

УДК 536.71

Анализ различных моделей среднего диаметра линии фазового равновесия R236ea

Канд. техн. наук С. В. РЫКОВ¹, канд. техн. наук И. В. КУДРЯВЦЕВА,
д-р техн. наук В. А. РЫКОВ, А. В. СВЕРДЛОВ, М. НУРЫШЕВА

¹togg1@yandex.ru

Университет ИТМО

Выполнен анализ различных вариантов линии фазового равновесия холодильного агента R236ea, разработанных в рамках модели среднего диаметра Вегнера ($[1-\alpha]$ -модели) и $[2\beta]$ -модели. Особенность предложенного подхода заключается в том, что плотность насыщенного пара ρ^- и во всех трех моделях среднего диаметра f_d описывается одним и тем же уравнением Клапейрона–Клаузиуса, в которое вместо теплоты парообразования r введена «кажущаяся» теплота парообразования r^ : $r^*=r/[1-\rho^-/\rho^+]$, в то время как плотность насыщенной жидкости ρ^+ описывается в этих моделях разными уравнениями, но имеющими один и тот же набор слагаемых с одинаковыми показателями степени. Таким образом, предложенная система уравнений для линии фазового равновесия имеет физически обоснованную структуру и позволяет в модели среднего диаметра f_d учесть все компоненты, включая линейный компонент $\tau=1-T/T_c$. Перечисленные модели среднего диаметра апробированы при расчете линии фазового равновесия R236ea в диапазоне температур от T_{tr} (тройная точка) до T_c (критическая точка).*

Ключевые слова: линия упругости, «кажущаяся» теплота парообразования, хладон R236ea, диаметр порядка, средний диаметр, линия фазового равновесия, критические индексы.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 12.05.2019, принята к печати 20.08.2019

DOI: 10.17586/1606-4313-2019-18-3-87-93

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Рыков С. В., Кудрявцева И. В., Рыков В. А., Свердлов А. В., Нурешева М. Анализ различных моделей среднего диаметра линии фазового равновесия R236ea. // Вестник Международной академии холода. 2019. № 3. С. 87–93.

Analysis of various models of the average diameter of phase equilibrium line R236ea

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

¹togg1@yandex.ru

ITMO University

The analysis of various variants of the phase equilibrium line of the refrigerant R236ea, developed in the framework of the model of the average diameter of the Wegner or $[1-\alpha]$ -model, $[2\beta]$ -model, is performed. The peculiarity of the proposed approach is that the density of saturated steam ρ^- and in all three models of average diameter f_d is described by the same Clapeyron–Clausius equation, in which instead of the heat of vaporization the “apparent” heat of vaporization r^ is introduced: $r^*=r/[1-\rho^-/\rho^+]$ while the density of the saturated liquid ρ^+ is described in these models with different equations, but having the same set of terms with the same exponents. Thus, the proposed system of equations for the phase equilibrium line has a physically justified structure and makes it possible to take into account all components in the average diameter f_d model, including the linear component $\tau=1-T/T_c$. The listed models of average diameter were tested when calculating the phase equilibrium line R236ea in the temperature range from T_{tr} (triple point) to T_c (critical point).*

Keywords: line of elasticity, “apparent” heat of vaporization, R236ea, diameter of the order, average diameter, line of phase equilibrium, critical indices.

Article info:

Received 12/05/2019, accepted 20/08/2019

DOI: 10.17586/1606-4313-2019-18-3-87-93

Article in Russian

For citation:

Rykov S. V., Kudryavtseva I. V., Rykov V. A., Sverdlov A. V., Nurysheva M. Analysis of various models of the average diameter of phase equilibrium line R236ea. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2019. No 3. p. 87–93.

Введение

Информация о равновесных свойствах холодильных агентов и других технически важных веществ на линии фазового равновесия, используемых в энергетике, имеет важное практическое значение. Получение этой информации во всем диапазоне линии насыщения, от температуры T_{tr} тройной точки до температуры в критической точке T_c является сложной и дорогостоящей задачей. Поэтому для расчета параметров линии насыщения, линии упругости и теплоты парообразования используются расчетные методы [1–5], которые не требуют наличия информации о плотности ρ^- и давлении p_s насыщенного пара, плотности ρ^+ насыщенной жидкости и теплоте парообразования r во всем диапазоне температур от T_{tr} до T_c .

Чтобы неопределенность расчетных методов была минимальной, необходимо использовать такие уравнения для описания ρ^- , ρ^+ , p_s и r , которые качественно верно, то есть в соответствии с требованиями современной физики, описывают поведение линии фазового равновесия от тройной точки до критической точки. В частности, к таким требованиям относится качественное и количественно верное описание, в рамках используемой модели линии насыщения, поведения среднего диаметра f_d :

$$f_d = \frac{\rho^+ + \rho^-}{2\rho_c} - 1, \quad (1)$$

где ρ^+ — плотность насыщенной жидкости; ρ^- — плотность насыщенного пара; ρ_c — критическая плотность.

При описании линии фазового равновесия до 2000 г. использовались фактически две модели среднего диаметра. Во-первых, это линейная модель [9, 10], в рамках которой функция f_d описывается зависимостью:

$$f_d(T \rightarrow T_c) = A\tau + o(\tau), \quad (2)$$

где $\tau = 1 - T/T_c$; T — абсолютная температура; o — символ Ландау.

