

УДК 536.71

## Уравнение линии насыщения, удовлетворяющее модифицированному правилу криволинейного диаметра

Д-р техн. наук РЫКОВ А.В., канд. техн. наук Кудрявцева И.В., канд. техн. наук РЫКОВ С.В.

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет ИТМО  
Институт холода и биотехнологий  
191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

*На примере описания линии фазового равновесия аргона, рассмотрена возможность учета модифицированного правила криволинейного диаметра, согласно которому поведение среднего диаметра определяется показателем степени  $2\beta$ , где  $\beta$  – критический индекс кривой сосуществования.*

**Ключевые слова:** линия насыщения, линия упругости, аргон, критические индексы, критическая точка.

---

## The equation of a line of the phase equilibrium, satisfying to the modified rule of curvilinear diameter

D.Sc. Rykov A.V., Ph.D. Kudryavtseva I.V., Ph.D. Rykov S.V.

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет ИТМО  
Институт холода и биотехнологий  
191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

*On an example of the description of an argon line of phase equilibrium, possibility of the account of the modified rule curvilinear diameter according to which the behaviour of medial diameter is spotted by exponent  $2\beta$  where  $\beta$  – a critical coefficient of a curve of coexistence is viewed.*

**Key words:** saturation line, elasticity line, argon, critical coefficients, critical point.

---

При построении уравнений состояния, учитывающих особенности поведения вещества в окрестности критической точки, необходимо описывать линию насыщения с учетом правила криволинейного диаметра [1–3]:

$$\frac{\rho^- + \rho^+}{2\rho_c} - 1 = A\tau^{1-\alpha} + \dots, \quad (1)$$

где  $\rho^-$  и  $\rho^+$  – плотность на паровой и жидкостной ветвях линии насыщения, соответственно;  $\tau = \frac{t - T_c}{T_c}$ ;  $t = \dots$  – приведенная температура;  $T_c$  – критическая температура;  $\rho_c$  – критическая плотность;  $\alpha$  – критический индекс изохорной теплоемкости.

В [4] это правило сформулировано в виде соотношения:

$$\frac{\rho^- + \rho^+}{2\rho_c} - 1 = A\tau^{2\beta} + \dots, \quad (2)$$

где  $\beta$  – критический индекс кривой сосуществования.

Цель работы – проверить (2) на примере описания прецизионных данных о плотности  $\rho^-$ ,  $\rho^+$  и давлении  $p_s$  на линии упругости аргона.

Для описания давления на линии упругости от тройной точки  $T_t$  до критической точки  $T_c$  воспользуемся уравнением:

$$p_s = p_c \exp\left(-a_0/t\tau^2\right) \left(1 + a_1\tau + a_2|\tau|^{2-\alpha} + a_3|\tau|^{2-\alpha+\Delta} + \sum_{i=4}^7 a_i\tau^{n(i)}\right), \quad (3)$$

где  $a_i$  – постоянные коэффициенты;  $p_c$  – критическое давление;  $\Delta$  – «неасимптотический» критический индекс;  $n(i)$  – массив из натуральных чисел.

Уравнение (3), с одной стороны, обеспечивает асимптотически правильное поведение линии упругости в области малых давлений, а с другой – удовлетворяет требованиям масштабной теории (МТ).

Для описания паровой ветви линии насыщения в [4–7] использовано уравнение:

$$\frac{1}{\rho^-} = \frac{r^*(t)}{T(dp_n(t)/dt)}, \quad (4)$$

в котором давление на линии упругости рассчитывается по уравнению (3), а функция  $r^*(t)$ , имеющая физический смысл «кажущейся» теплоты парообразования, описывается выражением:

$$r^*(t) = \frac{p_c}{\rho_c} \left( d_0 + d_1|\tau|^\beta + d_2|\tau|^{\beta+\Delta} + d_3|\tau|^{1-\alpha} + \sum_{i=4}^6 d_i\tau^{m(i)} \right). \quad (5)$$

где  $d_i$  – постоянные коэффициенты;  $\beta$  – критический индекс кривой сосуществования;  $m_i$  – массив из натуральных чисел.

Зависимость (4) получена из уравнения Клапейрона-Клаузиуса:

$$\left( dp_n(t)/dt \right) = \frac{r(t)}{T(v^+ - v^-)}, \quad (6)$$

где  $v^+$  и  $v^-$  – удельные объемы насыщенной жидкости и насыщенного пара, соответственно.

