
3	0	-22,667450747515996	-17,42054454143922	-42,640721030140064
4	2	-16,920422465991287	-35,56004991623026	16,339522604070307
5	5	-33,02625183419022	82,5289075890567	-150,3867982628382
6	6	-46,71532505973685	467,13009998369773	-408,838140442331
7	7	-18,32589316914236	638,1093894665889	-345,1448798771295

$$\ln \pi|_{T \rightarrow T_r} \sim -\frac{a_0}{T}, \tag{3}$$

где $\pi = p / p_c$, $a_0 > 0$.

Значения коэффициентов a_i уравнения (1) мы определили в ходе поиска минимума функционала:

$$\Phi = \sum_{j=1}^J Q_j \left(p_j^{(\text{exp})}(T_j) - p_j^{(\text{ras})}(T_j) \right)^2, \tag{4}$$

где Q_j — «вес» экспериментальной точки $p_j^{(\text{exp})} - T_j$ из массива данных для: R1243zf [13]–[18], R1336mzz (E) [8, 19–21] и R1336mzz (Z) [10, 12, 21–24]; J — количество опытных точек: $J = 158$ (R1243zf); $J = 68$ (R1336mzz (E)); $J = 152$ (R1336mzz (Z)).

В компьютерной программе мы использовали метод сингулярного разложения (SVD) [25], реализованный в пакете MathCad 15 [26].

Значения критических индексов приняты в соответствии с требованиями МТ [5]: $\alpha = 0.11$ и $\Delta = 0.51$. Показатели степени s_i и коэффициенты a_i приведены в табл. 2.

Анализ результатов исследования

Точность расчетов p_s по уравнениям линии упругости (1) мы оценили, используя следующие статистические характеристики [27, 28]:

— среднеквадратические отклонения (СКО):

$$\text{СКО} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^J (\delta p_j)^2}{J \cdot (J - 1)}}, \tag{5}$$

— среднее абсолютное отклонение (AAD):

$$\text{AAD} = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J |\delta p_j|, \tag{6}$$

— систематическое отклонение (BIAS):

$$\text{BIAS} = \frac{1}{J} \left(\sum_{j=1}^J \delta p_j \right), \tag{7}$$

— стандартное отклонение (SDV):

$$\text{SDV} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^J (\delta p_j - \text{BIAS})^2}{J - 1}} \tag{8}$$

где $\delta p_j = 100\% \cdot (p_j^{(\text{exp})} - p_j^{(\text{ras})}) / p_j^{(\text{exp})}$.

Значения статистических характеристик, рассчитанных по формулам (5)–(8) для хладагентов R1243zf, R1336mzz (E) и R1336mzz (Z) представлены в табл. 3–5.

На рис. 1–3 представлены относительные отклонения δp_s экспериментальных значений $p_s^{(\text{exp})}$ [8, 10, 12–23] от значений давления $p_s^{(\text{ras})}$, рассчитанных по уравнению (1).

Из информации, представленной на рис. 1–3 и в табл. 3–5 следует, что наиболее точные данные о давлении p_s для R1243zf представлены Yin J. et al. (2020) в диапазоне от 253 К до 376 К. Значения статистических характеристик для этих данных почти в 10 раз меньше, чем для остальных данных о p_s R1243zf [13–15, 17, 18].

Для R1336mzz (E) наиболее точные данные приведены в Sakoda N. et al. (2020) в [8] для интервала 286 К

Таблица 3

Статистические характеристики уравнения R1243zf (1)

Table 3

Statistical characteristics of the equation for R1243zf (1)

Источник	Количество точек	СКО	AAD	BIAS	SDV
Brown J. S. et al (2013) [13] (ITC–CNR)	55	0,027	0,153	–0,078	0,184
Brown J. S. et al (2013) [13] (UnivPM)	28	0,0721	0,181	–0,017	0,381
Higashi Y. et al (2018) [14]	20	0,0294	0,118	0,118	0,051
Yang Zh. et al (2019) [15]	17	0,0459	0,141	–0,0122	0,189
Yin J. et al (2020) [16]	26	0,00514	0,0182	0,000684	0,0262
Ding L. (2020) [17]	6	0,403	0,75	–0,691	0,634
Yao X. et al (2020) [18]	6	0,404	0,758	–0,758	0,538