Теория критических явлений, бурный расцвет которой пришелся на вторую половину прошлого века, на основе ренорм-группового анализа и ϵ -разложения [11] предсказала другую модель поведения криволинейного диаметра [12, 13]:

$$f_d(T \rightarrow T_c) = A\tau^{1-\alpha} + o(\tau^{1-\alpha}), \quad (3)$$

где α — критический индекс изохорной теплоемкости, $\alpha = 0,1$ [11].

Модель среднего диаметра (3) была предложена Вегнером и в дальнейшем мы будем обозначать ее как $[1-\alpha]$ -модель.

Модель среднего диаметра [2 β]

Модель $[1-\alpha]$ до 2000 г. была признана единственной теоретически обоснованной моделью среднего диаметра линии насыщения и, вследствие этого, получила широкое распространение. Видимо поэтому в то время не привлекла внимание исследователей работа [14], выполненная в ЛТИХП (г. Ленинград, 1988 г.), в которой было предложено описывать плотность паровой ветви линии насыщения на основе уравнения:

$$\rho^-(T) = \frac{T}{r^*} \cdot \frac{dp_s}{dT}, \quad (4)$$

где p_s — давление насыщенного пара; r^* — «кажущаяся» теплота парообразования, которая связана с теплотой парообразования r зависимостью:

$$r = r^* \left(1 - \frac{\rho^-}{\rho^+} \right) \quad (5)$$

Привлекательность описания плотности $\rho^-(T)$, на основе формулы (4), обусловлена тем, что и теплота r^* , и давление p_s измеряются экспериментальным путем [14]. При этом следует учитывать, что характер поведения функции $p_s(T)$ теоретически и экспериментально обоснован и в окрестности критической точки [10]:

$$p_s(\tau) = p_c \left[1 + a_1\tau + a_2\tau^{2-\alpha} + o(\tau^{2-\alpha}) \right] \quad (6)$$

и в непосредственной близости от тройной точки [15]:

$$p_s(T) = p_c \exp\left(-\frac{a_0}{T}\right), \quad (7)$$

где $a_0 > 0$ — индивидуальный параметр; p_s — критическое давление.

В работе [14] предложена зависимость $p_s(T)$, которая удовлетворяет требованиям (6) и (7):

$$p_s(T) = p_c e^{-a_0\tau^2/t} \left(1 + a_1\tau + a_2|\tau|^{2-\alpha} + a_3|\tau|^{2-\alpha+\Delta} + \sum_{i=4}^M a_i\tau^{n(i)} \right), \quad (8)$$

где a_i — постоянные коэффициенты, $i \in \{1, 2, 3, \dots, M\}$; $n(i) \in \mathbb{N}$; $t = T/T_c$; Δ — первый неасимптотический критический индекс: $\Delta \approx 0,5$.

Выражение для r^* в [14] выбрано таким образом, чтобы удовлетворить требованиям масштабной теории и позволить количественно с малой неопределенностью описать опытные данные о «кажущейся» теплоте парообразования R218:

$$r^*(T) = \frac{p_c}{\rho_c} \left(d_0 + d_1\tau^\beta + d_3\tau^{\beta+\Delta} + d_4\tau^{1-\alpha} + \sum_{i=4}^L d_i\tau^{y(i)} \right), \quad (9)$$

где d_i — постоянные коэффициенты; $y(i) \in \mathbb{N}$.

Заметим, что выражение (9) использовалось в работах [16–18] при описании свойств различных холодильных агентов.

Система уравнений (4), (8) и (9) позволяет передать плотность ρ^- на паровой ветви линии насыщения с малой неопределенностью, не превышающей неопределенности опытных данных [19] (см. [20]), и в соответствии с моделью среднего диаметра [2 β]:

$$f_d(T \rightarrow T_c) = A\tau^{2\beta} + B\tau^{1-\alpha} + o(\tau^{1-\alpha}) \quad (10)$$

описать поведение ρ^- :

$$\rho^-|_{T \rightarrow T_c} = \rho_c \left(d_0 + D_1\tau^\beta + D_2\tau^{2\beta} + D_3\tau^{\beta+\Delta} + D_4\tau^{1-\alpha} + \dots \right). \quad (11)$$

Начиная с 2000 г., благодаря теоретическим работам [21, 22], модели (10) и (11) получили признание и начали исследоваться многими авторами [2–4, 23–25].

В работе [26] показано, что точность описания ρ^- , на основе уравнения (4), можно повысить, если в функцию (9) ввести дополнительное слагаемое, пропорциональное $\tau^{2\beta}$:

$$r^*(T) = \frac{p_c}{\rho_c} \left(d_0 + d_1 |\tau|^\beta + d_2 |\tau|^{2\beta} + d_3 |\tau|^{\beta+\Delta} + d_4 |\tau|^{1-\alpha} + \sum_{i=5}^L d_5 \tau^{s(i)} \right), \quad (12)$$

где $s(i) = 1 + (5-i)\beta$.

Заметим, что введение дополнительного слагаемого в (12) не приводит к изменению структуры выражения (11) вблизи критической точки.