В работах [4–8] для описания плотности на жидкостной ветви линии насыщения использовано уравнение вида:

$$T_s(\rho) = T_c \left( 1 - x_0 |\Delta\rho|^{1/\beta} + c_1 |\Delta\rho|^\delta + c_2 |\Delta\rho|^{\beta/(2\beta)} + c_3 |\Delta\rho|^{\delta-\alpha/\beta} + \sum_{i=4}^N c_i (\Delta\rho)^{n(i)} \right), \quad (7)$$

где  $c_i$  – постоянные коэффициенты;  $\delta$  – критический индекс критической изо-термы;  $n_i$  – массив из натуральных чисел;  $x_0$  – значение «масштабной» переменной  $x$  на линии насыщения.

Рассмотрим, насколько обоснован выбор уравнения (7). Преобразуем (7) к виду

$$|\Delta\rho|^{1/\beta} = -\frac{1}{x_0} \Delta T_s \left( 1 - \frac{c_1}{x_0} |\Delta\rho|^{\delta-1/\beta} - \frac{c_2}{x_0} |\Delta\rho|^{1/(2\beta)} - \frac{c_3}{x_0} |\Delta\rho|^{\delta-(1+\alpha)/\beta} - \dots \right). \quad (8)$$

где  $\Delta T_s = T_s(\rho)/T_c - 1 = \tau_n$ .

Из (8), учитывая, что при  $\Delta \rightarrow$  на жидкостной ветви линии насыщения имеет место асимптотика:

$$\frac{\rho^+}{\rho_c} - 1 = -A_1 |\tau|^\beta \left( 1 + \frac{A_2}{A_1} |\tau|^\Delta \right),$$

имеем

$$|\Delta\rho| = \frac{1}{x_0^\beta} |\tau_n|^\beta + \frac{\beta c_1 A_1^{\delta-1/\beta}}{x_0^{\beta+1}} |\tau_n|^{1-\alpha} + \frac{\beta c_2 A_1^{1/(2\beta)}}{x_0^{\beta+1}} |\tau_n|^{\beta+1/2} + \quad (9)$$

$$+ \frac{\beta c_3 A_1^{\delta - (1+\alpha)/\beta}}{x_0^{\beta+1}} |\tau_n|^{1-2\alpha} + o(\tau)$$

Учтем, что для того, чтобы выполнялось правило (2), паровая ветвь линии насыщения должна описываться зависимостью:

$$\frac{\rho^+}{\rho_c} = 1 + A_1 |\tau|^\beta + A_2 |\tau|^{\beta+\Delta} + A_3 |\tau|^{2\beta} + A_4 |\tau|^{1-\alpha} + A_5 \tau \quad (10)$$

Из (9) следует, что выражение (5) не удовлетворяет требованию (10). Поэтому, выберем структуру уравнения жидкостной ветви линии насыщения таким образом, чтобы в критической области иметь (10):

$$\frac{\rho^+}{\rho_c} = 1 + A_1 |\tau|^\beta + A_2 |\tau|^{\beta+\Delta} + A_3 |\tau|^{1-\alpha} + A_4 \tau + \sum_{i=5}^N A_i \tau^{m(i)} \quad (11)$$

Уравнение (4) в соответствии с (3) и (5) имеет вид:

$$\frac{1}{\rho^-} = \frac{d_0 + d_1 |\tau|^\beta + d_2 |\tau|^{\beta+\Delta} + d_3 |\tau|^{1-\alpha} + \sum_{i=4}^9 d_i \tau^{m(i)}}{t \rho_c \frac{d}{dt} \left( \exp(-a_0/t\tau^2) \left( 1 + a_1 \tau + a_2 |\tau|^{2-\alpha} + a_3 |\tau|^{2-\alpha+\Delta} + \sum_{i=4}^7 a_i \tau^{s(i)} \right) \right)} \quad (12)$$

Разложим выражения в числителе и знаменателе (12) по малому параметру  $\tau$  и учитывая, что  $a_1 = \dots$ , получим:

$$\Delta \rho^- = -\frac{d_1}{d_0} |\tau|^\beta + \left( \frac{d_1}{d_0} \right)^2 |\tau|^{2\beta} - \frac{d_2}{d_0} |\tau|^{\beta+\Delta} - \frac{d_3}{d_0} |\tau|^{1-\alpha} - (2-\alpha) \frac{a_2}{a_1} |\tau|^{1-\alpha} + \dots \quad (13)$$

