

УДК 536.71

Метод описания линии насыщения на основе данных о кажущейся теплоте парообразования и уравнения Клапейрона-Клаузиуса*

Канд. техн. наук С. В. РЫКОВ¹, канд. техн. наук И. В. КУДРЯВЦЕВА,
М. И. ПОЛТОРАЦКИЙ, д-р техн. наук В. А. РЫКОВ¹, М. В. КЛИМОВИЧ
¹togg1@yandex.ru
Университет ИТМО

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 15-08-08503)

Показано, что введение в структуру уравнения Клапейрона-Клаузиуса кажущейся теплоты парообразования позволяет описать паровую ветвь линии фазового равновесия от тройной точки до критической точки. При этом в окрестности тройной точки обеспечивается переход к состоянию близкому к идеально-газовому состоянию, а в окрестности критической точки обеспечивается выполнение «завершенного» скейлинга, согласно которому поведение среднего диаметра определяется показателем степени 2β (β — критический индекс кривой сосуществования). Предложенная методика апробирована на примере описания паровой ветви линии фазового равновесия хладагента R218. Погрешность описания плотности насыщенного пара, давления на линии упругости и кажущейся теплоты парообразования хладагента R218 соответствуют экспериментальной. Особо следует отметить, что вблизи тройной точки, во-первых, плотность хладагента R218 завышена на 0,2% по отношению к плотности, рассчитанной на основе модели идеального газа, во-вторых, кажущаяся теплота парообразования, рассчитанная на основе предложенной методики, отличается от значений, рассчитанных по модели идеального газа, всего на 0,03%.

Ключевые слова: линия насыщения, линия упругости, средний диаметр, критические индексы, критическая точка, тройная точка, хладагент R218, термодинамические свойства.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 21.11.2016, принята к печати 15.05.2017

DOI: 10.21047/1606-4313-2017-16-2-66-72

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Рыков С. В., Кудрявцева И. В., Полторацкий М. И., Рыков В. А., Климович М. В. Метод описания линии насыщения на основе данных о кажущейся теплоте парообразования и уравнения Клапейрона-Клаузиуса // Вестник Международной академии холода. 2017. № 2. С. 66–72.

A method of describing the saturation line based on the apparent heat of vaporization and Clausius-Clapeyron equation

Ph. D. S. V. RYKOV¹, Ph. D. I. V. KUDRYAVTSEVA,
M. I. POLTORATSKIY, D. Sc. V. A. RYKOV¹, M. V. KLIMOVICH
¹togg1@yandex.ru
ITMO University

Introducing the apparent heat of evaporation in the structure of Clausius-Clapeyron equation is shown to allow describing the steam branch of the phase equilibrium lines from the triple point to the critical point. In the neighborhood of the triple point a transition to a state close to the ideal-gas one is provided, and in neighborhood of critical point «completed» scaling, according to which the behavior of the average diameter is determined by the exponent 2β (where β is the critical index of the coexistence curve) is enforced. The method in question is tested on the description for the steam branch of R218 refrigerant phase equilibrium lines. The description accuracy of the vapor pressure density on the line of elasticity and the apparent heat of vaporization for R218 refrigerant corresponds to the experimental one. It is shown that near the triple point the density of R218 is inflated by 0.2% compared to the density calculated on the basis of the model for an ideal gas, and the apparent heat of vaporization calculated on the basis of the proposed method differs from the values calculated by the model for an ideal gas by only 0.03%.

Keywords: saturation line, elasticity line, average diameter, critical indices, critical point, triple point, R218, thermodynamic properties.

Article info:

Received 21/11/2016, accepted 15/05/2017

DOI: 10.21047/1606-4313-2017-16-2-66-72

Article in Russian

For citation:

Rykov S. V., Kudryavtseva I. V., Poltoratskiy M. I., Rykov V. A., Klimovich M. V. A method of describing the saturation line based on the apparent heat of vaporization and Clausius-Clapeyron equation. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2017. No 2. p. 66–72.

При описании плотности насыщенного пара ρ^- используются уравнения, имеющие различную структуру [1–6]. Во-первых, это локальные уравнения, которые описывают $\rho^-(T)$ только в регулярной части термодинамической поверхности [1] или передают поведение ρ^- в окрестности критической точки в соответствии с требованиями современной теории критических явлений [2, 3].

Во-вторых, это уравнения, которые моделируют поведение $\rho^-(T)$ в диапазоне температур от тройной точки до критической точки. К этим уравнениям относится, например, уравнение Вагнера [4]:

$$\ln(\rho^-/\rho_c) = \sum_{m=1}^M N_m \tau^{n(m)}, \quad (1)$$

где ρ_c — критическая плотность; N_m — постоянные коэффициенты; $\tau = T/T_c - 1$; T — абсолютная температура; T_c — критическая температура.