Теперь для описания линии фазового равновесия в соответствии с моделью (10) необходимо использовать уравнение для жидкостной ветви линии насыщения, имеющего ту же структуру при $T \rightarrow T_c$, что и уравнение (11). Поэтому мы выбрали выражение для функции $\rho^+(T)$ в виде:

$$\rho^+(T) = \rho_c \left(1 - D_1 \tau^\beta - D_2 \tau^{\beta+\Delta} + D_3^* \tau^{2\beta} + D_4^* \tau^{1-\alpha} + D_5 \tau^{3\beta} + \sum_{i=6}^{10} D_i \tau^{1+(i-6)\alpha} \right). \quad (13)$$

Наш анализ выражений (4), (8) и (11) показал, что коэффициенты этих уравнений связаны между собой следующими равенствами:

$$d_0 = a_1; \quad D_1 = \frac{d_1}{d_0}, \quad D_2 = \frac{d_3}{d_0}, \quad D_3 = + \left(\frac{d_1^2}{d_0^2} - \frac{d_2}{d_0} \right),$$

$$D_4 = + \left(\frac{d_1^3}{d_0^3} - 2 \frac{d_1 d_2}{d_0^2} \right). \quad (14)$$

Таким образом, выбирая в (13) коэффициенты D_3^* и D_4^* в соответствии с (14):

$$D_3^* = D_3 = \frac{d_1^2}{d_0^2} - \frac{d_2}{d_0} \quad \text{и} \quad D_4^* = D_4 = \frac{d_1^3}{d_0^3} - 2 \frac{d_1 d_2}{d_0^2}, \quad (15)$$

получим модель среднего диаметра (10).

Если в (13) коэффициенты D_3^* и D_4^* удовлетворяют равенствам:

$$D_3^* = -D_3 = - \left(\frac{d_1^2}{d_0^2} - \frac{d_2}{d_0} \right) \quad \text{и} \quad D_4^* = D_4 = \frac{d_1^3}{d_0^3} - 2 \frac{d_1 d_2}{d_0^2}, \quad (16)$$

то получим для среднего диаметра f_d модель $[1-\alpha]$ (3).

Линия фазового равновесия R236ea

На основе уравнений (4), (7), (12) и (13) мы описали для R236ea данные о давлении p_i [27–32], плотности ρ^+ и ρ^- [27–29, 34–35] для двух вариантов f_d :

- вариант I: выполняются равенства (15), модель [2 β];
- вариант II: выполняются равенства (16), модель $[1-\alpha]$.

Коэффициенты уравнений (4), (7) и (12) устанавливались на основе данных работ [27, 29, 32, 34, 35], путем поиска минимума функционалов:

$$\Phi_{p_s} = \sum_{n=1}^{100} \left[Q_{p_s, n} \left(p_{s, n}^{ex} - p_{s, n}^{ras} \right) \right]^2, \quad (17)$$

$$\Phi_{\rho^-} = \sum_{n=1}^{100} \left[Q_{\rho^-, n} \left(\rho_n^{-, ex} - \rho_n^{-, ras} \right) \right]^2, \quad (18)$$

где $Q_{p_s, n}$ и $Q_{\rho^-, n}$ — вес соответствующей n -ой опытной

точки $p_{s, n}^{ex}$ или $\rho_n^{-, ex}$; $p_{s, n}^{ras}$ и $\rho_n^{-, ras}$ — значения давления и плотности, рассчитанные соответственно по уравнениям (7) и (4), (12).

При этом критические индексы выбраны в соответствии с масштабной теорией [11]: $\alpha=0,11$, $\beta=0,325$ и $\Delta=0,51$. В ходе поиска коэффициентов уравнения (7) на основе минимизации функционалов (17) и (18), мы установили значения критических параметров R236ea: $p_s=3,41695$ МПа, $\rho_s=563$ кг/м³, $T_c=412,3801$ К.

В результате получены значения коэффициентов и параметров уравнений (7) и (4), (12), которые приведены в табл. 1 и 2.

Результаты сравнительного анализа опытных данных [27, 29, 32, 34, 35] и расчетных значений $p_{s, n}^{ras}$ и $\rho_n^{-, ras}$ представлены на рис. 1, 2.

Таблица 1

Коэффициенты и параметры (7)

Table 1

Coefficients and parameters (7)

i	a_i	$n(i)$	i	a_i	$n(i)$
0	13,8	—	5	41,56405515467	3
1	8,691970045447	—	6	-33,60392555014	5
2	207,8636296092	—	7	35,90836752245	7
3	92,62472654246	—	8	-36,44499800073	9
4	-262,2190347318	2	—	—	—

Таблица 2

Коэффициенты и параметры (12)

Table 2

Coefficients and parameters (12)

i	d_i	i	d_i
0	8,691970045447	3	-42,8041137641
1	15,0479824374	4	29,2631979938
2	17,6143631770	5	17,8226277957

Коэффициенты уравнения (13) устанавливались на основе данных [27, 28, 34], путем поиска минимума следующего функционала:

$$\Phi_{\rho^+} = \sum_{n=1}^{100} \left[Q_{\rho^+, n} \left(\rho_n^{+, ex} - \rho_n^{+, ras} \right) \right]^2, \quad (19)$$

где $Q_{\rho^+, n}$ — вес соответствующей n -й опытной точки $\rho_n^{+, ex}$; $\rho_n^{+, ras}$ — значения плотности, рассчитанные по уравнению (13).