В работах [1, 9, 10] на основе совместного анализа результатов современной теории критических явлений и прецизионных опытных данных о  $\rho$  и  $\rho^-$  для ряда технически важных веществ обоснованы (1) и асимптотическая зависимость для приведенной полуразности плотности на жидкостной и паровой ветвях линии насыщения, т.е. выражение:

$$\frac{\rho^+ - \rho^-}{2\rho_c} = A_1 \tau^\beta + A_2 \tau^{\beta+\Delta} \dots \quad (14)$$

Из (3)÷(5) и (11) соотношения (2) и (14) непосредственно не следуют. Для того, чтобы (1) и (2) выполнялись в рамках рассматриваемого подхода, необходимо положить  $A_1 = -$ ;  $A_2 = -$   $\Rightarrow A_1 = -$ ;  $A_2 = -$ .

Отметим, что значения  $a_1$ ,  $d_0$ ,  $d_1$  и  $x_0$  связаны зависимостями  $x_0 =$  и  $d_0 =$ . Для того, чтобы выполнялись (2) и (14), запишем  $\rho$  в виде:

$$\frac{\rho^+}{\rho_c} = 1 + \frac{d_1}{d_0} |\tau|^\beta + \frac{d_2}{d_0} |\tau|^{\beta+\Delta} - \left(\frac{d_1}{d_0}\right)^2 |\tau|^{2\beta} + A_3 |\tau|^{1-\alpha} + A_4 \tau + \sum_{i=5}^6 A_i \tau^{s(i)} \quad (15)$$

Теперь уравнения (3)÷(5) и (15) верно воспроизводят скейлинговые зависимости (2) и (14).

Коэффициенты уравнений (3), (4) и (15) находились путем минимизации на массиве опытных данных [11–17] следующих функционалов:

– на линии упругости

$$\Phi_{p_n} = \sum_{j=1}^{N_1} \left[ Q_{p_n, j} \left( p_{n, j}^{расч} - p_{s, j}^{эксн} \right) \right]^2 \quad (16)$$

– на паровой ветви линии насыщения

$$\Phi_{\rho^-} = \sum_{j=1}^{N_2} \left[ Q_{\rho^-, j}^* \left( 1/\rho_{j, расч}^- - 1/\rho_{j, эксн}^- \right) \right]^2, \quad (17)$$

– на жидкостной ветви линии насыщения

$$\Phi_{\rho^+} = \sum_{j=1}^{N_2} \left[ Q_{\rho^+, j}^* \left( \rho_{j, расч}^+ - \rho_{j, эксн}^+ \right) \right]^2, \quad (18)$$

где  $Q_{x, j}^*$  – «вес»  $j$ -точки соответствующего свойства  $x$ .

В результате параметров, входящим в (3), (4), (5), (15) присвоены значения:  $T_c = 150,66$  К;  $\rho_- = 534,10$  кг/м<sup>3</sup>;  $p_c = 48,634$  Бар;  $\alpha = 0,11$ ;  $\beta = 0,325$ ;  $\gamma = 1,24$ ;  $\delta = 4,8154$ ;  $\Delta = 0,5$ ;  $a_1 = 6,084838347525$ ;  $a_2 = -15,08625255193$ ;

$a_3 = -3,054965902264$ ;  $a_4 = -3,740174488012$ ;  $a_5 = 4,537955958279$ ;

$a_6 = 30,71070895871$ ;  $a_7 = -14,71922419157$ ;  $n(i) = 2; 3; 5; 7$ ;  $d_0 = 8,70152917445$ ;

$d_1 = 44,7239313764$ ;  $d_2 = -35,9290772750$ ;  $d_3 = 11,1552195867$ ;  $d_4 = 59,2582767191$ ;

$$d_5 = 73,2401605837; m_i = \quad ; A_3 = -7,81323527615; A_4 = -0,892716719160;$$

$$A_5 = 1,66800041961; A_6 = 1,95435565697,$$

$$A_7 = -1.48385894266; n(i) = 2;3;5 .$$

В результате расчетов получены значения «кажущейся» теплоты парообразования в критической точке  $r_c^* = 55.41$  кДж/кг и параметра линии насыщения  $x_0 = 0,3326677185576$ .