Показатели степени $n(m)$ в зависимости (1) могут выбираться как в соответствии с масштабной теорией (МТ) критической точки, так и из соображений наиболее точной передачи экспериментальной информации об ρ^- . Например, в [4] при обработки опытных данных о плотности ρ^- метана получены следующие значения $n(m)$: 1/3, 1/3; 1/2; 1; 13/6; 26/6; 55/6. Как видим, приведенные показатели степени $n(m)$ не совпадают с критическими индексами или их комбинациями, рассчитанными в рамках МТ.

Однако к наиболее обоснованным в термодинамическом смысле уравнениям, описывающим плотность ρ^- , по-видимому, следует относить зависимости $\rho^-(T)$, которые разработаны на основе уравнения Клапейрона — Клаузиуса:

$$\frac{dp_s(T)}{dT} = \frac{r}{(V^- - V^+)T}, \quad (2)$$

где $p = p_s(T)$ — уравнение линии упругости; r — теплота парообразования; V^- и V^+ — удельные объемы пара и жидкости на линии насыщения, соответственно.

Действительно, из уравнения (2) непосредственно следует уравнение для плотности ρ^- :

$$\rho^- = \frac{T}{r^*} \frac{dp_s}{dT}. \quad (3)$$

Здесь r^* — «кажущаяся» теплота парообразования, которая связана с теплотой парообразования r равенством:

$$r = r^* (1 - \rho^-/\rho^+), \quad (4)$$

где $\rho^+ = 1/V^+$ — плотность насыщенной жидкости.

Использование уравнения (3) дает возможность описать зависимость $\rho^-(T)$ в диапазоне температур от тройной точки до критической точки [5, 6].

При этом важным обстоятельством является то, что значения r^* могут быть получены путем прямых измерений, например, по испарительному методу [7]. Если же вблизи тройной точки опытные данные об r^* отсутствуют, то они могут быть рассчитаны на основе уравнения линии упругости. Действительно, в указанной области поведение пара может быть описано на основе уравнения Менделеева — Клапейрона, что позволяет привести (3) к виду:

$$r^* = \frac{RT^2}{p_s(T)} \frac{dp_s}{dT}. \quad (5)$$

Для того чтобы уравнение (3) можно было использовать и для описания $\rho^-(T)$ в окрестности критической точки, необходимо выбрать функцию $r^*(T)$ таким образом, чтобы выполнялся предельный переход:

$$r^*(T \rightarrow T_c) = \frac{p_c}{\rho_c} (d_0 + d_1 |\tau|^\beta + o(|\tau|^\beta)), \quad (6)$$

где p_c — критическое давление; β — критический индекс линии насыщения; d_0 и d_1 — постоянные коэффициенты.

Необходимо также учесть, что производная $p'_s(T)$ в критической области должна удовлетворять равенству [8]:

$$\frac{T_c}{p_c} p'_s(T) = a_1 + (2 - \alpha) a_2 |\tau|^{1-\alpha} + o(|\tau|^{1-\alpha}), \quad (7)$$

где α — критический индекс изохорной теплоемкости; a_1 и a_2 — постоянные коэффициенты.

Заметим, в области малых давлений, функция $p_s(T)$ в выражениях (3) и (5) должна иметь следующую асимптотику:

$$\ln p_s(T \rightarrow 0) \sim -\frac{A}{T}, \quad (8)$$

где A — постоянный коэффициент.

Апробацию предложенной методики проведем на примере описания ρ^- хладагента R218. Выбор данного хладагента обусловлен тем, что для него в диапазоне температур от 197 до 344,5 К имеется надежная экспериментальная информация о r^* [9], полученная на образцовой установке УНТО с выводной капиллярной трубкой по испарительному методу [7].

Для описания давления на линии упругости от тройной точки до критической точки можно воспользоваться уравнением:

$$p_s = p_c e^{-\frac{a_0}{t} \tau^2} \left(1 + a_1 \tau + a_2 |\tau|^{2-\alpha} + a_3 |\tau|^{2-\alpha+\Delta} + \sum_{i=4}^7 a_i \tau^{n(i)} \right) \quad (9)$$

где a_i — постоянные коэффициенты; Δ — «неасимптотический» критический индекс; $s(i)$ — массив из натуральных чисел.

Уравнение (9), с одной стороны, обеспечивает асимптотически правильное, то есть в соответствии с зависимостью (8), поведение линии упругости в области малых давлений, а с другой — удовлетворяет равенству (7), следующему из МТ.