В результате мы получили следующие значения коэффициентов и параметров уравнения (13), которые приведены в табл. 3 (вариант [2 β] (15)) и табл. 4 (вариант $[1-\alpha]$ (16)). На рис. 3 мы ограничились представлением информации о точности описания $\rho_n^{+, ex}$ [27, 28, 33, 34] в рамках модели [2 β], так как модель $[1-\alpha]$ опи-

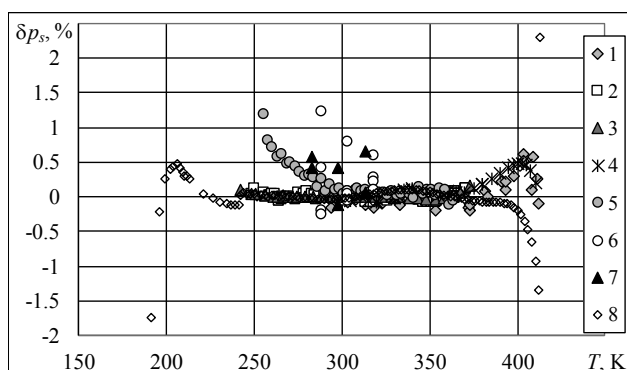


Рис. 1. Отклонения $\delta p_s = (p_s^{ex} - p_s^{ras}) / p_s^{ex} \cdot 100\%$ давления p_s^{ras} на линии упругости, рассчитанные по уравнению (8), от известных значений p_s^{ex} [27–33]: 1 — [27]; 2 — [28]; 3 — [28]; 4 — [29]; 5 — [30]; 6 — [31]; 7 — [32]; 8 — [33]; 9 — [28]

Fig. 1. Pressure $\delta p_s = (p_s^{ex} - p_s^{ras}) / p_s^{ex} \cdot 100\%$ deviations p_s^{ras} on the elasticity line calculated by equation (8) from p_s^{ex} known values [27–33]: 1 — [27]; 2 — [28]; 3 — [28]; 4 — [29]; 5 — [30]; 6 — [31]; 7 — [32]; 8 — [33]; 9 — [28]

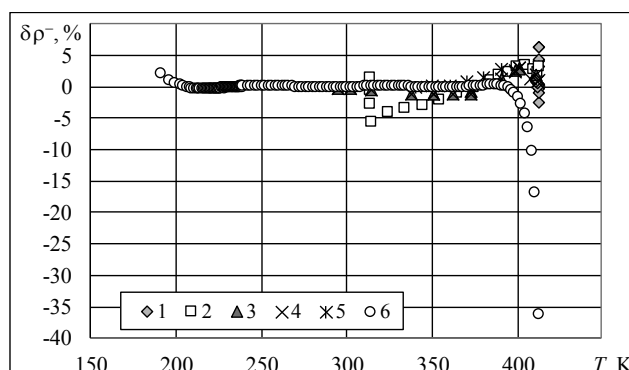


Рис. 2. Отклонения $\delta \rho^- = (\rho^{-,ex} - \rho^{-,ras}) / \rho^{-,ex} \cdot 100\%$ плотности $\rho^{-,ras}$ на линии насыщения, рассчитанные по уравнению (13), от известных значений $\rho^{-,ex}$ [27, 29, 33–35]: 1 — [34]; 2 — [27]; 3 — [27]; 4 — [35]; 5 — [29]; 6 — [33]

Fig. 2. Density $\delta \rho^- = (\rho^{-,ex} - \rho^{-,ras}) / \rho^{-,ex} \cdot 100\%$ deviations $\rho^{-,ras}$ on the saturation line calculated by equation (13) from $\rho^{-,ex}$ known values [27, 29, 33–35]: 1 — [34]; 2 — [27]; 3 — [27]; 4 — [35]; 5 — [29]; 6 — [33]

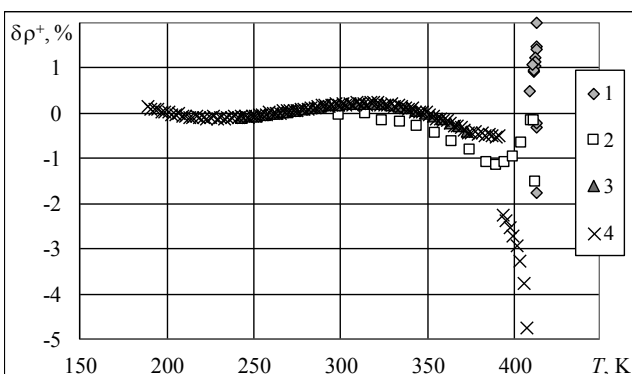


Рис. 3. Относительные отклонения $\delta \rho^+ = (\rho^{+,ex} - \rho^{+,ras}) / \rho^{+,ex} \cdot 100\%$ плотности $\rho^{+,ras}$ на линии насыщения, рассчитанные по уравнению (13), от известных значений $\rho^{+,ex}$ [27, 28, 33, 34]: 1 — [34]; 2 — [27]; 3 — [28]; 4 — [33]

Fig. 3. Relative $\delta \rho^+ = (\rho^{+,ex} - \rho^{+,ras}) / \rho^{+,ex} \cdot 100\%$ density $\rho^{+,ras}$ deviations on the saturation line calculated by equation (13) from $\rho^{+,ex}$ known values [27, 28, 33, 34]: 1 — [34]; 2 — [27]; 3 — [28]; 4 — [33]

сывает эти данные с несколько меньшей точностью (но в пределах их экспериментальной неопределенности).