На рис. 1–3 представлены отклонения значений  $p_s$ ,  $\rho$ ,  $\rho$ , рассчитанных по уравнениям (3), (4), (15) от соответствующих данных [11–18]. Наблюдается удовлетворительное согласие между расчетной и экспериментальной информацией от тройной точки до критической.

Полученные результаты не позволяют сделать однозначный вывод о том, какое из соотношений (1) или (2) более точно воспроизводит линию равновесия чистых веществ в окрестности критической точки. Поэтому для описания равновесных свойств на линии фазового равновесия можно пользоваться как (1), так и (2).

Предложенную методику можно использовать также для расчета линии насыщения при построении масштабных [19–29] и широкодиапазонных уравнений состояния [30–42], в структуре которых линия насыщения выполняет роль опорной кривой. Особенно актуальны результаты данной работы, если в структуру уравнения состояния включена обобщенная масштабная переменная  $\tilde{\tau}$  (она впервые использована в работах [43]), которая используется для построения как масштабных, так и широкодиапазонных уравнений состояния, удовлетворяющих масштабной теории критических явлений. Действительно, масштабная переменная  $\tilde{\tau}$  (она впервые использована в работе [43]) определяется на основе равенства:

$$\tilde{x} = \tau / \tilde{\tau}_s, \quad (19)$$

где функция  $\tau$ ,  $\rho$  выбирается из условия:

$$\tau_h = -x_0 \tilde{\tau}_s, \quad (20)$$

тем самым обеспечивается правильное описание линии насыщения  $T_s$ ,  $\rho$  от тройной точки до критической. Таким образом, согласно (19), (20) для расчета переменной  $\tilde{\tau}$  достаточно иметь информацию о линии насыщения и критической температуре. Результаты работы использовались при составлении курса по математическому моделированию для системы дистанционного обучения [44, 45].

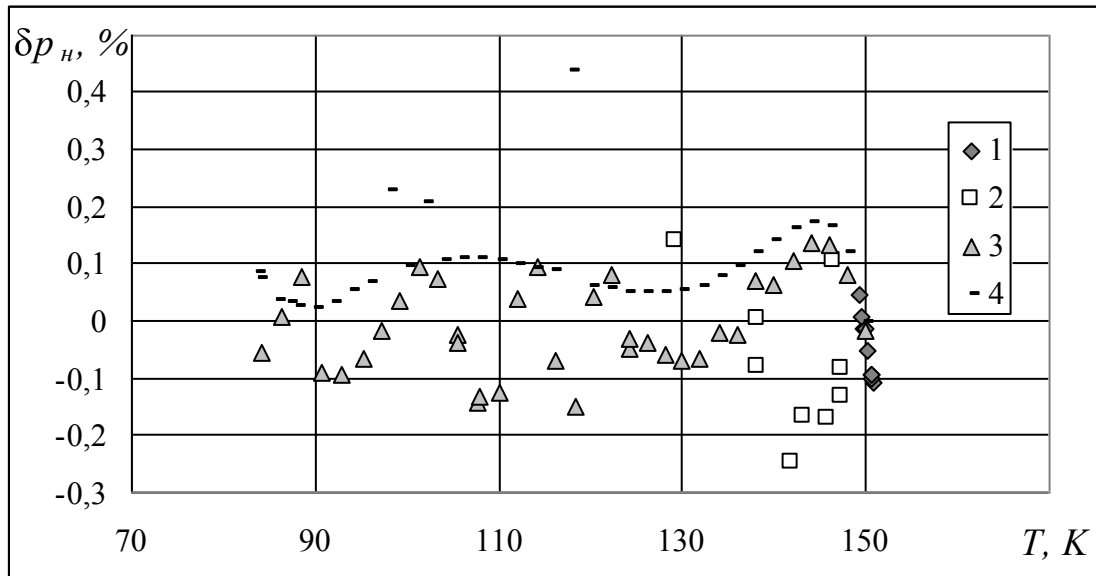


Рис. 1. Отклонения  $\delta p_n = \frac{p_n - p_n^r}{p_n^r}$  давления  $p_n^r$ , рассчитанного по уравнению (3) от данных: 1 – [11]; 2 – [15]; 3 – [12]; 4 – [18].

