

УДК 536.71

Расчет линии упругости перфторпропана в пакете MATHCAD

Кудрявцев Д.А., д-р техн. наук, проф. Рыков В.А.

Университет ИТМО

191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

Канд. техн. наук, доц. Устюжанин Е.Е.

НИУ МЭИ, Национальный исследовательский университет

Московского энергетического института

Построено уравнение линии упругости, учитывающее требования масштабной гипотезы и особенности поведения давления насыщенного пара вблизи тройной точки. В отличие от известных моделей, описывающих линию упругости в диапазоне температур от тройной точки до критической, предложенная модель описывает линию упругости в широкой окрестности критической точки в соответствии с требованиями современной теории критических явлений. На основе предложенного уравнения линии упругости во всем указанном температурном диапазоне рассчитаны подробные таблицы для перфторпропана, включающие значения давления, первую и вторую производные давления на линии фазового равновесия как функции температуры. Значения, рассчитанные по полученным уравнениям, не уступают используемым в настоящее время таблицам по точности описания экспериментальных данных. Относительные отклонения от экспериментальных и табличных данных представлены на рисунке. В работе приведены значения всех параметров, входящих в уравнение. Также приведены зависимости для расчета первой и второй производных линии упругости. Полученное уравнение может быть использовано для расчета точных термодинамических таблиц на линии фазового равновесия и для получения опорного массива точек при вычислении коэффициентов масштабных и фундаментальных уравнений состояния. Возможно использование полученного в статье уравнения для описания линии упругости других технически важных веществ, используемых в холодильной и пищевой промышленности.

Ключевые слова: линия упругости, давление, перфторпропан, R218, критические индексы.

Calculation of a line of elasticity perfluoropropane in MATHCAD

Kudryavtsev D.A., D.Sc. Rykov V.A.

University ITMO

191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9

Ph.D. Ustyuzhanin E.E.

NIU MEI, National research university Moscow power institute

Built equation of the line of elasticity, taking into account the requirements of large-scale hypothesis and the behavior of the saturated vapor pressure near the triple point. In contrast to known models describing the line of elasticity in the temperature range from the triple point to the critical, the proposed model describes a line of elasticity in the general vicinity of the critical point, in accordance with the requirements of the modern theory of critical phenomena. Based on the proposed line equation of elasticity throughout the specified temperature range designed for perfluoropropene detailed table comprising values of the pressure, the first and second derivatives of the pressure on the phase equilibrium line as a function of temperature. The value calculated on the obtained equations are not inferior to the currently used tables in

accuracy to describe the experimental data. The relative deviation from the experimental and tabular data presented in the figure. The paper contains the values of all parameters included in the equation. Also the dependences for calculation of first and second derivatives line of elasticity. The obtained equation can be used to calculate the exact thermodynamic tables on the line of phase equilibrium and to obtain the support of the array points in the calculation of the coefficients of a large-scale and fundamental equations of state. Possible to use the resulting equation in the article to describe the elastic line of other technologically important materials used in refrigeration and food industries.

Key words: line elasticity, pressure, perfluoropropane, R218, critical exponents.

При расчете равновесных теплофизических характеристик рабочих веществ, используемых в СКФ-технологиях [1, 2], применяемых в пищевой, парфюмерной, фармацевтической промышленности, большое значение имеет насколько точно предложенные расчетные методы воспроизводят основные характерные особенности термодинамической поверхности [3–5]. К таким особенностям относятся, например, степенные законы масштабной теории критических явлений [6], которые отражают влияние крупномасштабных флуктуаций плотности на формирование термодинамической поверхности вблизи критической точки. Поэтому, в частности, при выборе формы уравнения линии упругости $p_s(T)$ необходимо, чтобы выполнялись следующие условия [7]:

– в окрестности критической точки:

$$p_s(T) = p_c \left(1 + a_1 \tau + a_2 |\tau|^{2-\alpha} + a_3 |\tau|^{2-\alpha+\Delta} + \dots \right); \quad (1)$$

– в окрестности тройной точки:

$$\ln p_s(T) \sim -\frac{a_0}{t}. \quad (2)$$

Здесь p_c – критическое давление; $t = T/T_c$ – приведенная температура; T_c – критическая температура; $\tau = T/T_c - 1$; α – критический индекс изохорной теплоемкости; Δ – неасимптотический критический индекс; a_i (где $i = 0, 1, 2, \dots$) – постоянные коэффициенты.

В силу того, что из (2) следует, что

$$p_s(T) = A e^{-a_0/t}, \quad (3)$$

придем к следующей форме линии упругости:

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

где $m \geq 1$ ($m \in N$); $n, s_i \in N$; N – множество натуральных чисел.