Выводы

Предлагаемая модель линии фазового равновесия позволяет: во-первых, описать опытные данные о плотности ρ^- , ρ^+ и давлении p_s R236еа в пределах их экспериментальной неопределенности (рис. 1–3), во-вторых, обеспечить согласованность значений $\rho^{-,ras}$, $\rho^{+,ras}$ и p_s^{ras} ,

рассчитанных по предлагаемой методике (уравнения (4), (7), (12), (13)) в диапазоне от тройной точки до критической точки, в-третьих, провести анализ различных моделей среднего диаметра и выбрать оптимальный для исследуемого вещества.

Для линии фазового равновесия холодильного агента R236еа мы рекомендуем использовать модель среднего диаметра [2β], как обеспечивающую описание плотности на линии насыщения с большей точностью, чем модель среднего диаметра [1–α].

Таблица 3

Коэффициенты и параметры (13). Вариант I, модель [2β]

Table 3

Coefficients and parameters (13). Option I, model [2β]

<i>i</i>	<i>D_i</i>	<i>i</i>	<i>D_i</i>
1	1,731251069517248	6	-0,1248741255639
2	-4,924558361371886	7	869,949176054
3	0,970720385332132	8	-2136,78780101
4	-1,827836692473682	9	1948,40761253
5	-48,56499225699752	10	-626,240064601

Таблица 4

Коэффициенты и параметры (13). Вариант II, модель [1–α]

Table 4

Coefficients and parameters (13). Option II, model [1–α]

<i>i</i>	<i>D_i</i>	<i>i</i>	<i>D_i</i>
1	1,731251069517248	6	-0,1248741255639
2	-4,924558361371886	7	1048,08344232
3	-0,970720385332132	8	-2661,46796047
4	-1,827836692473682	9	2481,26263996
5	-48,56499225699752	10	-810,761915946