Выражение для «кажущейся» теплоты парообразования выберем в соответствии с рекомендациями [9]:

$$r^*(T) = \frac{p_c}{\rho_c} \left(d_0 + d_1 |\tau|^\beta + d_2 |\tau|^{\beta+\Delta} + d_3 |\tau|^{1-\alpha} + \sum_{i=4}^8 d_i \tau^{m(i)} \right) \quad (10)$$

где d_i — постоянные коэффициенты; $m(i)$ — массив из натуральных чисел.

Установим связь между коэффициентами a_i и d_i . Для этого подставим функции (9) и (10) в уравнение (3), положим в нем $T = T_c$ и придем к равенству $a_1 = d_0$.

Заметим, что выбор зависимости $r^*(T)$ в виде (10) позволяет описать поведение среднего диаметра f_d в асимптотической окрестности критической точки в соответствии с моделью «завершенного» скейлинга [10]:

$$\frac{\rho^- + \rho^+}{2\rho_c} - 1 = B\tau^{2\beta} + O(\tau^{1-\alpha}). \quad (11)$$

Действительно, подставим зависимости (9) и (10) в правую часть равенства (3), разложим полученные выражения в числителе и знаменателе по малому параметру τ и, учитывая, что $a_1 = d_0$, получим:

$$\Delta\rho^- = -\frac{d_1}{d_0} |\tau|^\beta + \left(\frac{d_1}{d_0} \right)^2 \cdot |\tau|^{2\beta} - \frac{d_2}{d_0} |\tau|^{\beta+\Delta} - \left(\frac{d_3}{d_0} + (2-\alpha) \frac{a_2}{a_1} \right) |\tau|^{1-\alpha} + O(\tau). \quad (12)$$

Таким образом, предложенное автором [9] выражение для $r^*(T)$ (10) приводит к уравнению для плотности ρ^- :

$$\Delta\rho^- = B_0 |\tau|^\beta + B_1 |\tau|^{\beta+\Delta} + B_2 |\tau|^{1-\alpha} + B_3 \tau + B_4 \tau^{2\beta}, \quad (13)$$

полученному в рамках «завершенного» скейлинга [10].

Коэффициенты уравнений (3), (9) и (10) находились путем минимизации на массиве опытных данных [11–18] следующих функционалов F :

— на линии упругости:

$$F_{p_s} = \sum_{j=1}^{N_1} \left[Q_{p_s,j} (p_{s,j} - p_{s,j}^{(e)}) \right]^2 + \sum_{j=1}^{N_2} \left[Q_{p_s,j} (p_{s,j}'' - p_{s,j}^{*(e)}) \right]^2; \quad (14)$$

— на паровой ветви линии насыщения:

$$F_{\rho^-} = \sum_{j=1}^{N_3} \left[Q_{\rho^-,j} (\rho_j^- - \rho_{j,e}^-) \right]^2 + \sum_{j=1}^{N_4} \left[Q_{r^*,j} (r_j^* - r_j^{*(e)}) \right]^2 + \sum_{j=N_4+1}^{N_5} \left[Q_{r^*,j} (r_j^* - r_j^{*(p)}) \right]^2. \quad (15)$$

Здесь $Q_{X,j}$ — «вес» j -точки соответствующего свойства X , а X_j и $X_j^{(e)}$ — расчетные и экспериментальные значения соответствующего свойства X , где $X = p_s$, $X = p_s''$, $X = p^-$ или $X = r^*$; $r_j^{*(p)}$ — значения кажущейся теплоты парообразования, рассчитанные по формуле (5).

Значения второй производной $p_{s,j}^{*(e)}$, входящие в функционал (14) определены в работе [11] на основе экспериментальной информации о теплоемкости R218 по формуле:

$$T \frac{d^2 p_s}{dT^2} = \left(\frac{C_{V2} - C_{V1}}{V_2 - V_1} \right)_T, \quad (16)$$

где C_{V1} , C_{V2} — сглаженные значения теплоемкости на первой (V_1) и второй (V_2) изохорах при температуре T ; V_1 и V_2 — удельные объемы при температуре T .

Значения критических индексов выбраны в соответствии с масштабной теорией: $\alpha = 0,118$; $\beta = 0,321$ и $\Delta = 0,5$.