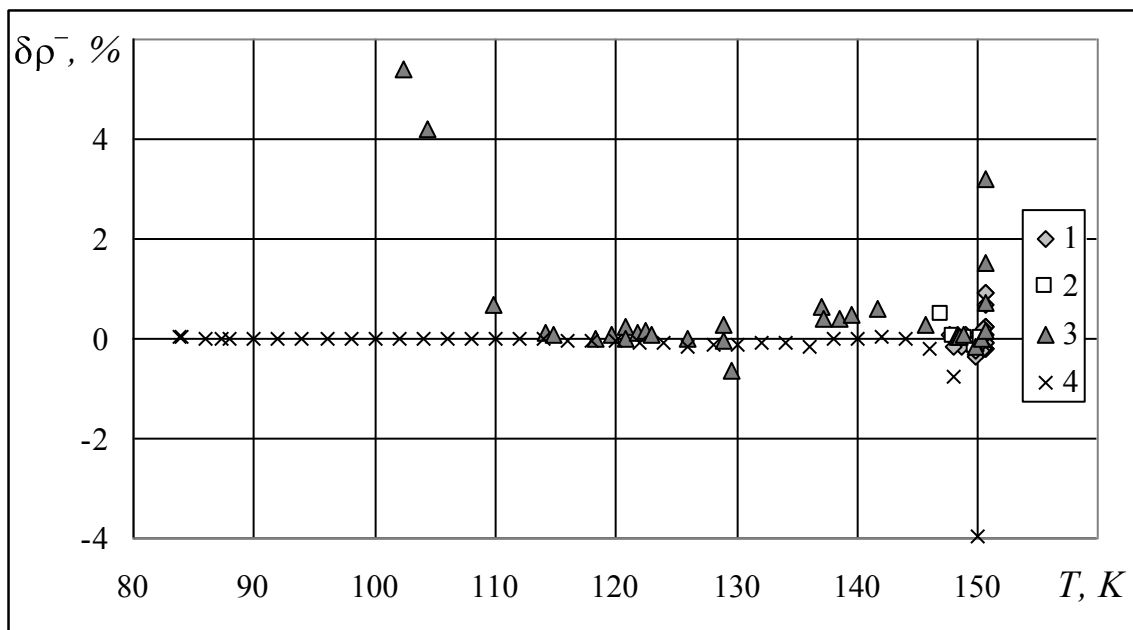


Рис.2. Отклонения  $\delta \rho_s = \frac{\rho_s - \rho_s^r}{\rho_s^r}$  плотности насыщенной жидкости  $\rho_s^r$ , рассчитанного по уравнению (4) от данных: 1 – [13]; 2 – [17]; 3 – [16]; 4 – [18].

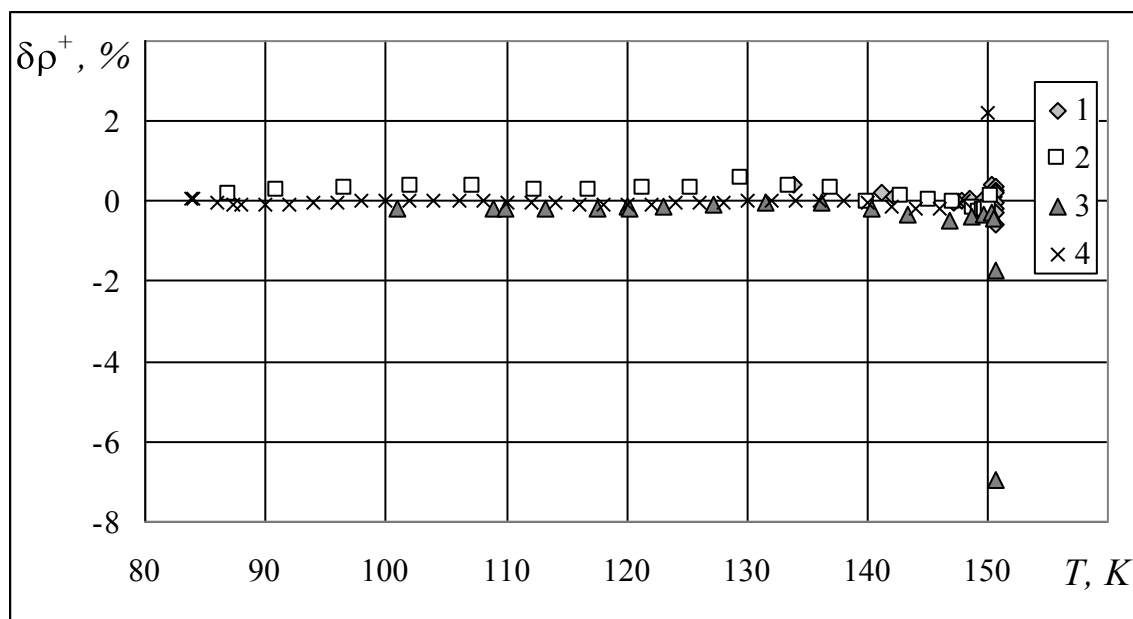


Рис.2. Отклонения  $\delta\rho = \rho_{\text{расч}} - \rho_{\text{эксп}}$ , % от плотности насыщенной