Литература

References

- Vorobev V. S., Ochkov V. F., Rykov V. A., Rykov S. V., Ustyuzhanin E. E., Pokholchenko V. A. Development of combined scaling models for liquid and gas densities at the saturation line: Structures and numerical data for SF₆ // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019. V. 1147. P. 012017.
- 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.
- Apfelbaum E. M., Vorob'ev V. S. The Similarity Relations Set on the Basis of Symmetrization of the Liquid-Vapor Phase Diagram // *J. Phys. Chem. B.* 2015. V. 119. No 26. P. 8419–8424.
- Apfelbaum E. M., Vorob'ev V. S. The Wide-Range Method to Construct the Entire Coexistence Liquid — Gas Curve and to Determine the Critical Parameters of Metals // *J. Phys. Chem. B.* 2015. V. 119. No 35. P. 11825–11832.
- Шушаков В. В. Комбинированные скейлинговые модели для инженерных расчетов термодинамических свойств на линии насыщения // Дис. на соискание уч. ст. канд. техн. наук. М.: МЭИ, 2014. 230 с.
- Рыков С. В., Кудрявцева И. В., Рыков В. А. Методика расчета линии фазового равновесия хладагентов от тройной до критической точки // *Холодильная техника.* 2017. № 3. С. 26–30.
- 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 // *Russ. J. Phys. Chem. B.* 2012. V. 6. No 8. P. 912–931.
- Ochkov V. F., Rykov V. A., Rykov S. V., Ustyuzhanin E. E., Znamensky B. E. Extrapolation of IAPWS-IF97 data: The liquid and gas densities on the saturation line near the critical point of H₂O // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2018. V. 946. P. 012119.
- Cailletet L., Mathias E. Recherches sur les densités des gaz liquéfiés et de leurs vapeurs saturées // *J. Phys. Theor. Appl.* 1886. V. 5 (1). P. 549–564.
- Goldstein R., Arola A. Liquid-vapor asymmetry at the critical point // *Acc. Chem. Res.* 1989. V. 22. P. 77–82.
- Ма Ш. Современная теория критических явлений. М.: Мир. 1980. 298 с.
- Widom B., Rowlinson J. S. New Model for the Study of Liquid — Vapor Phase Transitions // *J. Chem. Phys.* 1970. V. 52. P. 1670.
- Hemmer P. C., Stell G. Fluids with Several Phase Transitions // *Phys. Rev. Lett.* 1970. V. 24. P. 1284.
- 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.
- Алтунин В. В. Теплофизические свойства двуокиси углерода. М.: Изд-во стандартов, 1975. 546 с.
- Kozlov A. D., Lysenkov V. F., Popov P. V., Rykov V. A. Единое неаналитическое уравнение состояния хладона 218 // *ИФЖ.* 1992. Т. 62. № 6. С. 840–847.
- Рыков С. В. Метод построения асимметричного масштабного уравнения состояния в физических переменных // Дис. на соискание уч. ст. канд. техн. наук. СПб.: СПбГУ-НиПТ. 2009. 198 с.
- Полторацкий М. И. Метод построения фундаментального уравнения состояния и термодинамические таблицы гек-
- Vorobev V. S., Ochkov V. F., Rykov V. A., Rykov S. V., Ustyuzhanin E. E., Pokholchenko V. A. Development of combined scaling models for liquid and gas densities at the saturation line: Structures and numerical data for SF₆. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019. V. 1147. P. 012017.
- 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.
- Apfelbaum E. M., Vorob'ev V. S. The Similarity Relations Set on the Basis of Symmetrization of the Liquid-Vapor Phase Diagram. *J. Phys. Chem. B.* 2015. V. 119. No 26. P. 8419–8424.
- Apfelbaum E. M., Vorob'ev V. S. The Wide-Range Method to Construct the Entire Coexistence Liquid — Gas Curve and to Determine the Critical Parameters of Metals. *J. Phys. Chem. B.* 2015. V. 119. No 35. P. 11825–11832.
- Shishakov V. V. Combined scaling models for engineering calculations of thermodynamic properties on the saturation curve. Moscow. 2014. 230 pp. (in Russian)
- Rykov S. V., Kudryavtseva I. V., Rykov V. A. Method of calculating the phase equilibrium line of refrigerants from the triple to the critical point. *Kholodilnaya Tekhnika.* 2017. No 3. P. 26–30. (in Russian)
- 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. *Russ. J. Phys. Chem. B.* 2012. V. 6. No 8. P. 912–931.
- Ochkov V. F., Rykov V. A., Rykov S. V., Ustyuzhanin E. E., Znamensky B. E. Extrapolation of IAPWS-IF97 data: The liquid and gas densities on the saturation line near the critical point of H₂O. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2018. V. 946. P. 012119.
- Cailletet L., Mathias E. Recherches sur les densités des gaz liquéfiés et de leurs vapeurs saturées. *J. Phys. Theor. Appl.* 1886. V. 5 (1). P. 549–564.
- Goldstein R., Arola A. Liquid-vapor asymmetry at the critical point. *Acc. Chem. Res.* 1989. V. 22. P. 77–82.
- Ma Sh. Modern Theory of Critical Phenomena. New York, NY: Roudedge. 1976.
- Widom B., Rowlinson J. S. New Model for the Study of Liquid — Vapor Phase Transitions. *J. Chem. Phys.* 1970. V. 52. P. 1670.
- Hemmer P. C., Stell G. Fluids with Several Phase Transitions. *Phys. Rev. Lett.* 1970. V. 24. P. 1284.
- Rykov V. A. Analysis of regularities of change of substance thermodynamic properties in a wide range of state parameters including the critical point neighborhood and metastable region. Leningrad. 1988. 275 pp. (in Russian)
- Altunin V. V. Teplofizicheskiye svoystva dvoukisi ugleroda (Thermophysical properties of carbon dioxide). Moscow: Standards Publishing. 1975. 546 pp. (in Russian)
- Kozlov A. D., Lysenkov V. F., Popov P. V., Rykov V. A. Unified non-analytical equation of state of freon 218. *J. Eng. Phys. Thermophys.* 1992. V. 62. P. 611–617. (in Russian)
- Rykov S. V. A method for constructing an asymmetric scale equation of state in physical variables. 2009. C. Sc. thesis (Saint-Petersburg: St. Petersburg State University of Refrigeration and Food Engineering). 198 pp. (in Russian)
- Poltoratskiy M. I. The method of constructing the fundamental equation of state and the thermodynamic tables of hexafluoro-