Расчет коэффициентов линии упругости (4) проводился в пакете MathCAD 15. Использование этого пакета позволило существенно сократить время на ввод кода программы, расчет таблиц зависимости давления от температуры на линии фазового равновесия, анализ точности описания экспериментальных и табличных данных полученным уравнением по сравнению со случаем программирования этой же задачи, к примеру, на алгоритмическом языке Fortran. Это достигается за счет простоты и наглядности структуры программы, большого количества встроенных функций, мощного инструментария для рабо-

ты с графической информацией. Пакет MathCAD также отличает простота переноса полученных результатов в специализированные программы, такие как MS Word и MS Excel, предназначенные для окончательной подготовки статьи в научный журнал [8].

В результате обработки экспериментальных и табличных данных [7, 9–12] о давлении на линии насыщения перфторпропана были выбраны следующие значения параметров линии упругости (1): $T_c = 345,03$ К; $p_c = 26,7886$ бар; $\alpha = 0,11$; $\Delta = 0,5$; $s_4 = 2$; $s_5 = 3$; $s_6 = 5$; $s_7 = 7$; $a_0 = 10,2$; $a_1 = 7,925892495526347$; $a_2 = 58,21776118636697$; $a_3 = -32,79619921853542$; $a_4 = -33,41974070636767$; $a_5 = -15,80383754946752$; $a_6 = 0,2827064631835001$; $a_7 = 1,0400011352850764$.

Поскольку функция $p_s(T)$ используется при расчете паровой ветви линии насыщения T_s, p_s , которая структурно входит в уравнения состояния, разрабатываемые в рамках метода псевдокритических точек [13–16], то большое значение при описании поведения равновесных характеристик сверхкритических флюидов имеет характер поведения первой производной $p'_s(T)$:

$$\frac{dp_s}{dT} = p_s(T) \frac{a_0 \tau \left(\frac{T_c}{T} \tau - 2 \right)}{T} + \frac{p_c}{T_c} \exp\left(-\frac{a_0}{t} \tau^2 \right) \times \left(a_1 - 2 - \alpha a_2 |\tau|^{1-\alpha} - 2 - \alpha + \Delta a_2 |\tau|^{1-\alpha+\Delta} + \sum_{i=4}^7 s_i a_i \tau^{s_i-1} \right) \quad (5)$$

и второй производной $p''_s(T)$:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 p_s}{dT^2} = & 2 p_s(T) a_0 \left(\frac{T^2 - T_c}{T^3 T_c} - \frac{T}{T^2 T_c} \right) + \frac{a_0 \tau \left(\frac{T_c}{T} \tau - 2 \right)}{T} \frac{dp_s}{dT} + \\ & + \frac{p_c}{T_c} \exp\left(-\frac{a_0}{t} \tau^2 \right) \frac{a_0 \tau \left(\frac{T_c}{T} \tau - 2 \right)}{T} \times \\ & \times \left(a_1 - 2 - \alpha a_2 |\tau|^{1-\alpha} - 2 - \alpha + \Delta a_3 |\tau|^{1-\alpha+\Delta} + \sum_{i=4}^n s_i a_i \tau^{s_i-1} \right) + \frac{p_c}{T_c^2} \exp\left(-\frac{a_0}{t} \tau^2 \right) \times \\ & \times \left(2 - \alpha a_2 |\tau|^{-\alpha} + 2 - \alpha + \Delta a_3 |\tau|^{-\alpha+\Delta} + \sum_{i=4}^n s_i (s_i - 1) a_i \tau^{s_i-2} \right). \end{aligned} \quad (6)$$

На рис. 1 и рис. 2 представлены результаты расчета по уравнению линии упругости (4). Из рис. 1 видно, что полученные в работе результаты позволили существенно скорректировать расчетные значения давления на линии упругости, представленные в работе [12] и рассчитанные на основе RefProp 7.

Как следует из таблицы 1, и первая dp_s/dT и вторая $d^2 p_s/dT^2$ производные (5) и (6) на линии упругости носят монотонный характер, что позволяет рекомендовать уравнение (4) в качестве базового при решении, во-первых, задачи описания линии фазового равновесия технически важных веществ [13–

23], во-вторых, построения как масштабных [24–44], так и широкодиапазонных уравнений состояния [45–49], удовлетворяющих масштабной теории критических явлений. Полученные в работе результаты также могут найти применение не только в пищевой промышленности при реализации СКФ-технологий, но и в других отраслях, например, в холодильной и криогенной промышленности [50–58].