Таблица 4

Статистические характеристики уравнения R1336mzz(E) (1)

Table 4

Statistical characteristics of the equation for R1336mzz(E) (1)

Источник	Количество точек	СКО	AAD	BIAS	SDV
Tanaka K. et al (2017) [19]	17	0,0502	0,159	–0,00908	0,207
Sakoda N. et al (2021) [8]	26	0,0125	0,034	–0,000855	0,064
Boonaert E. et al (2020) [20]	17	0,194	0,711	0,711	0,326
Raabe G. (2015) [21]	8	2,97	7,27	6,69	4,41

Таблица 5

Статистические характеристики уравнения R1336mzz(Z) (1)

Table 5

Statistical characteristics of the equation for R1336mzz(Z) (1)

Источник	Количество точек	СКО	AAD	BIAS	SDV
McLinden M. O. and Akasaka R. (2020) [10]	21	0,0565	0,147	0,114	0,231
Li Sh. (2020) [22]	91	0,00574	0,0426	0,00921	0,0539
Sakoda N. et al (2020) [12]	17	0,075	0,194	-0,0819	0,298
Tanaka K. et al (2016) [23]	13	0,0627	0,177	0,132	0,179
Raabe G. (2015) [21]	10	1,51	3,89	2,9	3,66

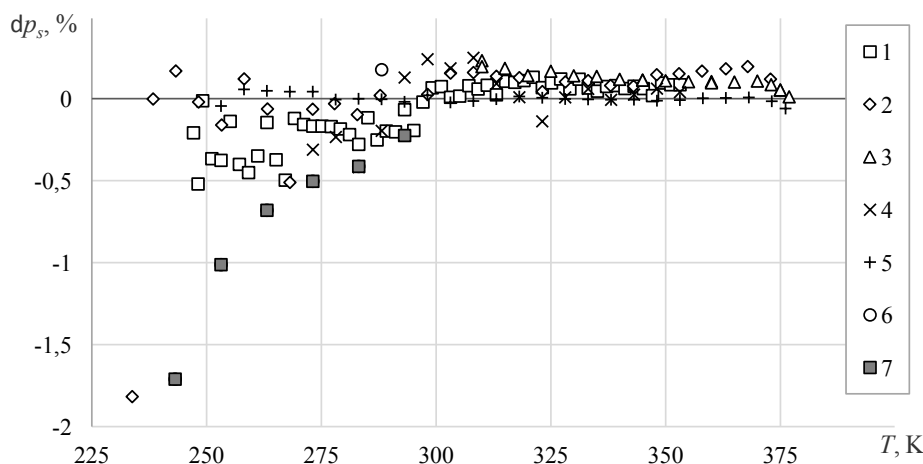


Рис. 1. Относительные отклонения $\delta p_s = 100\% \cdot (p_s^{(exp)} - p_s^{(ras)}) / p_s^{(exp)}$ давления на линии насыщения R1243zf,

где $p_s^{(ras)}$ — значения, рассчитанные по уравнению (1), $p_s^{(exp)}$ — экспериментальные значения давления насыщения:

1 — Brown J. S. et al. (2013) [13] (ITC-CNR); 2 — Brown J. S. et al. (2013) [13] (UnivPM), 3 — Higashi Y. et al. (2018) [14], 4 — Yang Zh. et al. (2019) [15]; 5 — Yin J. et al. (2020) [16]; 6 — Ding L. (2020) [17]; 7 — Yao X. et al. (2020) [18]

Fig. 1. Relative deviations $\delta p_s = 100\% \cdot (p_s^{(exp)} - p_s^{(ras)}) / p_s^{(exp)}$ of the pressure on the saturation line for R1243zf,

where $p_s^{(ras)}$ are the values calculated according to equation (1) and $p_s^{(exp)}$ are the experimental values of saturation pressure:

1 — Brown J. S. et al. (2013) [13] (ITC-CNR); 2 — Brown J. S. et al. (2013) [13] (UnivPM); 3 — Higashi Y. et al. (2018) [14]; 4 — Yang Zh. et al. (2019) [15]; 5 — Yin J. et al. (2020) [16]; 6 — Ding L. (2020) [17]; 7 — Yao X. et al. (2020) [18]

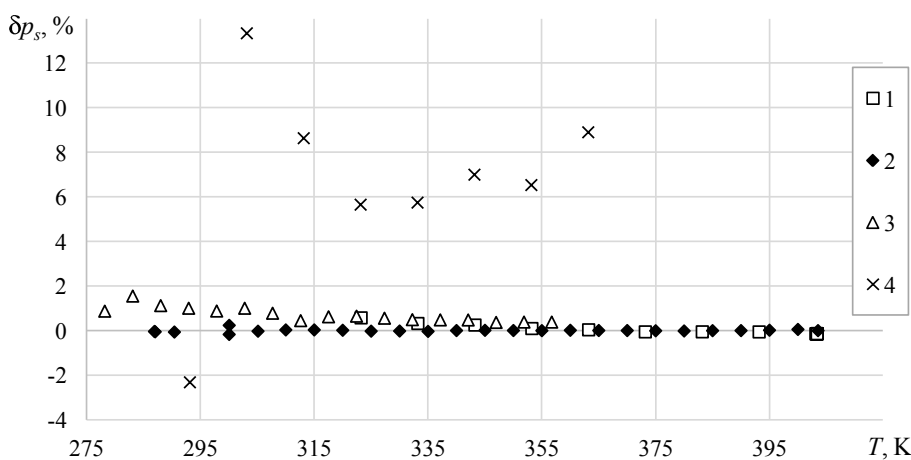


Рис. 2. Относительные отклонения $\delta p_s = 100\% \cdot (p_s^{(exp)} - p_s^{(ras)}) / p_s^{(exp)}$ давления на линии насыщения R1336mzz (E),

где $p_s^{(ras)}$ — значения, рассчитанные по уравнению (1), $p_s^{(exp)}$ — экспериментальные значения давления насыщения:

1 — Tanaka K. et al. (2017) [19]; 2 — Sakoda N. et al. (2021) [8]; 3 — Boonaert E. et al. (2020) [20]; 4 — Raabe G. (2015) [21]

Fig. 2. Relative deviations $\delta p_s = 100\% \cdot (p_s^{(exp)} - p_s^{(ras)}) / p_s^{(exp)}$ of the pressure on the saturation line for R1336mzz (E),

where $p_s^{(ras)}$ are the values calculated according to equation (1) and $p_s^{(exp)}$ are the experimental values of saturation pressure:

1 — Tanaka K. et al. (2017) [19]; 2 — Sakoda N. et al. (2021) [8]; 3 — Boonaert E. et al. (2020) [20]; 4 — Raabe G. (2015) [21]