В результате параметрам и коэффициентам, входящим в выражения (3), (9) и (10), присвоены следующие значения:

$$T_c = 344,99 \text{ К}; \rho_c = 631 \text{ кг/м}^3; p_c = 26,7466 \text{ бар}; \\ a_0 = 11,7; a_1 = 7,560322; a_2 = -43,76577; a_3 = -135,6463; \\ a_4 = -134,5955; a_5 = -61,36485; a_6 = 18,24359; \\ a_7 = -15,44720; n(i) = \{2; 3; 5; 7\}.$$

$$\text{Вариант I: } d_0 = 7,560322; d_1 = 9,849932683956252; \\ d_2 = 324,8376794973347; d_3 = -279,7427847091147; \\ d_4 = 89,84449192181657; d_5 = 263,4283489012458; \\ d_6 = 442,7354790870147; d_7 = -664,038511195391; \\ d_8 = 564,052472538125; m(i) = \{1; 2; 3; 5; 7\}.$$

$$\text{Вариант II: } d_0 = 7,560322; d_1 = 14,0415424908883; \\ d_2 = -1569,981150989228; d_3 = 3200,12387879538; \\ d_4 = 1865,429844195542; d_5 = 868,4271649999596; \\ d_6 = 1491,439105677792; d_7 = -3366,877287165319; \\ d_8 = 5487,893648106355; m(i) = \{1; 2; 3; 5; 7\}.$$

Заметим, что в варианте I поиск коэффициентов d_i осуществлялся на основе функционала (15), а в случае варианта II коэффициенты d_i находились путем минимизации функционала F_{ρ^-} :

$$F_{\rho^-}^* = \sum_{j=1}^{N_3} \left[Q_{\rho^-,j} (\rho_j^- - \rho_{j,e}^-) \right]^2 + \sum_{j=1}^{N_4} \left[Q_{r^*,j} (r_j^* - r_j^{*(e)}) \right]^2. \quad (17)$$

Таким образом, в первом варианте наряду с опытными значениями $r_j^{*(e)}$ [9] использовались и значения «кажущейся» теплоты парообразования $r^{*(p)}$, полученные на основе формулы (5), а в варианте II, согласно (17), значения $r^{*(p)}$ из расчетной схемы исключались.

На рис. 1–4 представлены температурные зависимости $r^*(T)$, $\rho^-(T)$ и отклонения значений p_s и ρ^- , которые рассчитаны на основе уравнений (3), (9) и (10), от соответствующих данных, приведенных в работах [11–18]. При включении в расчетную схему значений r^* (вариант I), рассчитанных на основе формулы (5), наблюдается

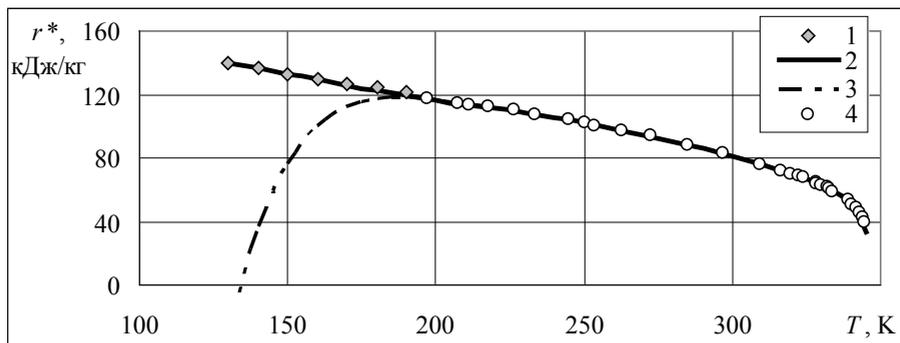


Рис. 1. Зависимость «кажущейся» теплоты парообразования от температуры: 1 — расчет r^* по уравнению (5); 2 — расчет r^* по уравнению (9) (вариант I); 3 — расчет r^* по уравнению (9) (вариант II); 4 — опытные данные r^* [9]

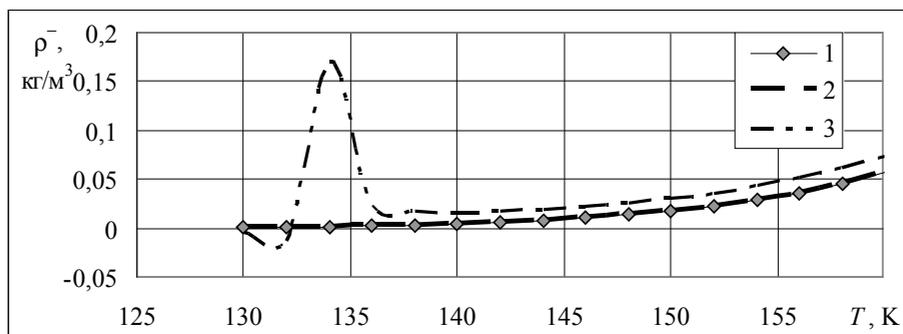


Рис. 2. Зависимость плотности насыщенного пара ρ^- от температуры в окрестности тройной точки: 1 — расчет по уравнению идеального газа; 2 — расчет по уравнению (3) (вариант I); 3 — расчет по уравнению (3) (вариант II)