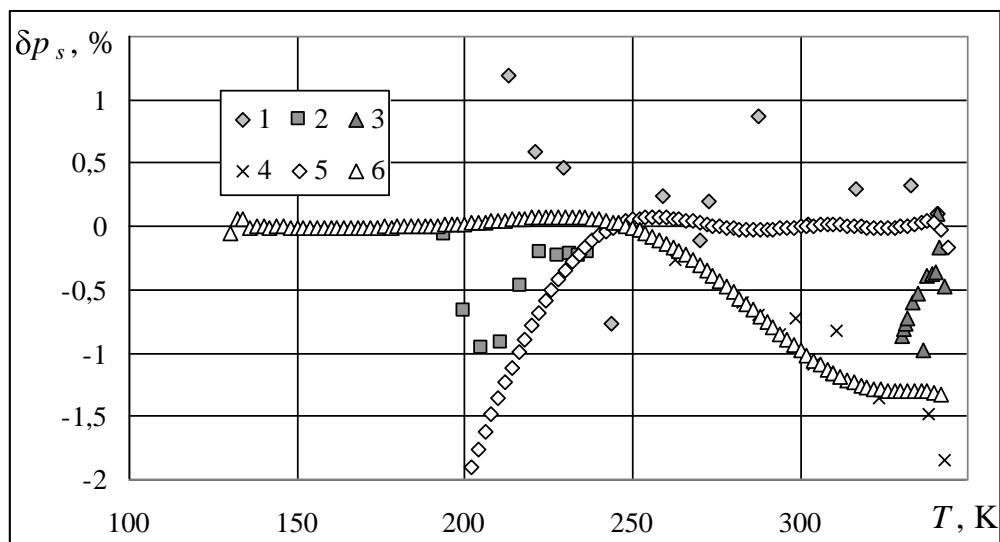


Рис. 1. Относительные отклонения давления R218 на линии упругости, рассчитанных по уравнению (4), от данных: 1 – [9]; 2 – [10]; 3 – [11]; 4 – [7]; 5 – [12]; 6 – RefProp 7.

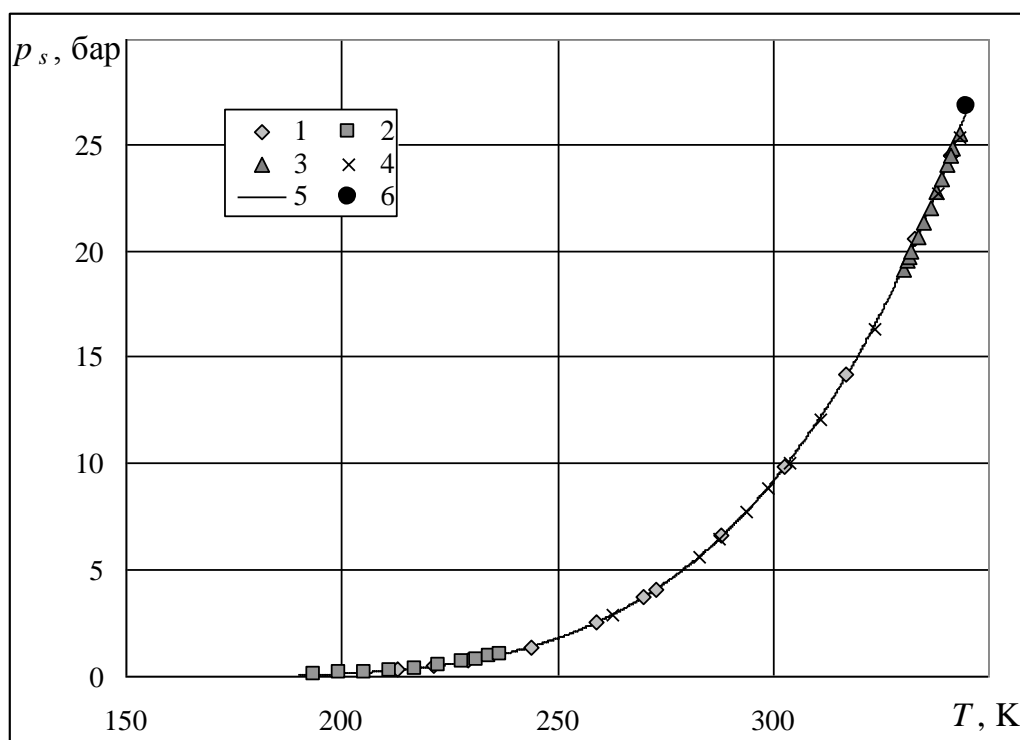


Рис. 2. Линия упругости хладона R218: 1 – [9]; 2 – [10]; 3 – [11]; 4 – [7]; 5 – расчет по уравнению (4); 6 – критическая точка.