жидкости  $\rho_{\text{эксп}}$ , рассчитанного по уравнению (4) от данных:

1 – [13]; 2 – [15]; 3 – [14]; 4 – [18].

#### Список литературы:

1. Kleinrahn 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.

2. Ustjuzhanin E. E., Abdulagatov I. M., Popov P. V., Rykov V. A., J. Jata A comparison of scaling models of thermodynamic properties along the coexistence curve including the critical point // Abstracts of Sixteenth Symposium on Thermophysical Properties, (Boulder, Colorado, USA, July 29-August 5) (2003).

3. Устюжанин Е.Е., Абдулагатов И.М., Попов П.В., Шишаков В.В., Рыков В.А. Скейлинговые модели для описания термодинамических свойств на линии насыщения: характеристики и критерии // Ультразвук и термодинамические свойства вещества. 2009. № 36. С. 110–112.

4. Кудрявцева И.В. и др. Метод расчета плотности и теплоты парообразования двуокси углерода / Кудрявцева И.В., Рыков В.А., Рыков С.В., Селина Е.Г., Курова Л.В. // Научный журнал НИУ ИТМО [Электронный ресурс]. – Санкт-Петербург: СПб НИУ ИТМО, 2013. – № 1. – Режим доступа: <http://processes.open-mechanics.com/>



5. Рыков С.В., Самолетов В.А., Рыков В.А. Линия насыщения аммиака // Вестник Международной академии холода. 2008. № 4. С. 20–21.

6. Рыков С.В. Метод построения асимметричного масштабного уравнения состояния в физических переменных // Дис. на соискание уч. ст. канд. техн. наук. – СПб.: СПбГУНиПТ. 2009. 198 с.

7. Козлов А.Д., Лысенков В.Ф., Попов П.В., Рыков В.А. Единое неаналитическое уравнение состояния хладона 218 // Инженерно-физический журнал. 1992. Т. 62. № 6. С. 840–847.

8. Рыков С.В., Кудрявцева И.В., Демина Л.Ю. Единое уравнение состояния R717, учитывающее особенности критической области // Вестник Международной академии холода. 2009. № 4. С. 29–32.

9. Устюжанин Е.Е., Шишаков В.В., Попов П.В., Рыков В.А., Френкель М.Л. Скейлинговые модели для описания термодинамических свойств вещества на линии насыщения: перспективы и ограничения // Вестник Московского энергетического института. 2011. № 6. С. 167–179.

10. Устюжанин Е.Е., Шишаков В.В., Абдулагатов И.М., Попов П.В., Рыков В.А., Френкель М.Л. Скейлинговые модели для описания термодинамических свойств на линии насыщения: проблемы и некоторые решения // Сверхкритические флюиды: Теория и практика. 2012. Т. 7. № 3. С. 30–55.

11. Verbeke O.V., Jansoone V., Gielen H, De Voelpraep J. The equation of state of fluid argon and calculation of the scaling exponents // J. Phys.Chem. 1969. V. 73, № 12. P. 4076–4085.

12. Bowman D.H., Aziz A.A., Lim C.C. Vapor pressure of liquid argon, krypton and xenon // Canadian J. of Phys. 1969. Vol. 47, № 3. P. 267–273.

13. Анисимов М.А., Ковальчук Б.А., Рабинович В.А., Смирнов В.А. Результаты экспериментального исследования теплоемкости  $C_v$  аргона в однофазной и двухфазной областях // Теплофизические свойства веществ и материалов. – М.: Изд-во стандартов. 1978. Вып. 12. – С. 86–106.

14. Verbeke O.V. An equation for the vapour pressure curve // Cryogenics. 1970. V. 10, № 6. P. 486–490.

15. Itterbeek van A., Verbeke O., Staes K. The equation of state of liquid Ar and  $CH_4$  // Physica. 1963. V. 29, № 6. P. 742–754.