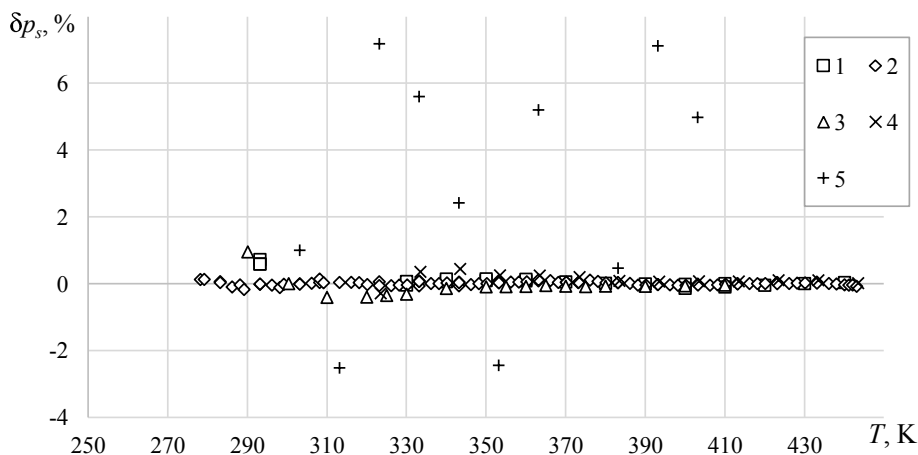


Рис. 3. Относительные отклонения $\delta p_s = 100\% \cdot (p_s^{(exp)} - p_s^{(ras)}) / p_s^{(exp)}$ давления на линии насыщения R1336mzz(Z), где $p_s^{(ras)}$ — значения, рассчитанные по уравнению (1), $p_s^{(exp)}$ — экспериментальные значения давления насыщения: 1 — McLinden M. O. and Akasaka R. (2020) [10]; 2 — Li Sh. (2020) [22]; 3 — Sakoda N. et al. (2020) [12]; 4 — Tanaka K. et al. (2016) [23]; 5 — Raabe G. (2015) [21]

Fig. 3. Relative deviations $\delta p_s = 100\% \cdot (p_s^{(exp)} - p_s^{(ras)}) / p_s^{(exp)}$ of the pressure on the saturation line for R1336mzz(Z), where $p_s^{(ras)}$ are the values calculated according to equation (1) and $p_s^{(exp)}$ are the experimental values of saturation pressure: 1 — McLinden M. O. and Akasaka R. (2020) [10]; 2 — Li Sh. (2020) [22]; 3 — Sakoda N. et al. (2020) [12]; 4 — Tanaka K. et al. (2016) [23]; 5 — Raabe G. (2015) [21]

до 403 К. Значения статистических характеристик для этих данных, по крайней мере, более чем в 5 раз меньше, чем для остальных данных о p_s R1336mzz (E) [19]–[21].

Для R1336mzz (Z) наиболее точные данные приведены в Li Sh. (2020) [22] для интервала 278 К до 443 К. Значения среднеквадратического отклонения СКО этих данных более чем в 9 раз меньше, чем для остальных данных о p_s R1336mzz (Z) [10, 12, 21, 23]. Заметим, что наиболее точные данные получены в 2020 г. (R1243zf) и в 2021 г. (R1336mzz (E) и R1336mzz (Z)). Поэтому эти данные не учитываются при расчетах, выполняемых в рамках REFPROP и CoolProp, что приводит к снижению точности при вычислении давления насыщенного пара хладагентов, исследуемых в данной работе.

При расчетах и, особенно, прогнозировании равновесных и неравновесных свойств [29]–[32] большое значение имеет точность, с которой определен ацентрический фактор и нормальная температура кипения. Поскольку наиболее точно эти параметры можно установить на основе данных о давлении насыщенного пара, то есть по уравнению линии упругости, мы по уравнению (1) рассчитали температуру T_{nb} и ацентрический фактор [33]:

$$\omega = -\log_{10} \left(\frac{p_s(T_{07})}{p_c} \right) - 1, \tag{9}$$

где $T_{07}=0,7T_c$.

Полученные значения T_{nb} и ω (1), приведены в табл. 6.

В таблице 6 приведены известные значения (см. [7–10, 23]) нормальной температуры кипения T_{nb}^* и ацентрического фактора, ω^* . Отметим, что в случае хладагентов R1243zf и R1336mzz (Z) значения T_{nb} и ω , рассчитанные по точным уравнениям линии упругости (1) с коэффициентами, представленными в таблице 2, удовлетворительно согласуются с известными значениями T_{nb}^* и ω^* [7–10, 23]. Для хладагента R1336mzz (E) расхождения между указанными нормальными температурами кипения и ацентрическими факторами существенно больше: $\delta T_{nb}^* = (T_{nb}^* - T_{nb}) / T_{nb}^* \cdot 100\% = -0,15\%$ и $\delta \omega = 100\% \cdot (\omega^* - \omega) / \omega^* = 1,08\%$.