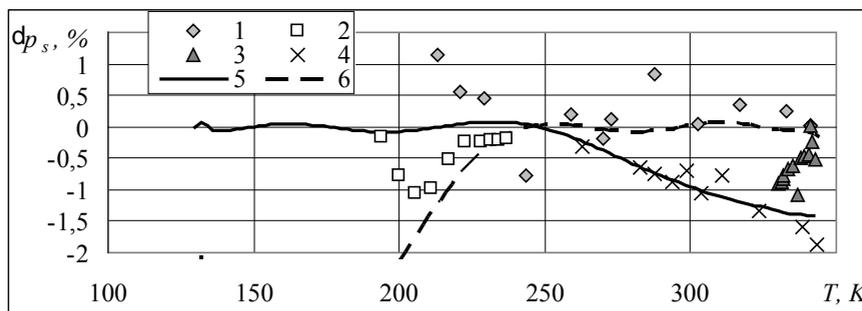


Рис. 3. Отклонения $\delta p_s = (p_s^e - p_s^r) / p_s^e \cdot 100\%$ значений давления p_s^r на линии упругости, рассчитанных по уравнению (8) данной работы, от данных p_s^e : 1 — [12]; 2 — [13]; 3 — [14]; 4 — [15]; 5 — RefProp 7; 6 — [16]

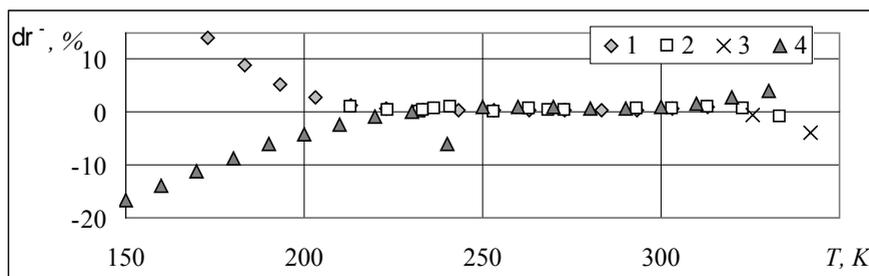


Рис. 4. Отклонения $\delta \rho^- = (\rho_e^- - \rho_r^-) / \rho_e^- \cdot 100\%$ значений ρ_r^- плотности на паровой линии фазового равновесия, рассчитанных по уравнению (9), от данных: 1 — [17]; 2 — [12]; 3 — [11]; 4 — [18]

удовлетворительное согласие между расчетной и экспериментальной информацией о значениях ρ^- в диапазоне температур от тройной точки до критической точки. Если же в расчетную схему данные о r^* , рассчитанные на основе (5), не включались (вариант II), то поведение функций $r^*(T)$ (рис. 1) и $\rho^-(T)$ (рис. 2) в окрестности тройной точки носит даже качественно неверный характер. В то же время, в диапазоне температур от 190 К до критической температуры оба варианта одинаково удовлетворительно передают экспериментальную информацию о давлении p_s и плотности ρ^- .

Заметим, что варианты I, II дают одинаковые значения «кажущейся» теплоты парообразования в критической точке — $r^* = 32,05$ кДж/кг, но разные значения параметра $x_0 = B_0^{-1/\beta}$ линии насыщения R218: $x_0 = 0,43861$ (варианты I) и $x_0 = 0,14534$ (варианты II).

Литература

1. Rowley J. R., Wilding W. V., Oscarson J. L., Rowley R. L. DIADEM, DIPPR Information and Data Evaluation Manager:4.2.0 (Brigham Young University, Provo, UT, 2010).
2. Ustyuzhanin E. E., Shishakov V. V., Abdulagatov I. M., Popov P. V., Rykov V. A., Frenkel M. L. Scaling models of thermodynamic properties on the coexistence curve: problems and some solutions. *Russian Journal of Physical Chemistry B*. 2012. Vol. 6. No 8. p. 912–931.
3. Polikhronidi N. G., Abdulagatov I. M., Batyrova R. G., Stepanov G. V., Ustuzhanin E. E., Wu J. T. Experimental study of the thermodynamic properties of diethyl ether (DEE) at saturation. *Int J Thermophys* (2011) 32: 559–595.
4. Kleinrahm R., Wagner W. Measurement and correlation of the equilibrium liquid and vapour densities and the vapour pressure along the coexistence curve of methane. *J. Chem. Thermodynamics*, 1986. Vol. 18. No. 8. P. 739–760.
5. Кудрявцева И. В., Рыков А. В., Рыков В. А. Модифицированное уравнение линии насыщения, удовлетворяющее требованиям масштабной теории // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Холодильная техника и кондиционирование. 2013. № 2. С. 3.
6. Рыков С. В., Самолетов В. А., Рыков В. А. Линия насыщения аммиака // Вестник Международной академии холода. 2008. № 4. С. 20–21.
7. Соловьев Г. В., Суханин Г. И., Столяров Н. Н., Чашкин Ю. Р. Экспериментальное определение теплоты парообразования и теплоемкости на линии насыщения фреона-23 // Холодильная техника. 1978. № 6. С. 30–33.
8. Ustyuzhanin E. E., Ochkov V. F., Shishakov V. V., Rykov A. V. Extrapolation of IAPWS-IF97 data: The saturation pressure of H₂O in the critical region. *Journal of Physics: Conference Series*. 2015. V. 653.
9. Рыков В. А. Анализ закономерностей изменения термодинамических свойств веществ в широком диапазоне параметров состояния, включая окрестность критической точки и метастабильную область // Дис. на соискание уч. ст. канд. техн. наук. — Л.: ЛТИХП, 1988. 275 с.
10. Fisher M. E., Orkoulas G. The Yang-Yang Anomaly in Fluid Criticality: Experiment and Scaling Theory. *Phys. Rev. Lett.* 2000. V. 85. No 4. P. 696.