Таблица 1

T, K	$p_s, \text{бар}$	dp_s/dT	$d^2 p_s/dT^2$
125	1,838e-5	0,00000377	7,0199e-7

130	4,8929e-5	0,00000915	1,5478e-6
135	1,1975e-4	0,00002051	3,1573e-6
140	2,7208e-4	0,00004279	6,0136e-6
145	5,7871e-4	0,00008382	1,078e-5
150	1,1606e-3	0,00015519	1,8309e-5
155	2,2081e-3	0,00027324	2,964e-5
160	4,007e-3	0,00045991	4,5967e-5
165	6,9682e-3	0,0007434	6,8592e-5
170	0,0117	0,00115858	9,887e-5
175	0,0188	0,00174708	1,3813e-4
180	0,0295	0,00255697	1,8763e-4
185	0,0449	0,00364222	2,4844e-4
190	0,0665	0,00506173	3,2147e-4
195	0,0961	0,00687835	4,0737e-4
200	0,136	0,0091576	5,0657e-4
205	0,1886	0,01196657	6,1927e-4
210	0,2567	0,0153728	7,4547e-4
215	0,3434	0,01944345	8,85e-4
220	0,4523	0,02424454	1,0376e-3
225	0,5872	0,02984052	1,2029e-3
230	0,7522	0,03629401	1,3805e-3
235	0,9517	0,0436657	1,5701e-3
240	1,1905	0,05201425	1,7712e-3
245	1,4736	0,06139634	1,9834e-3
250	1,8062	0,07186656	2,2064e-3
255	2,1941	0,08347731	2,4396e-3
260	2,643	0,09627851	2,6825e-3
265	3,159	0,11031741	2,9346e-3
270	3,7483	0,12563841	3,1952e-3
275	4,4176	0,14228302	3,4639e-3
280	5,1734	0,16029042	3,7403e-3
285	6,0228	0,17969867	4,0243e-3
290	6,9728	0,20054714	4,3166e-3
295	8,0307	0,22288077	4,6188e-3
300	9,2042	0,24675702	4,9344e-3
305	10,501	0,27225701	5,2696e-3
310	11,9297	0,29950339	5,6352e-3
315	13,4993	0,32868962	6,0495e-3
320	15,2203	0,3601302	6,5438e-3
325	17,1052	0,39435342	7,1753e-3
330	19,17	0,4322928	8,0569e-3
335	21,4372	0,47575613	9,453e-3
340	23,9434	0,52898966	0,0122
345	26,7702	0,61390213	0,0414

345,03	26,7886	0,61537711	
--------	---------	------------	--

Список литературы

1. Алиев А.М., Раджабов Г.К., Степанов Г.В. Компонентный состав экстракта шишкоягод можжевельника продолговатого, полученного экстракцией сверхкритическим диоксидом углерода // Сверхкритические флюиды: Теория и практика. 2012. Т. 7. № 3. С. 20–29.
2. Анисимов М.А. Холодная и переохлажденная вода как необычный сверхкритический флюид // Сверхкритические флюиды: Теория и практика. 2012. Т. 7. № 2. С. 19–37.
3. Рыков С.В., Самолетов В.А., Рыков В.А. Линия насыщения аммиака // Вестник Международной академии холода. 2008. № 4. С. 20–21.
4. Лысенков В.Ф., Попов П.В., Рыков В.А. Параметрические масштабные уравнения состояния для асимптотической окрестности критической точки. Обзоры по теплофизическим свойствам веществ // ТФЦ – М.: ИВТАН. 1992. № 1 (93). С. 3–80.
5. 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. № 2. С. 31.
6. Рыков В.А. Определение «псевдоспинодальной» кривой на основе термодинамических равенств $\partial T / \partial s_v = 0$ и $\partial v / \partial p_T = 0$ // Журнал физической химии. 1985. Т. 59. № 11. С. 2905.
7. Владимиров Б.П., Швец Ю.Ф. Давление насыщенных паров фреонов 218, 329 и азеотропной смеси R116 и R23 // Теплофиз. св-ва веществ и материалов. – М.: Изд-во стандартов, 1989. Вып. 28. С. 24–25.
8. Буткарев А. Г., Рыков В. А., Рыков С. А. Эффективное использование редактора MS WORD для оформления документов большого объема // Пособие для самостоятельной работы /; Федеральное агентство по образованию, Санкт-Петербургский гос. ун-т низкотемпературных и пищевых технологий. Санкт-Петербург, 2007.
9. Brown I.A. Physical properties of perfluoropropane // J. Chem. Eng. Data. 1963. Vol. 8, № 11. P. 106–108.
10. 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. № 1. P. 38–43.
11. Mousa A.N., Kay W.B., Kreglewski A. The critical constant of binary mixtures of certain perfluorocompounds with alkanes // J. Chem. Thermodynamics. 1972. № 4. P. 301–311.
12. 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 г., № 813-05 кк.
13. Устюжанин Е.Е., Шишаков В.В., Абдулагатов И.М., Рыков В.А., Попов П.В. Давление насыщения технически важных веществ: модели и расчеты для критической области // Вестник Московского энергетического института. 2012. № 2. С. 34–43.
14. Рыков А.В., Кудрявцева И.В., Рыков С.В. Уравнения линии насыщения и упругости хладона R218 // Вестник Международной академии холода. 2013. № 4. С. 54–57.