16. Шавандрин А.М., Потопова Н.М., Чашкин Ю.Р. Исследование кривой сосуществования жидкость-пар аргона в широкой области температур методом квазистати-

ческих термограмм // Теплофизические свойства веществ и материалов. – М.: Изд-во стандартов. 1975. Вып. 9. – С. 141–146.

17. Michels A., Levelt I.M., De Graaff W. Compressibility isotherms of argon at temperature between  $-25^{\circ}\text{C}$  and  $-155^{\circ}\text{C}$ , and at densities up to 640 Amagat (pressures up to 1050 atm.) // Physica. 1958. V. 24, № 8. P. 659–671.

18. Stewart R.B., Jacobsen R.T., Becker J.H., Teng J.C.J., Mui P.K.K. Thermodynamic Properties of Argon from the Tripl Point to 1200 K with Pressures to 1000 MPa // VIII Symp. Thermoph. Prop. ed Sengers J.V. Amer. soc. mech. Eng., New York. 1982. V. 1. С. 97–113.

19. Рыков В.А. Уравнение состояния в критической области, построенное в рамках метода нескольких «псевдоспинодальных» кривых // Журнал физической химии. 1985. Т.59, № 10. С. 2605–2607.

20. Рыков В.А. О гипотезе «псевдоспинодальной» кривой // Журнал физической химии. 1986. Т. 60. № 3. С. 789–793.

21. Рыков В.А. Масштабное уравнение состояния в физических переменных // Теплофизика высоких температур. 1986. Т. 25, №2. С. 345.

22. Rykov V.A., Varfolomeeva G.B. Method of determining a structural form of the free energy satisfying the requirements of the scaling hypothesis // Journal of Engineering Physics. 1985. Т. 48. № 3. С. 341–345.

23. Rykov V.A. Structure of the singular terms in the free energy correctly reproducing the nonasymptotic corrections to the thermodynamic functions // Journal of Engineering Physics. 1986. Т. 49. № 6. С. 1502–1508.

24. Рыков С.В. Выбор структуры масштабных функций асимметричного уравнения состояния // Научный журнал НИУ ИТМО [Электронный ресурс]. – Санкт-Петербург: СПб НИУ ИТМО, 2009. – № 2. – Режим доступа: <http://refrigeration.open-mechanics.com/>

25. Рыков С.В. и др. Асимметричное масштабное уравнение состояния аргона в переменных плотность-температура / Рыков С.В., Кудрявцева И.В., Рыков В.А. // Научный журнал НИУ ИТМО [Электронный ресурс]. – Санкт-Петербург: СПб НИУ ИТМО, 2008. – № 2. – Режим доступа: <http://refrigeration.open-mechanics.com/>

26. Рыков С.В., Багаутдинова А.Ш., Кудрявцева И.В., Рыков В.А. Асимметричное масштабное уравнение состояния // Вестник Международной академии холода. 2008. № 3. С. 30–32.

27. Рыков А.В. Кудрявцева И.В., Рыков В.А. Асимметричное масштабное уравнение состояния R23 // Вестник Международной академии холода. 2012. № 4. С. 26–28.

28. Рыков А.В. и др. Непараметрическое масштабное уравнение состояния, не содержащее дифференциальных биномов / Рыков А.В., Кудрявцева И.В., Рыков С.В. // Научный журнал НИУ ИТМО [Электронный ресурс]. – Санкт-Петербург: СПб НИУ ИТМО, 2013. – № 2. – Режим доступа: <http://refrigeration.open-mechanics.com/>

29. Кудрявцева И.В. и др. Метод расчета равновесных свойств сверхкритических флюидов, используемых в СКФ-технологиях / Кудрявцева И.В., Рыков А.В., Рыков В.А. // Научный журнал НИУ ИТМО [Электронный ресурс]. – Санкт-Петербург: СПб НИУ ИТМО, 2013. – № 2. – Режим доступа: <http://processes.open-mechanics.com/>

30. Клецкий А.В., Голубев И.Ф., Перельштейн И.И. Аммиак жидкий и газообразный. Плотность, энтальпия, энтропия и изобарная теплоемкость / ГССД 91-85. – М.: Изд-во стандартов, 1986.

31. Митропов В.В., Клецкий А.В. Способы включения опытных данных в программу построения взаимосогласованных уравнений состояния // Известия СПбГУ-НиПТ, 2006. № 2.