- сафторпропана (R236ea) // Дис. на соискание уч. ст. канд. техн. наук. СПб.: Университет ИТМО, 2018. –165 с.
19. Duschek W., Kleinrahm R., Wagner W. Measurement and correlation of the (pressure, density, temperature) relation of carbon dioxide. II. Saturated-liquid and saturated-vapor densities and vapor pressure along the entire coexistence curve // *J. Chem. Thermodyn.* 1990. V. 22. P. 841–864.
 20. Кудрявцева И. В., Камоцкий В. И., Рыков С. В., Рыков В. А. Расчет линии фазового равновесия диоксида углерода // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия. Процессы и аппараты пищевых производств. 2013. № 4. С. 11.
 21. Fisher M. E., Orkoulas G. The Yang-Yang anomaly in fluid criticality: experiment and scaling theory // *Phys. Rev. Lett.* 2000. V. 85. No 4–24. P. 696–699.
 22. Anisimov M. A. Universality versus nonuniversality in asymmetric fluid criticality // *Condens. Matter Phys.* 2013. V. 16. No 2. P. 23603: 1–10.
 23. Станкус С. В., Хайрулин Р. А., Мартынец В. Г., Молодов Ю. И. Плотность перфторгексана в окрестности критической точки испарения // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2013. Т. 8. № 1. С. 73–77.
 24. 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. V. 32. P. 559–595.
 25. Ustjuzhanin E. E., Ochkov V. F., Znamensky V. E., Shishakov V. V., Znamensky V. E., Rykov S. V. Investigation of gas and liquid densities on the saturation line: some scaling models and numerical data on H₂O example // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2017. V. 891. P. 012346.
 26. Рыков С. В., Кудрявцева И. В., Рыков В. А. Анализ линии фазового равновесия, разработанной на основе уравнения Клапейрона-Клаузиуса и различных моделей среднего диаметра // Вестник Международной академии холода. 2018. № 4. С. 28–34.
 27. Gruzdev V. A., Khairulin R. A., Komarov S. G., Stankus S. V. Thermodynamic Properties of HFC-236ea // *Int. J. Thermophys.* 2008. V. 29. P. 546–556.
 28. Defibaugh D. R., Gillis K. A., Moldover M. R., Schmidt J. W., Weber L. A. Thermodynamic properties of CF₃-CF-CHF₂, 1,1,1,2,3,3-hexafluoropropane // *Fluid Phase Equilib.* 1996. V. 122. No 1–2. P. 131–155.
 29. Zhang H., Sato H., Watanabe K. Vapor Pressure of 1,1,1,2,3,3-hexafluoropropane (R-236ea) from 300 to 410 K // *J. Chem. Eng. Data.* 1995. V. 20. P. 1281–1284.
 30. Di Nicola G., Giuliani G. Vapor Pressure and PVT Measurements for 1,1,1,2,3,3-hexafluoropropane (R-236ea) // *J. Chem. Eng. Data.* 2000. V. 45. P. 1075–1079.
 31. Bobbo S., Fedele L., Scattolini M., Camporese R. Vapor+Liquid Equilibrium Measurements and Correlation of the Binary Refrigerant Mixtures Difluoromethane (HFC-32) +1,1,1,2,3,3-Hexafluoropropane (HFC-236ea) and Pentafluoroethane (HFC-125) +1,1,1,2,3,3-Hexafluoropropane (HFC-236ea) at 288.6, 303.2, and 318.2 // *Int. J. Thermophys.* 2000. V. 21. P. 781–790.
 32. Bobbo S., Fedele L., Camporese R., Stryjek R. Vapor-liquid equilibrium for the three binary systems 1,1,1,2,3,3-hexafluoropropane with dimethyl ether or propane, and 1,1,1,3,3,3-hexafluoropropane with dimethyl ether // *Fluid Phase Equilib.* 2000. V. 174. P. 3–12.
 33. Lemmon E. W., Huber M. L., McLinden M. O. Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties (REFPROP), version 9.0 // National Institute of Standards and Technology, 2010.
 - propane (R236ea). 2018. C. Sc. thesis (Saint-Petersburg: ITMO University). 165 pp. (in Russian)
 19. Duschek W., Kleinrahm R., Wagner W. Measurement and correlation of the (pressure, density, temperature) relation of carbon dioxide. II. Saturated-liquid and saturated-vapor densities and vapor pressure along the entire coexistence curve. *J. Chem. Thermodyn.* 1990. V. 22. P. 841–864.
 20. Kudryavtseva I. V., Kamotskii V. I., Rykov S. V., Rykov V. A. Calculation carbon dioxide line of phase equilibrium. *Scientific Journal NRU ITMO. Processes and Food Production Equipment.* 2013. No 4. P. 11. (in Russian)
 21. Fisher M. E., Orkoulas G. The Yang-Yang anomaly in fluid criticality: experiment and scaling theory // *Phys. Rev. Lett.* 2000. V. 85. No 4–24. P. 696–699.
 22. Anisimov M. A. Universality versus nonuniversality in asymmetric fluid criticality. *Condens. Matter Phys.* 2013. V. 16. No 2. P. 23603: 1–10.
 23. Stankus S. V., Khairulin R. A., Martynets V. G., Molodov Yu. I. Density of Perfluorohexane near the Evaporation Critical Point. *Vestnik NSU. Series: Physics.* 2013. V. 8. No 1. P. 73–77. (in Russian)
 24. 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. V. 32. P. 559–595.
 25. Ustjuzhanin E. E., Ochkov V. F., Znamensky V. E., Shishakov V. V., Znamensky V. E., Rykov S. V. Investigation of gas and liquid densities on the saturation line: some scaling models and numerical data on H₂O example. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2017. V. 891. P. 012346.
 26. Rykov S. V., Kudryavtseva I. V., Rykov V. A. Analysis of the phase equilibrium line developed on the basis of the Clapeyron-Clausius equation and various models of average diameter. *Journal of International Academy of Refrigeration.* 2018. No 4. P. 28–34. (in Russian)
 27. Gruzdev V. A., Khairulin R. A., Komarov S. G., Stankus S. V. Thermodynamic Properties of HFC-236ea. *Int. J. Thermophys.* 2008. V. 29. P. 546–556.
 28. Defibaugh D. R., Gillis K. A., Moldover M. R., Schmidt J. W., Weber L. A. Thermodynamic properties of CF₃-CF-CHF₂, 1,1,1,2,3,3-hexafluoropropane. *Fluid Phase Equilib.* 1996. V. 122. No 1–2. P. 131–155.
 29. Zhang H., Sato H., Watanabe K. Vapor Pressure of 1,1,1,2,3,3-hexafluoropropane (R-236ea) from 300 to 410 K. *J. Chem. Eng. Data.* 1995. V. 20. P. 1281–1284.
 30. Di Nicola G., Giuliani G. Vapor Pressure and PVT Measurements for 1,1,1,2,3,3-hexafluoropropane (R-236ea). *J. Chem. Eng. Data.* 2000. V. 45. P. 1075–1079.
 31. Bobbo S., Fedele L., Scattolini M., Camporese R. Vapor+Liquid Equilibrium Measurements and Correlation of the Binary Refrigerant Mixtures Difluoromethane (HFC-32) +1,1,1,2,3,3-Hexafluoropropane (HFC-236ea) and Pentafluoroethane (HFC-125) +1,1,1,2,3,3-Hexafluoropropane (HFC-236ea) at 288.6, 303.2, and 318.2. *Int. J. Thermophys.* 2000. V. 21. P. 781–790.
 32. Bobbo S., Fedele L., Camporese R., Stryjek R. Vapor-liquid equilibrium for the three binary systems 1,1,1,2,3,3-hexafluoropropane with dimethyl ether or propane, and 1,1,1,3,3,3-hexafluoropropane with dimethyl ether. *Fluid Phase Equilib.* 2000. V. 174. P. 3–12.
 33. Lemmon E. W., Huber M. L., McLinden M. O. Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties (REFPROP), version 9.0. *National Institute of Standards and Technology*, 2010.