Выводы

Разработанная математическая модель давления насыщенного пара (1) апробирована на примере новых

Физические характеристики хладагентов

Таблица 6

Table 6

Physical characteristics of refrigerants

Вещество	№	T_{nb}^* , К	T_{nb} , К	№	ω^*	ω
R1243zf	[7]	247,726	247,644	[7]	0,260282691	0,261548239
R1336mzz (E)	[9]	280,58	280,998	[8]	0,412508104	0,408039506
R1336mzz (Z)	[10]	306,5	306,59	[23]	0,3867176	0,38664153

холодильных агентов R1243zf, R1336mzz(E) и R1336mzz(Z) и показала хорошие расчетные характеристики. В отличие известных уравнений линии упругости, разработанных для данных гидрофторолефинов, уравнение (1) удовлетворяет требованиям масштабной теории критической точки, что позволило улучшить расчетные характеристики и повысить точность опре-

деления нормальной температуры кипения и ацентрического фактора хладагентов R1243zf, R1336mzz(E) и R1336mzz(Z). Результаты работы можно использовать при расчете равновесных свойств по методикам [27, 32], а также при прогнозировании теплопроводности жидких гидрофторолефинов и гидрохлорфторолефинов на линии насыщения [34].

Литература

References

- 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.
- Rykov V. A., Rykov S. V., Sverdlov A. V. Fundamental equation of state for R1234yf // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019. V. 1385. P. 012013.
- 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
- 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. 172–180.
- Ma Sh. *Modern Theory of Critical Phenomena* (New York, NY: Roudedge). 2018.
- Di Nicola G., Brandoni C., Di Nicola C., Giuliani G. Triple point measurements for alternative refrigerants // *J. Therm. Anal. Calorim.* 2012. V. 108. P. 627–631.
- 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. 4679–4691.
- 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. 734–739.
- 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. 9592–9601.
- McLinden M. O., Akasaka R. Thermodynamic Properties of cis-1,1,1,4,4,4-Hexafluorobutene [R-1336mzz (Z)]: Vapor Pressure, (p, ρ , T) Behavior, and Speed of Sound Measurements and Equation of State // *J. Chem. Eng. Data*. 2020. V. 65. P. 4201–4214.
- 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.
- Sakoda N., Higashi Y., Akasaka R. Measurements of Vapor Pressures for trans-1-Chloro-3,3,3-trifluoropropene (R1233zd (E)) and cis-1,1,1,4,4,4-Hexafluoro-2-butene (R1336mzz (Z)) // *J. Chem. Eng. Data*. 2020. V. 65. P. 4285–4289.
- Brown J. S., Di Nicola G., Fedele L., Bobbo S., Zilio C. Saturated pressure measurements of 3,3,3-trifluoroprop-1-ene (R1243zf) for reduced temperatures ranging from 0.62 to 0.98 // *Fluid Phase Equilib.* 2013. V. 351. P. 48–52.
- Higashi Y., Sakoda N., Islam Md. A., Takata Y., Koyama Sh., Akasaka R. Measurements of Saturation Pressures for
- 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.
- Rykov V. A., Rykov S. V., Sverdlov A. V. Fundamental equation of state for R1234yf. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019. V. 1385. P. 012013.
- 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)
- 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. 172–180.
- Ma Sh. *Modern Theory of Critical Phenomena* (New York, NY: Roudedge). 2018.
- Di Nicola G., Brandoni C., Di Nicola C., Giuliani G. Triple point measurements for alternative refrigerants. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2012. V. 108. P. 627–631.
- 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. 4679–4691.
- 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. 734–739.
- 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. 9592–9601.
- McLinden M. O., Akasaka R. Thermodynamic Properties of cis-1,1,1,4,4,4-Hexafluorobutene [R-1336mzz (Z)]: Vapor Pressure, (p, ρ , T) Behavior, and Speed of Sound Measurements and Equation of State. *J. Chem. Eng. Data*. 2020. V. 65. P. 4201–4214.
- 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.
- Sakoda N., Higashi Y., Akasaka R. Measurements of Vapor Pressures for trans-1-Chloro-3,3,3-trifluoropropene (R1233zd (E)) and cis-1,1,1,4,4,4-Hexafluoro-2-butene (R1336mzz (Z)). *J. Chem. Eng. Data*. 2020. V. 65. P. 4285–4289.
- Brown J. S., Di Nicola G., Fedele L., Bobbo S., Zilio C. Saturated pressure measurements of 3,3,3-trifluoroprop-1-ene (R1243zf) for reduced temperatures ranging from 0.62 to 0.98. *Fluid Phase Equilib.* 2013. V. 351. P. 48–52.
- Higashi Y., Sakoda N., Islam Md. A., Takata Y., Koyama Sh., Akasaka R. Measurements of Saturation Pressures for Trifluoro-