32. Рыков А.В. и др. К вопросу описания термодинамической поверхности, включая критическую область, уравнениями состояния в физических переменных / Рыков А.В., Кудрявцева И.В., Рыков В.А. // Научный журнал НИУ ИТМО [Электронный ресурс]. – Санкт-Петербург: СПб НИУ ИТМО, 2013. – № 1. – Режим доступа: <http://refrigeration.open-mechanics.com/>

33. Кудрявцева И.В., Рыков В.А., Рыков С.В. Ассиметричное единое уравнение состояния R134a // Вестник Международной академии холода. 2008. № 2. С. 36–39.

34. Рыков С.В., Кудрявцева И.В. Метод расчета асимметричных составляющих свободной энергии в физических переменных // Вестник Международной академии холода. 2009. № 1. С. 43–45.

35. Рыков С.В. Метод построения асимметричного масштабного уравнения состояния в физических переменных // Автореферат дис. на соискание уч. ст. канд. техн. наук. – СПб.: СПбГУНиПТ. 2009.

36. Кудрявцева И.В., Багаутдинова А.Ш., Рыков С.В. Построение фундаментального уравнения состояния на основе совместного анализа степенных функционалов и законов масштабной теории // Известия Санкт-Петербургского государственного университета низкотемпературных и пищевых технологий. 2009. № 1. С. 50–52.

37. Рыков С.В. и др. Метод построения фундаментального уравнения состояния, учитывающего особенности критической области / Рыков С.В., Кудрявцева И.В., Рыков А.В., Курова Л.В. // Научный журнал НИУ ИТМО [Электронный ресурс]. – Санкт-

Петербург: СПб НИУ ИТМО, 2013. – № 1. – Режим доступа: <http://refrigeration.open-mechanics.com/>

38. Рыков А.В. и др. Анализ экспериментальной информации о равновесных свойствах  $r_{218}$  на основе неаналитического уравнения состояния / Рыков А.В., Кудрявцева И.В., Рыков С.В. // Научный журнал НИУ ИТМО [Электронный ресурс]. – Санкт-Петербург: СПб НИУ ИТМО, 2013. – № 1. – Режим доступа: <http://refrigeration.open-mechanics.com/>

39. Борзенко Е.И. и др. Расчёт теплофизических свойств криопродуктов на линии насыщения с повышенной точностью / Борзенко Е.И., Зайцев А.В., Кудацова Н.В. // Научный журнал НИУ ИТМО [Электронный ресурс]. – Санкт-Петербург: СПб НИУ ИТМО, 2011. – № 2. – Режим доступа: <http://refrigeration.open-mechanics.com/>

40. Рыков С.В. Метод построения асимметричных составляющих свободной энергии // Сборник «Проблемы пищевой инженерии», СПбГУНиПТ. СПб. 2006 г., Деп. в ВИНТИ 23.06.06. № 833-В2006. С. 53–56.

41. Кудрявцева И.В. Асимметричное единое уравнение состояния аргона и хладагента R134a // Дис. на соискание уч. ст. канд. техн. наук. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2007, – 143 с.

42. Кудрявцева И.В. Структура единого асимметричного уравнения состояния жидкости и газа, воспроизводящего окрестность критической точки // Сборник «Проблемы пищевой инженерии», СПбГУНиПТ. СПб. 2006 г., Деп. в ВИНТИ 23.06.06. № 833-В2006.

43. Рыков В.А. Метод расчета  $\rho$ -T параметра спинодали // Инженерно-физический журнал. 1986. Т. 50, № 4. С. 675–676.

44. Арет В.А. и др. О подготовке учебных материалов для обучения инженеров в интернете / Арет В.А., Кулаев Д.Х., Малявко Д.П., Морозов Е.А. // Научный журнал НИУ ИТМО [Электронный ресурс]. – Санкт-Петербург: СПб НИУ ИТМО, 2006. – № 1. – Режим доступа: <http://processes.open-mechanics.com/>

45. Кудрявцева И.В., Рыков С.В., Селина Е.Г., Рыков В.А., Курова Л.В. Современные технологии обучения на примере освоения методов расчета равновесных свойств индивидуальных веществ // Материала XIX Международной научно-методической конференции “Современное образование: содержание, технологии, качество”. Санкт-Петербург, 24 апреля 2013 г. Т. 1. С. 103–104.