Предложенную методику можно использовать для расчета линии насыщения при построении масштабных [19, 20] и широкодиапазонных уравнений состояния [21, 22], в структуре которых линия насыщения является опорной кривой. Особенно актуальны результаты данной работы, если в структуру уравнения состояния включена обобщенная масштабная переменная \tilde{x} [23], которая используется для построения фундаментальных уравнений состояния, учитывающих асимметрию системы жидкость — пар относительно критической изохоры [22]. Действительно, масштабная переменная \tilde{x} определяется на основе равенства $\tilde{x} = \tau / \tilde{\tau}_s$, где функция $\tilde{\tau}_s(\rho)$ выбирается из условия $\tau_s = -x_0 \tilde{\tau}_s$, и тем самым обеспечивается правильное описание линии насыщения $T_s(\rho) = T_c(\tau_s + 1)$ от тройной точки до критической точки.

References

1. Rowley J. R., Wilding W. V., Oscarson J. L., Rowley R. L. DIADEM, DIPPR Information and Data Evaluation Manager:4.2.0 (Brigham Young University, Provo, UT, 2010).
2. Ustyuzhanin E. E., Shishakov V. V., Abdulagatov I. M., Popov P. V., Rykov V. A., Frenkel M. L. Scaling models of thermodynamic properties on the coexistence curve: problems and some solutions. *Russian Journal of Physical Chemistry B*. 2012. Vol. 6. No 8. p. 912–931.
3. Polikhronidi N. G., Abdulagatov I. M., Batyrova R. G., Stepanov G. V., Ustuzhanin E. E., Wu J. T. Experimental study of the thermodynamic properties of diethyl ether (DEE) at saturation. *Int J Thermophys* (2011) 32: 559–595.
4. Kleinrahm R., Wagner W. Measurement and correlation of the equilibrium liquid and vapour densities and the vapour pressure along the coexistence curve of methane. *J. Chem. Thermodynamics*, 1986. Vol. 18. No. 8. P. 739–760.
5. Kudryavtseva I. V., Rykov A. V., Rykov V. A. The modified equation of the line of saturation meeting requirements of the scale theory. *Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya: Kholodil'naya tekhnika i konditsionirovanie*. 2013. No 2. p. 3. (in Russian)
6. Rykov S. V., Samoletov V. A., Rykov V. A. Line of saturation of ammonia. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2008. No 4. p. 20–21. (in Russian)
7. Solov'ev G. V., Sukhanin G. I., Stolyarov N. N., Chashkin Yu. R. The experimental definition of vaporization heat and thermal capacity on the line of saturation of freon-23. *Kholodil'naya tekhnika*. 1978. No 6. p. 30–33. (in Russian)
8. Ustyuzhanin E. E., Ochkov V. F., Shishakov V. V., Rykov A. V. Extrapolation of IAPWS-IF97 data: The saturation pressure of H₂O in the critical region. *Journal of Physics: Conference Series*. 2015. V. 653.
9. Rykov V. A. The analysis of regularities of change of thermodynamic properties of substances in the wide range of state variables, including the vicinity of a critical point and metastable area. Thesis of Cand.Tech. Sci. Leningrad, 1988. 275 p. (in Russian)
10. Fisher M. E., Orkoulas G. The Yang-Yang Anomaly in Fluid Criticality: Experiment and Scaling Theory. *Phys. Rev. Lett.* 2000. V. 85. No 4. P. 696.