- Trifluoroethene (R1123) and 3,3,3-Trifluoropropene (R1243zf) // *J. Chem. Eng. Data*. 2018. V. 63. P. 417–421.
15. Yang Zh., Tang X., Wu J., Lu J. Experimental measurements of saturated vapor pressure and isothermal vapor-liquid equilibria for 1,1,1,2-Tetrafluoroethane (HFC-134a)+3,3,3-trifluoropropene (HFO-1243zf) binary system // *Fluid Phase Equilib.* 2019. V. 498. P. 86–93.
 16. Yin J., Ke J., Zhao G., Ma S. Saturated vapor pressure and gaseous pvT property measurements for 3,3,3-trifluoroprop-1-ene (R1243zf) // *Int. J. Refrig.* 2020. V. 117. P. 175–180.
 17. Ding L., Yao X., Hou Y., Zhao Y., Dong X., Gong M. Isothermal (vapour-liquid) equilibrium for the binary {3,3,3-trifluoropropene (R1243zf)+propane (R290)} system at temperatures from 243.150 K to 288.150 K // *J. Chem. Thermodyn.* 2020. V. 144. P. 106091.
 18. Yao X., Ding L., Dong X., Zhao Y., Wang X., Shen J., Gong M. Experimental measurement of vapor-liquid equilibrium for 3,3,3-trifluoropropene (R1243zf)+1,1,1,2-tetrafluoroethane (R134a) at temperatures from 243.150 to 293.150 K // *Int. J. Refrig.* 2020. V. 120. P. 97–103.
 19. Tanaka K., Ishikawa J., Kontomaris K. K. Thermodynamic properties of HFO-1336mzz (E) (trans-1,1,1,4,4,4-hexafluoro-2-butene) at saturation conditions // *Int. J. Refrig.* 2017. V. 82. P. 283–287.
 20. Boonaert E., Valtz A., Brocus J., Coquelet Ch., Beucher Y., De Carlan F., Fourmigué J. Vapor-Liquid equilibrium measurements for 5 binary mixtures involving HFO-1336mzz (E) at temperatures from 313 to 353 K and pressures up to 2.735 MPa // *Int. J. Refrig.* 2020. V. 114. P. 210–220.
 21. Raabe G. Molecular Simulation Studies on the Vapor-Liquid Equilibria of the cis- and trans-HCFO-1233zd and the cis- and trans-HFO-1336mzz // *J. Chem. Eng. Data*. 2015. V. 60. P. 2412–2419.
 22. Li Sh., Xu L., Liu H., Yang Zh., Duan Y. Vapor Pressure Measurements and Correlation for cis-1,1,1,4,4,4-Hexafluoro-2-butene (HFO-1336mzz (Z)) // *J. Chem. Eng. Data*. 2020. V. 65. P. 4223–4229.
 23. Tanaka K., Akasaka R., Sakaue E., Ishikawa J., Kontomaris K. K. Thermodynamic Properties of cis-1,1,1,4,4,4-Hexafluoro-2-butene (HFO-1336mzz (Z)): Measurements of the ppT Property and Determinations of Vapor Pressures, Saturated Liquid and Vapor Densities, and Critical Parameters // *J. Chem. Eng. Data*. 2016. V. 61. P. 2467–2473.
 24. Rykov S. V., Kudryavtseva I. V., Rykov V. A., Ustyuzhanin E. E., Ochkov V. F. Analysis of the saturation line on the basis of Clapeyron-Clausius and Gibbs-Duhem equations // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019. V. 1147. P. 012017.
 25. Форсайт Дж., Малькольм Н., Моулер К. Машинные методы математических вычислений. М.: Мир, 1980. 280 с.
 26. Рыков С. В., Кудрявцева И. В., Рыков С. А., Рыков В. А. Практикум по работе в математическом пакете MathCAD: СПб.: НИУ ИТМО, ИХиБТ, 2015. 84 с.
 27. 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.
 28. Рыков С. В., Кудрявцева И. В., Рыков В. А., Нурдыева 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
 - oroethene (R1123) and 3,3,3-Trifluoropropene (R1243zf). *J. Chem. Eng. Data*. 2018. V. 63. P. 417–421.