34. Aoyama H., Kishizawa G., Sato H., Watanabe K. Liquid Coexistence Curves in the Critical Region and the Critical Temperatures and Densities of 1,1,1,2-Tetrafluoroethane (R-134a), 1,1,1-Trifluoroethane (R-143a), and 1,1,1,2,3,3-Hexafluoropropane (R-236ea) // *J. Chem. Eng. Data*. 1996. V. 41. No. 5. P. 1046–1051.
35. Груздев В. А., Комаров С. Г. Экспериментальное исследование давления и плотности насыщенного и перегретого пара фреона R-236ea от 20 до 150 °С // *Теплофизика и аэромеханика*. 2006. Т. 13. № 3. С. 443–451.
34. Aoyama H., Kishizawa G., Sato H., Watanabe K. Liquid Coexistence Curves in the Critical Region and the Critical Temperatures and Densities of 1,1,1,2-Tetrafluoroethane (R-134a), 1,1,1-Trifluoroethane (R-143a), and 1,1,1,2,3,3-Hexafluoropropane (R-236ea). *J. Chem. Eng. Data*. 1996. V. 41. No. 5. P. 1046–1051.
35. Gruzdev V. A., Komarov S. G. Experimental study of pressure and density of saturated and superheated vapor of refrigerant R-236ea from 20 to 150°C. *Thermophys. Aeromech.* 2006. V. 13. No 3. P. 411–418. (in Russian)

Сведения об авторах

Рыков Сергей Владимирович

к. т. н., доцент факультета низкотемпературной энергетики 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, 191002, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, togg1@yandex.ru

Рыков Владимир Алексеевич

д. т. н., профессор, доцент факультета низкотемпературной энергетики Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, togg1@yandex.ru

Свердлов Александр Викторович

магистрант факультета низкотемпературной энергетики Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, togg1@yandex.ru

Нурьшева Меруерт

магистрант факультета низкотемпературной энергетики Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, togg1@yandex.ru

Information about authors

Rykov Sergey Vladimirovich

Ph. D., associate professor of Faculty of Cryogenic Engineering of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, togg1@yandex.ru

Kudryavtseva Irina Vladimirovna

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 Alekseyevich

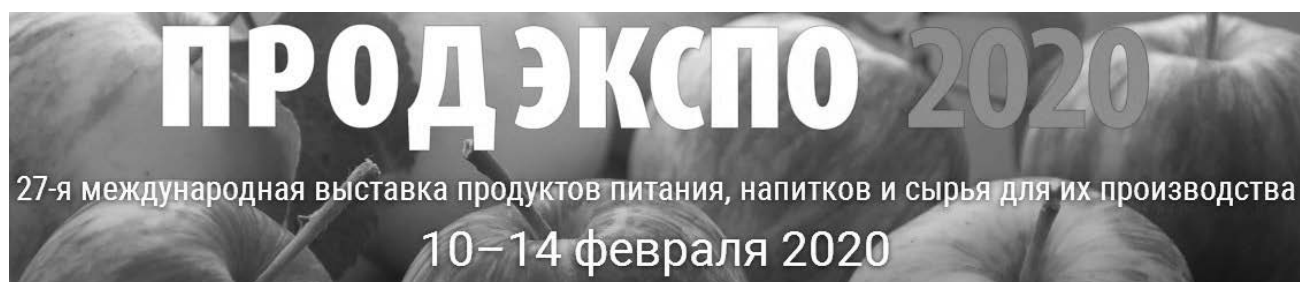
D. Sc., professor, associate professor of Faculty of Cryogenic Engineering of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, togg1@yandex.ru

Sverdlov Aleksandr Viktorovich

Undergraduate of Faculty of Cryogenic Engineering of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, togg1@yandex.ru

Nuryшева Meruert

Undergraduate of Faculty of Cryogenic Engineering of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, togg1@yandex.ru



«Продэкспо» – самая крупная выставка России по размеру выставочных площадей, профессиональному интересу и охвату рынка, по данным Общероссийского рейтинга. «Продэкспо» представляет все отрасли продовольственного рынка.

Организатор выставки:

АО «Экспоцентр»
123100, Москва, Краснопресненская наб., 14
E-mail: mezvist@expocentr.ru

www.prod-expo.ru