15. 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. N 8. P. 912–931.
16. Рыков С.В., Рябова Т.В. Расчет линии фазового равновесия аммиака в пакете MathCad // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». 2013. № 2. С. 8.
17. Рыков А.В., Кудрявцева И.В., Рыков С.В. Уравнение линии насыщения, удовлетворяющее модифицированному правилу криволинейного диаметра // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». 2013. № 2. С. 9.
18. Кудрявцева И.В., Рыков А.В., Рыков В.А. Новое уравнение для «кажущейся» теплоты парообразования // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2013. № 2. С. 30.
19. Устюжанин Е.Е., Абдулагатов И.М., Попов П.В., Шишаков В.В., Рыков В.А. Скейлинговые модели для описания термодинамических свойств на пограничной кривой: характеристики и критерии // Ультразвук и термодинамические свойства вещества. 2008. № 34-35. С. 159-171.
20. 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.
21. 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.
22. Рыков В.А. Термодинамические свойства R23 на линии насыщения в диапазоне температур от 180 до 298 К // Вестник Международной академии холода. 2000. № 4.
23. Рыков В.А. Масштабное уравнение состояния, верно воспроизводящее метастабильную область // Инженерно-физический журнал. 1985. Т. 49. № 3. С. 506.
24. Рыков В.А. Метод расчета P – T –параметров границы устойчивости однородного состояния вещества // Журнал физической химии. 1985. Т. 59. № 8. С. 2070.
25. Рыков В.А. Масштабное уравнение состояния в P – T –переменных с учетом неасимптотических членов // Журнал физической химии. 1985. Т. 59. № 8. С. 2069.
26. 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.
27. 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.
28. Рыков В.А. Уравнение состояния в критической области, построенное в рамках метода нескольких «псевдоспинодальных» кривых // Журнал физической химии. 1985. Т. 59. № 10. С. 2605.
29. Рыков А.В., Кудрявцев Д.А., Рыков В.А. Метод расчета параметров масштабной функции свободной энергии // Научно-технический вестник Поволжья. 2013. № 5. С. 50–53.
30. Рыков С.В., Кудрявцева И.В., Рыков В.А. Асимметричное масштабное уравнение состояния аргона в переменных плотность–температура // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». 2008. № 2. С. 6–11.
31. Рыков С.В. Выбор структуры масштабных функций асимметричного уравнения состояния // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». 2009. № 2. С. 1–6.
32. Рыков В.А. Масштабное уравнение состояния в физических переменных // Теплофизика высоких температур. 1986. Т. 25. № 2. С. 345.

33. Кудрявцева И.В., Рыков А.В., Рыков В.А. Непараметрическое уравнение состояния скейлингового вида и метод псевдокритических точек // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». 2013. № 2. С. 4.

34. Rykov V.A. Method of constructing a single equation of state satisfying the requirements of the scaling hypothesis // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 1985. Т. 48. № 4. С. 476-481.

35. Кудрявцева И.В., Рыков А.В., Рыков С.В. Описание метастабильной области непараметрическими уравнениями состояния скейлингового вида // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». 2013. № 2. С. 6.

36. Кудрявцева И.В., Рыков С.В., Рыков В.А. Описание метастабильной области в рамках параметрического представления масштабной теории // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». 2013. № 2. С. 5.

37. Рыков А.В., Кудрявцева И.В., Рыков С.В. Непараметрическое масштабное уравнение состояния, не содержащее дифференциальных биномов // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». 2013. № 2. С. 7.

38. Рыков В.А. О гипотезе «псевдоспинодальной» кривой // Журнал физической химии. 1986. Т. 60. № 3.

39. Рыков А.В., Кудрявцева И.В., Рыков В.А. К вопросу описания термодинамической поверхности, включая критическую область, уравнениями состояния в физических переменных // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». 2013. № 1. С. 4.

40. Кудрявцева И.В., Рыков С.В., Рыков В.А. Непараметрическое уравнение состояния скейлингового вида и расчет равновесных свойств сверхкритических флюидов // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2013. № 2. С. 28.

41. Кудрявцева И.В., Рыков А.В., Рыков С.В. Анализ структуры непараметрического уравнения состояния скейлингового вида // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». 2013. № 2. С. 2

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

43. 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.

44. Рыков С.В. Метод построения асимметричного масштабного уравнения состояния в физических переменных // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий. Санкт-Петербург, 2009. – 198 с.

45. 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.

46. Рыков С.В., Кудрявцева И.В., Рыков А.В., Курова Л.В. Метод построения фундаментального уравнения состояния, учитывающего особенности критической области // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». 2013. № 1. С. 5.

47. Кудрявцева И.В., Рыков А.В., Рыков В.А. Метод расчета равновесных свойств сверхкритических флюидов, используемых в СКФ-технологиях // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2013. № 2. С. 29.

48. 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.

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

50. Носков А.Н., Петухов В.В. Изменение параметров состояния пара хладагента в элементарном рабочем процессе маслозаполненного холодильного винтового компрессора // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». 2007. № 1. С. 10–14.

51. Докукин В.Н., Емельянов А.Л., Носков А.Н. Результаты испытаний маслозаполненного винтового компрессора малой производительности в высокотемпературных режимах // Вестник Международной академии холода. 2009. № 1. С. 6–8.