 15. Yang Zh., Tang X., Wu J., Lu J. Experimental measurements of saturated vapor pressure and isothermal vapor-liquid equilibria for 1,1,1,2-Tetrafluoroethane (HFC-134a)+3,3,3-trifluoropropene (HFO-1243zf) binary system. *Fluid Phase Equilib.* 2019. V. 498. P. 86–93.
 16. Yin J., Ke J., Zhao G., Ma S. Saturated vapor pressure and gaseous pvT property measurements for 3,3,3-trifluoroprop-1-ene (R1243zf). *Int. J. Refrig.* 2020. V. 117. P. 175–180.
 17. Ding L., Yao X., Hou Y., Zhao Y., Dong X., Gong M. Isothermal (vapour-liquid) equilibrium for the binary {3,3,3-trifluoropropene (R1243zf)+propane (R290)} system at temperatures from 243.150 K to 288.150 K. *J. Chem. Thermodyn.* 2020. V. 144. P. 106091.
 18. Yao X., Ding L., Dong X., Zhao Y., Wang X., Shen J., Gong M. Experimental measurement of vapor-liquid equilibrium for 3,3,3-trifluoropropene (R1243zf)+1,1,1,2-tetrafluoroethane (R134a) at temperatures from 243.150 to 293.150 K. *Int. J. Refrig.* 2020. V. 120. P. 97–103.
 19. Tanaka K., Ishikawa J., Kontomaris K. K. Thermodynamic properties of HFO-1336mzz (E) (trans-1,1,1,4,4,4-hexafluoro-2-butene) at saturation conditions. *Int. J. Refrig.* 2017. V. 82. P. 283–287.
 20. Boonaert E., Valtz A., Brocus J., Coquelet Ch., Beucher Y., De Carlan F., Fourmigué J. Vapor-Liquid equilibrium measurements for 5 binary mixtures involving HFO-1336mzz (E) at temperatures from 313 to 353 K and pressures up to 2.735 MPa. *Int. J. Refrig.* 2020. V. 114. P. 210–220.
 21. Raabe G. Molecular Simulation Studies on the Vapor-Liquid Equilibria of the cis- and trans-HCFO-1233zd and the cis- and trans-HFO-1336mzz. *J. Chem. Eng. Data*. 2015. V. 60. P. 2412–2419.
 22. Li Sh., Xu L., Liu H., Yang Zh., Duan Y. Vapor Pressure Measurements and Correlation for cis-1,1,1,4,4,4-Hexafluoro-2-butene (HFO-1336mzz (Z)). *J. Chem. Eng. Data*. 2020. V. 65. P. 4223–4229.
 23. Tanaka K., Akasaka R., Sakaue E., Ishikawa J., Kontomaris K. K. Thermodynamic Properties of cis-1,1,1,4,4,4-Hexafluoro-2-butene (HFO-1336mzz (Z)): Measurements of the ppT Property and Determinations of Vapor Pressures, Saturated Liquid and Vapor Densities, and Critical Parameters. *J. Chem. Eng. Data*. 2016. V. 61. P. 2467–2473.
 24. Rykov S. V., Kudryavtseva I. V., Rykov V. A., Ustyuzhanin E. E., Ochkov V. F. Analysis of the saturation line on the basis of Clapeyron-Clausius and Gibbs-Duhem equations. *J. Phys. Conf. Ser.* 2019. V. 1147. P. 012017.
 25. Forsythe G. E., Malcolm M. A., Moler C. B. 1977. *Computer Methods for Mathematical Computations* (Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall).
 26. Rykov S. V., Kudryavtseva I. V., Rykov S. A., Rykov V. A. Workshop on working in the mathematical package MathCAD: St. Petersburg: ITMO University, 2015. 84 p. (in Russian)
 27. 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. P. 9–15. (in Russian)
 28. Rykov S. V., Kudryavtseva I. V., Rykov V. A., Nuryseva M., Kurbanov B. Ch. A ethane phase equilibrium lines. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2021. No 2. P. 98–104. DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-2-98-104. (in Russian)