11. Рябушева Т. И. Исследование изохорной теплоемкости холодильных агентов // Дис. на соискание уч. ст. канд. техн. наук. — Л.: ЛТИХП, 1979. 189 с.
12. Brown I. A. Physical properties of perfluoropropane. *J. Chem. Eng. Data*. 1963. Vol. 8, No 11. P. 106–108.
13. Pace E. L., Plaush A. C. Thermodynamic properties of octafluoropropane from 14 K to its normal boiling point. An estimates of the barrier to internal rotation from the entropy and heat capacity of the gas. *J. Chem. Phys.* 1967. Vol. 47. No 1. P. 38–43.
14. Mousa A. N., Kay W. B., Kreglewski A. The critical constant of binary mixtures of certain perfluoro-compounds with alkanes. *J. Chem. Thermodynamics*. 1972. No 4. P. 301–311.
15. Владимиров Б. П., Швец Ю. Ф. Давление насыщенных паров фреонов 218, 329 и азеотропной смеси R116 и R23 // Теплофизические свойства веществ и материалов. 1989. Вып. 28. С. 24–25.
16. Рыков В. А., Устюжанин Е. Е., Попов П. В., Кудрявцева И. В., Рыков С. В. Хладон R-218. Плотность, энтальпия, энтропия, изобарная и изохорная теплоемкости, скорость звука в диапазоне температур 160...470 К и давлений 0,001...70 МПа. ГСССД 211–05. Деп. в ФГУП «Стандартинформ» 08.12.2005, № 813-05кк.
17. Fang F., Ioffe J. Thermodynamic properties of perfluoropropane. *J. Chem. Eng. Data*. 1966. Vol. 11, No 3. P. 376–379.
18. Барышев В. П. Комплексное исследование теплофизических свойств фреона-218 // Дис. на соискание уч. ст. канд. техн. наук. — Л. 1981. 204 с.
19. Kudryavtseva I. V., Rykov S. V. A Nonparametric Scaling Equation of State, Developed on the Basis of the Migdal's Phenomenological Theory and Benedek's Hypothesis. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2016, Vol. 90, No. 7, pp. 1493–1495.
20. Рыков С. В., Кудрявцева И. В., Рыков В. А. Асимметричное масштабное уравнение состояния аргона в переменных плотность-температура // Холодильная техника и кондиционирование. 2008. № 2. С. 6–11.
21. Рыков В. А., Кудрявцева И. В., Рыков В. С., Сverdlov A. V. Описание равновесных свойств хладагента R32 на основе масштабной гипотезы // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Холодильная техника и кондиционирование. 2016. № 3 (23). С. 13–20.
22. Кудрявцева И. В., Рыков В. А., Рыков С. В. Асимметричное единое уравнение состояния R134a // Вестник Международной академии холода. 2008. № 2. С. 36–39.
23. Рыков В. А. Метод расчета r-T параметров спинодали // Инженерно-физический журнал. 1986. Т. 50, № 4. С. 675–676.
11. Ryabusheva T. I. Research of heat capacity at constant volume of refrigerating agents. Thesis of Cand.Tech. Sci. Leningrad, 1979. 189 p. (in Russian)
12. Brown I. A. Physical properties of perfluoropropane. *J. Chem. Eng. Data*. 1963. Vol. 8, No 11. P. 106–108.
13. Pace E. L., Plaush A. C. Thermodynamic properties of octafluoropropane from 14 K to its normal boiling point. An estimates of the barrier to internal rotation from the entropy and heat capacity of the gas. *J. Chem. Phys.* 1967. Vol. 47. No 1. P. 38–43.
14. Mousa A. N., Kay W. B., Kreglewski A. The critical constant of binary mixtures of certain perfluoro-compounds with alkanes. *J. Chem. Thermodynamics*. 1972. No 4. P. 301–311.
15. Vladimirov B. P., Shvets Yu. F. Pressure of saturated steam of freons 218, 329 and azeotrope of R116 and R23. *Teplofizicheskie svoystva veshchestv i materialov*. 1989. Vol. 28. p. 24–25. (in Russian)
16. Rykov V. A., Ustyuzhanin E. E., Popov P. V., Kudryavtseva I. V., Rykov S. V. R-218 freon. Density, an enthalpy, an entropy, isobaric and isochoric thermal capacities, sound speed in temperature range 160 ... 470 K and pressure 0,001 ... 70 MPas. GSSSD 211–05. It is deposited in Standartinform 08.12.2005, № 813-05kk. (in Russian)
17. Fang F., Ioffe J. Thermodynamic properties of perfluoropropane. *J. Chem. Eng. Data*. 1966. Vol. 11, No 3. P. 376–379.
18. Baryshev V. P. Complex research of thermal properties of freon-218. Thesis of Cand.Tech. Sci. Leningrad, 1981. 204 p. (in Russian)
19. Kudryavtseva I. V., Rykov S. V. A Nonparametric Scaling Equation of State, Developed on the Basis of the Migdal's Phenomenological Theory and Benedek's Hypothesis. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2016, Vol. 90, No. 7, pp. 1493–1495.
20. Rykov S. V., Kudryavtseva I. V., Rykov V. A. Asymmetric scale equation of state of argon in variables density temperature. *Kholodil'naya tekhnika i konditsionirovanie*. 2008. No 2. p. 6–11. (in Russian)
21. Rykov V. A., Kudryavtseva I. V., Rykov V. S., Sverdlov A. V. The description of equilibrium properties of R32 coolant on the basis of a scale hypothesis. *Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya: Kholodil'naya tekhnika i konditsionirovanie*. 2016. No 3 (23). p. 13–20. (in Russian)
22. Kudryavtseva I. V., Rykov V. A., Rykov S. V. Asymmetric uniform equation of state of R134a. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2008. No 2. p. 36–39. (in Russian)
23. Rykov V. A. Computational method of r-T of parameters of a spinodala. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 1986. V. 50, No 4. p. 675–676. (in Russian)