52. Носков А.Н., Петухов В.В., Чернов Н.П. Результаты испытаний маслозаполненного винтового компрессора малой производительности // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». 2007. № 1. С. 15–18.

53. Носков А.Н., Зимков А.А. Расчет процесса сжатия маслозаполненного холодильного винтового компрессора // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». 2013. № 1. С. 3.

54. Носков А.Н., Зимков А.А. Расчет процесса всасывания маслозаполненного холодильного винтового компрессора // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». 2012. № 1. С. 2.

55. Бараненко А.В., Кириллов В.В., Сивачев А.Е. О выборе хладоносителя для систем косвенного охлаждения // Вестник Международной академии холода. 2010. № 2. С. 22–24.

56. Ховалыг Д., Бараненко А.В. Методы расчета градиента давления двухфазного потока при течи в малых каналах // Вестник Международной академии холода. 2012. № 1. С. 3–10.

57. Бараненко А.В., Кириллов В.В. Разработка хладоносителей на основе электролитных водно-пропиленгликолевых растворов // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». 2007. № 3. С. 38–41.

58. Цветков О.Б. Исследования теплофизических свойств холодильных агентов в Санкт-Петербургском государственном университете низкотемпературных и пищевых технологий // Вестник Международной академии холода. 2011. № 1. С. 8–9.

References

1. Aliev A.M., Radzhabov G.K., Stepanov G.V. Component composition of extract шишкоягод a juniper oblong, received by extraction by supercritical dioxide of carbon // *Sverhkriticheskie fljuidy: Teorija i praktika*. 2012. T. 7. № 3. p. 20–29.

2. Anisimov M.A. The cold and overcooled water as an unusual supercritical fluid // *Sverhkriticheskie fljuidy: Teorija i praktika*. 2012. T. 7. № 2. p. 19–37.

3. Rykov S.V., Samoletov V.A., Rykov V.A. Line of saturation of ammonia // *Vestnik Mezhdunarodnoj akademii holoda*. 2008. № 4. p. 20–21.

4. Lysenkov V.F., Popov P.V., Rykov V.A. The parametrical large-scale equations of a state for an asymptotic vicinity of a critical point. Reviews on heatphysical properties of substances // *TFC – M.: IVTAN*. 1992. № 1 (93). p. 3–80.

5. Kudrjavceva I.V., Kamockij V.I., Rykov S.V., Rykov V.A. Calculation of the line of phase balance of dioxide of carbon // *Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Serija «Processy i apparaty pishhevyh proizvodstv»*. 2013. № 2.

6. Rykov V.A. Definition of a "pseudospinodalny" curve on the basis of thermodynamic equalities $\partial T / \partial s_v = 0$ и $\partial v / \partial p_T = 0$ // *Zhurnal fizicheskoj himii*. 1985. T. 59. № 11. p. 2905.

7. Vladimirov B.P., Shvec Ju.F. Pressure of saturated steam of freon 218, 329 and azeotropy mix R116 and R23 // *Teplofiz. cv-va veshhestv i materialov. – M.: Izd-vo standartov*, 1989. Vyp. 28. p. 24–25.

8. Butkarev A. G., Rykov V. A., Rykov S. A. Effective use of the MS WORD editor for paperwork of large volume // Grant for independent work /; Federal'noe agentstvo po obrazovaniju, Sankt-Peterburgskij gos. un-t nizkotemperaturnyh i pishhevyh tehnologij. Sankt-Petersburg, 2007.

9. Brown I.A. Physical properties of perfluoropropane // J. Chem. Eng. Data. 1963. Vol. 8, № 11. P. 106–108.

10. 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. № 1. P. 38–43.

11. Mousa A.N., Kay W.B., Kreglewski A. The critical constant of binary mixtures of certain perfluoro-compounds with alkanes // J. Chem. Thermodynamics. 1972. № 4. P. 301–311.

12. Rykov V.A., Ustjuzhanin E.E., Popov P.V., Kudrjavceva I.V., Rykov S.V. R-218 freon. Density, enthalpy, entropy, isobaric and izokhronny thermal capacities, sound speed in the range of temperatures of 160 ... 470 K and pressure 0,001 ... 70 MPas. GSSSD 211-05. Dep. v FGUP "Standartinform" 08.12.2005 g., № 813-05 kk.

13. Ustjuzhanin E.E., Shishakov V.V., Abdulagatov I.M., Rykov V.A., Popov P.V. Pressure of saturation of technically important substances: models and calculations for critical area // Vestnik Moskovskogo jenergeticheskogo instituta. 2012. № 2. p. 34–43.

14. Rykov A.V., Kudrjavceva I.V., Rykov S.V. Equations of the line of saturation and elasticity of R218 freon // Vestnik Mezhdunarodnoj akademii holoda. 2013. № 4. p. 54–57.

15. Ustjuzhanin 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. N 8. P. 912–931.

16. Rykov S.V., Rjabova T.V. Calculation of the line of phase balance of ammonia in a MathCad package // Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Serija «Holodil'naja tehnika i kondicionirovanie». 2013. № 2.