29. 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. P. 030070.
30. Kudryavtseva I. V., Rykov V. A., Rykov S. V., Ustyuzhanin E. E. A model system of the liquid density, the gas density and the pressure on the saturation line of SF₆ // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019. V. 1385. P. 012010
31. 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.
32. 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. P. 012118.
33. Уэйлес С. Фазовые равновесия в химической технологии. I часть. М.: Мир, 1989. 301 с.
34. Цветков О. Б., Лантев Ю. А., Митропов В. В., Шарков А. В., Федоров А. В. Интерпретация фононной модели теплопроводности транс-1-хлор-3,3,3-трифторпропена (HFO-1233zd (E)) на жидкостной ветви бинаднали // *Вестник Международной академии холода.* 2020. № 1. С. 103–107.
29. 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. P. 030070.
30. Kudryavtseva I. V., Rykov V. A., Rykov S. V., Ustyuzhanin E. E. A model system of the liquid density, the gas density and the pressure on the saturation line of SF₆ // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019. V. 1385. P. 012010
31. 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.
32. 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. P. 012118.
33. Walas S. M. Phase Equilibria in Chemical Engineering (Butterworth Publishers). 1985.
34. Tsvetkov O. B., Laptev Yu. A., Mitropov V. V., Sharkov A. V., Fedorov A. V. Interpretation of photonic model for trans-1-chloro-3,3,3-trifluoropropene (HFO-1233zd (E)) thermal conductivity for the liquid branch of the bimodal. *Journal of International Academy of Refrigeration.* 2020. No 1. P. 103–107. (in Russian)

Сведения об авторах

Рыков Сергей Владимирович

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

Кудрявцева Ирина Владимировна

К. т. н., доцент научно-образовательного центра математики 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

Коняев Дмитрий Викторович

К. т. н., доцент, ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, koniaevdv@gumrf.ru

Information about authors

Rykov Sergey V.

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

Kudryavtseva Irina V.

Ph. D., Associate Professor of the Scientific and Educational Center of Mathematics 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

Koniaev Dmitry V.

Ph. D., Associate Professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 198035, Russia, Saint-Petersburg, Dvinskaya st., 5/7, koniaevdv@gumrf.ru



Статья доступна по лицензии
Creative Commons «Attribution-NonCommercial»

О Перечне рецензируемых научных изданий

В связи с вступлением в силу новой редакции номенклатуры научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени, утвержденной приказом Минобрнауки России от 24 февраля 2021 г. № 118, издано распоряжение Минобрнауки России от 1 февраля 2022 г. № 33-р о Перечне рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Вестник Международной академии холода включен в Перечень рецензируемых научных изданий (по состоянию на 28.11.2022 г.) под № 445

Подробная информация на сайте ВАК РФ в разделе "Документы" – "Рецензируемые издания"