Сведения об авторах

Рыков Сергей Владимирович

к. т. н., доцент кафедры теоретических основ тепло- и хладотехники Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, togg1@yandex.ru

Кудрявцева Ирина Владимировна

к. т. н., доцент кафедры высшей математики Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, togg1@yandex.ru

Information about authors

Rykov Sergey Vladimirovich

Ph. D., associate professor of department of theoretical bases heating and refrigerating engineers of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, togg1@yandex.ru

Kudryavtseva Irina Vladimirovna

Ph.D., associate professor of department of the higher mathematics of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, togg1@yandex.ru

Полторацкий Максим Ильич

аспирант кафедры теоретических основ тепло- и хладотехники Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, togg1@yandex.ru

Рыков Владимир Алексеевич

д.т. н., профессор кафедры теоретических основ тепло- и хладотехники Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, togg1@yandex.ru

Климович Мария Витальевна

магистрант кафедры теоретических основ тепло- и хладотехники Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, togg1@yandex.ru

Poltoratskiy Maksim Il'ich

graduate student of department of theoretical bases heating and refrigerating engineers of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, togg1@yandex.ru

Rykov Vladimir Alekseyevich

D. Sc., professor of department of theoretical bases heating and refrigerating engineers of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, togg1@yandex.ru

Klimovich Mariya Vital'yevna

undergraduate of department of theoretical bases heating and refrigerating engineers of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, togg1@yandex.ru



Поздравляем с юбилеем Игоря Кировича Прилуцкого!

21 мая 2017 года исполнилось 80 лет доктору технических наук, профессору кафедры криогенной техники и технологий сжиженного природного газа Университета ИТМО Прилуцкому Игорю Кировичу.

Игорь Кирович в 1961 г. окончил ЛПИ им. Калинина по специальности «Компрессорные и холодильные машины и установки».

В 1966 г. защитил кандидатскую диссертацию; в 1976 г. утвержден в ученом звании доцента. С 1987 г. работает в ЛТИХП: сначала в должностях старшего научного сотрудника и доцента, а с 1991 г., после защиты докторской диссертации, в должности профессора кафедры криогенной техники.

И. К. Прилуцкий — один из ведущих специалистов нашей страны в области компрессоростроения. Он является автором пяти изобретений, использованных при серийном выпуске компрессоров и детандеров на предприятиях Минхиммаша и Минэнерго и отмеченных государственным Знаком качества; соавтор действующих ОСТов на базы, типы и основные параметры поршневых компрессоров. Его достижения в области практического освоения результатов научных исследований отмечены знаком «Отличник соцсоревнования Минхиммаша».

Игорь Кирович является высококвалифицированным преподавателем, он много сил и энергии отдает привлечению к учебному процессу студентов и занятиям научной работой. И. К. Прилуцкий является лучшим представителем творческого подхода по подготовке научно-педагогических кадров высшей квалификации. За время работы на кафедре им подготовлено 10 кандидатов наук и 2 доктора технических наук, которые успешно защитили свои научные работы.

И. К. Прилуцкий является автором более 260 научных работ, соавтором учебных пособий «Поршневые компрессоры» и «Расчет и проектирование поршневых компрессоров и детандеров на нормализованных базах».

И. К. Прилуцкий награжден знаком «За отличные успехи в работе в области высшего образования СССР» и нагрудным знаком «Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации».

Глубокие знания, высокая работоспособность, доброжелательность снискали И. К. Прилуцкому заслуженный авторитет и уважение среди преподавателей, сотрудников и студентов университета ИТМО.

Игорь Кирович воспитал двоих детей, имеет четырех внуков и пять правнуков.

*Президиум Международной академии холода и редакция журнала «Вестник МАХ»
сердечно поздравляют Вас, Игорь Кирович, с юбилеем!*

*Желаем крепкого здоровья, оптимизма, дальнейших творческих успехов
и профессиональных достижений, благополучия в семье!*