17. Rykov A.V., Kudrjavceva I.V., Rykov S.V. The equation of the line of saturation satisfying to the modified rule of curvilinear diameter // Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Serija «Holodil'naja tehnika i kondicionirovanie». 2013. № 2.

18. Kudrjavceva I.V., Rykov A.V., Rykov V.A. The new equation for "seeming" warmth of steam formation // Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Serija «Processy i apparaty pishhevyh proizvodstv». 2013. № 2.

19. Ustjuzhanin E.E., Abdulagatov I.M., Popov P.V., Shishakov V.V., Rykov V.A. Skeylingovy models for the description of thermodynamic properties on a boundary curve: characteristics and criteria // Ul'trazvuk i termodinamicheskie svojstva veshhestva. 2008. № 34-35. p. 159-171.

20. Ustjuzhanin E.E., Shishakov V.V., Abdulagatov I.M., Popov P.V., Rykov V.A., Frenkel' M.L. Skeylingovy models for the description of thermodynamic properties on the saturation line: problems and some decisions // Sverhkriticheskie fljuidy: Teorija i praktika. 2012. T. 7. № 3. p. 30–55.

21. Kudrjavceva I.V., Rykov A.V., Rykov V.A. The modified equation of the line of saturation meeting requirements of the large-scale theory // Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Serija «Holodil'naja tehnika i kondicionirovanie». 2013. № 2. p. 3.

22. Rykov V.A. Thermodynamic R23 properties on the line of saturation in the range of temperatures from 180 to 298 To // Vestnik Mezhdunarodnoj akademii holoda. 2000. № 4.

23. Rykov V.A. The large-scale equation of a state which is truly reproducing metastable area // Inzhenerno-fizicheskij zhurnal. 1985. T. 49. № 3. p. 506.

24. Rykov V.A. Calculation method T-parameters of limit of stability of a uniform condition of substance // Zhurnal fizicheskoy himii. 1985. T. 59. № 8. p. 2070.

25. Rykov V.A. The large-scale equation of a state in \square T-variable taking into account not asymptotic members // Zhurnal fizicheskoy himii. 1985. T. 59. № 8. p. 2069.

26. Rykov V.A., Varfolomeeva G.B. Метод определения структурной формы свободной энергии, удовлетворяющей требованиям измеряющей гипотезы // *Journal of Engineering Physics*. 1985. Т. 48. № 3. p. 341–345.
27. Rykov V.A. Структура исключительных условий в свободной энергии, правильно воспроизводящей неасимптотические исправления к термодинамическим функциям // *Journal of Engineering Physics*. 1986. Т. 49. № 6. p. 1502–1508.
28. Rykov V.A. The state equation in critical area constructed within a method several "pseudospinodalnykh" of curves // *Zhurnal fizicheskoy himii*. 1985. Т. 59. № 10. p. 2605.
29. Rykov A.V., Kudrjavcev D.A., Rykov V.A. Method of calculation of parameters of large-scale function of free energy // *Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzh'ja*. 2013. № 5. p. 50–53.
30. Rykov S.V., Kudrjavceva I.V., Rykov V.A. The asymmetric large-scale equation of a condition of argon in variables density temperature // *Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Serija «Holodil'naja tehnika i kondicionirovanie»*. 2008. № 2. p. 6–11.
31. Rykov S.V. Choice of structure of large-scale functions of the asymmetric equation of a state // *Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Serija «Holodil'naja tehnika i kondicionirovanie»*. 2009. № 2. p. 1–6.
32. Rykov V.A. The large-scale equation of a state in physical variables. 1986. Т. 25. № 2. p. 345.
33. Kudrjavceva I.V., Rykov A.V., Rykov V.A. Nonparametric equation of a condition of a skeylingovy look and method of pseudo-critical points // *Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Serija «Holodil'naja tehnika i kondicionirovanie»*. 2013. № 2.
34. Rykov V.A. Method of constructing a single equation of state satisfying the requirements of the scaling hypothesis // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 1985. Т. 48. № 4. p. 476–481.
35. Kudrjavceva I.V., Rykov A.V., Rykov S.V. Description of metastable area nonparametric equations of a condition of a skeylingovy look // *Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Serija «Holodil'naja tehnika i kondicionirovanie»*. 2013. № 2.
36. Kudrjavceva I.V., Rykov S.V., Rykov V.A. The description of metastable area within parametrical submission of the large-scale theory // *Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Serija «Holodil'naja tehnika i kondicionirovanie»*. 2013. № 2.
37. Rykov A.V., Kudrjavceva I.V., Rykov S.V. The nonparametric large-scale equation of a state which isn't containing differential binomials // *Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Serija «Holodil'naja tehnika i kondicionirovanie»*. 2013. № 2.
38. Rykov V.A. About a hypothesis of a "pseudospinodalny" curve // *Zhurnal fizicheskoy himii*. 1986. Т. 60. № 3.
39. Rykov A.V., Kudrjavceva I.V., Rykov V.A. To a question of the description of a thermodynamic surface, including critical area, the state equations in physical variables // *Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Serija «Holodil'naja tehnika i kondicionirovanie»*. 2013. № 1. p. 4.
40. Kudrjavceva I.V., Rykov S.V., Rykov V.A. Nonparametric equation of a condition of a skeylingovy look and calculation of equilibrium properties of supercritical fluids // *Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Serija «Processy i apparaty pishhevyh proizvodstv»*. 2013. № 2.
41. Kudrjavceva I.V., Rykov A.V., Rykov S.V. Analysis of structure of the nonparametric equation of a condition of a skeylingovy look // *Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Serija «Holodil'naja tehnika i kondicionirovanie»*. 2013. № 2.
42. Rykov A.V., Kudrjavceva I.V., Rykov V.A. Asymmetric large-scale equation of a condition of R23 freon // *Vestnik Mezhdunarodnoj akademii holoda*. 2012. № 4. p. 26–28.
43. Rykov S.V., Bagautdinova A.Sh., Kudrjavceva I.V., Rykov V.A. Asymmetric large-scale equation of a state // *Vestnik Mezhdunarodnoj akademii holoda*. 2008. № 3. p. 30–32.

44. Rykov S.V. Method of creation of the asymmetric large-scale equation of a state in physical variables // Dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehniceskikh nauk / Sankt-Petersburgskij gosudarstvennyj universitet nizkotemperaturnyh i pishhevyh tehnologij. Sankt-Petersburg, 2009. – 198 p.
45. Rykov S.V., Kudrjavceva I.V., Demina L.Ju. The uniform equation of a state R717 considering features of critical area // *Vestnik Mezhdunarodnoj akademii holoda*. 2009. № 4. p. 29–32.
46. Rykov S.V., Kudrjavceva I.V., Rykov A.V., Kurova L.V. Method of creation of the fundamental equation of the state considering features of critical area // *Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Serija «Holodil'naja tehnika i kondicionirovanie»*. 2013. № 1.
47. Kudrjavceva I.V., Rykov A.V., Rykov V.A. Method of calculation of equilibrium properties of the supercritical fluids used in SKF-technologies // *Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Serija «Processy i apparaty pishhevyh proizvodstv»*. 2013. № 2.
48. Kozlov A.D., Lysenkov V.F., Popov P.V., Rykov V.A. Uniform not analytical equation of a condition of freon 218 // *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal*. 1992. T. 62. № 6. p. 840-847.
49. Kudrjavceva I.V. Asymmetric uniform equation of a condition of argon and R134a coolant // Dis. na soiskanie uch. st. kand. tehn. nauk. – SPb.: SPbGUNiPT, 2007, – 143 p.
50. Noskov A.N., Petuhov V.V. Change of parameters of a condition of steam of coolant in elementary working process of the maslozapolnenny refrigerating screw compressor // *Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Serija «Holodil'naja tehnika i kondicionirovanie»*. 2007. № 1.
51. Dokukin V.N., Emel'janov A.L., Noskov A.N. Results of tests of the maslozapolnenny screw compressor of small productivity in the high-temperature modes // *Vestnik Mezhdunarodnoj akademii holoda*. 2009. № 1. p. 6–8.
52. Noskov A.N., Petuhov V.V., Chernov N.P. Results of tests of the maslozapolnenny screw compressor of small productivity // *Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Serija «Holodil'naja tehnika i kondicionirovanie»*. 2007. № 1.
53. Noskov A.N., Zimkov A.A. Calculation of process of compression of the maslozapolnenny refrigerating screw compressor // *Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Serija «Holo-dil'naja tehnika i kondicionirovanie»*. 2013. № 1.
54. Noskov A.N., Zimkov A.A. Calculation of process of absorption of the maslozapolnenny refrigerating screw compressor // *Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Serija «Holo-dil'naja tehnika i kondicionirovanie»*. 2012. № 1.
55. Baranenko A.V., Kirillov V.V., Sivachev A.E. About a choice of a hladonositel for systems of indirect cooling // *Vestnik Mezhdunarodnoj akademii holoda*. 2010. № 2. p. 22–24.
56. Hovalyg D., Baranenko A.V. Methods of calculation of a gradient of pressure of a two-phase stream at a current in small channels // *Vestnik Mezhdunarodnoj akademii holoda*. 2012. № 1. p. 3–10.
57. Baranenko A.V., Kirillov V.V. Development of hladonositel on the basis of electrolytic water пропиленгликолевых solutions // *Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Serija «Holodil'naja tehnika i kondicionirovanie»*. 2007. № 3.
58. Cvetkov O.B. Researches of heatphysical properties of refrigerating agents in St. Petersburg State University of low-temperature and food technologies // *Vestnik Mezhdunarodnoj akademii holoda*. 2011. № 1. p. 8–9.