

УДК 536.71

Расчет паровой ветви линии насыщения перфторпропана в пакете mathcad

Рыков С.В., канд. физ.-мат. наук **Камоцкий В.И.**,
д-р техн. наук **Рыков В.А.** rikov.zav.kaf@irbt-itmo.ru
Университет ИТМО
Институт холода и биотехнологий
921002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

На основе уравнения Клапейрона-Клаузиуса и масштабной теории критических явлений разработано уравнение, описывающее паровую ветвь кривой сосуществования. На основе предложенного уравнения рассчитаны свойства перфторпропана в диапазоне температур от тройной точки до критической. Для оценки точности расчета по представленному уравнению приведены отклонения от экспериментальных данных и таблица с рассчитанными значениями температуры, плотности, «кажущейся» теплоты парообразования и давления на жидкостной ветви линии фазового равновесия. Полученное уравнение может найти применение при расчете циклов холодильной и криогенной техники, для оценки экономической и экологической эффективности новых холодильных агентов и сверхкритических флюидов. Отдельное внимание уделено достоинствам расчета плотности на жидкостной ветви линии фазового равновесия в пакете MathCAD. В статье приведены все необходимые данные для практического использования полученного уравнения.

Ключевые слова: линия фазового равновесия, пар, плотность, сверхкритический флюид, критические индексы.

Calculation of a steam branch of a line of saturation r218 in mathcad

Rykov S.V., Kamotskii V.I., Rykov V.A. rikov.zav.kaf@irbt-itmo.ru
University ITMO
Institute of Refrigeration and Biotechnologies
191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9

On the basis of Clausius-Clapeyron equation and the scale theory of critical phenomenas the equation featuring a steam branch of a curve of coexistence is developed. On the basis of the offered equation properties R218 in a gamut of temperatures from a threefold point to the critical are calculated. For an estimate of calculation accuracy on the presented equation diversions from experimental data and the table with the calculated values of temperature, densities, "apparent" warmth of steam formation and pressure on a liquid branch of a line of phase equilibrium are given. The gained equation can find application at calculation of cycles of refrigerating and cryogenic technics, for an estimate of economic and ecological efficiency of new refrigerating agents and supercritical fluids. The separate attention is given advantages of calculation of density on a liquid branch of a line of phase equilibrium in package MathCAD. In article all necessary data for practical use of the gained equation is cited.

Key words: line of phase equilibrium, steam, density, supercritical fluid, critical coefficients.

В современной пищевой, фармацевтической и косметической и других отраслях промышленности все большее применение находят технологии, основанные на использовании свойств сверхкритических флюидов (СКФ)[1]. Обусловлено это тем, что СКФ-технологии являются инновационными, превосходя по многим параметрам традиционные технологии. Уникальные свойства СКФ, особенно в области параметров состояния,

охватывающих область сильно развитых флуктуаций плотности [2], дают возможность обеспечить экологическую чистоту и существенно повысить экономичности показатели производства при использовании СКФ-технологий. Причем на основе СКФ-технологий в настоящее время реализуются процессы, осуществить которые в промышленных масштабах было затруднительно или практически невозможно. Для более интенсивного использования СКФ-технологий необходимо, наряду с другими проблемами, решить проблему расчета теплофизических свойств сверхкритических флюидов в широкой области параметров состояния, включая область сильно развитых флуктуаций плотности.

Важное значение для расчета характеристик СКФ, а, следовательно и оборудования, используемого при реализации СКФ-технологий, являются свойства СКФ на линии фазового равновесия. Рассмотрим метод, позволяющий рассчитать паровую ветвь линии насыщения от тройной точки до критической, с учетом требований масштабной теории критических явлений.

В основу метода положим уравнение Клапейрона-Клаузиуса, которое запишем в следующем виде:

$$\rho^- = \frac{T}{r^*} \cdot \frac{dp_s}{dT}, \quad (1)$$

где ρ^- – плотность на паровой ветви линии фазового равновесия; p_s – давление на линии упругости; T – абсолютная температура; r^* – «кажущаяся» теплота парообразования.

В соответствии с требованиями масштабной теории выберем выражение для «кажущейся» теплоты парообразования в соответствии с рекомендациями [3–5]:

$$r^* = \frac{p_c}{\rho_c} \left(a_1 + d_1 |\tau|^\beta + d_2 |\tau|^{\beta+\Delta} + d_3 |\tau|^{1-\alpha} + \sum_{i=4}^7 d_i \tau^{k_i} \right) \quad (2)$$

Давление на линии упругости в диапазоне температур от тройной точки до критической, как показано в [6–8], описывается зависимостью:

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

На основе (3) найдем выражений для производной dp_s / dT :

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

Здесь p_c – критическое давление; ρ_c – критическая плотность; $\tau = t - 1$; $t = T/T_c$ – приведенная температура; T_c – критическая температура; α – критический индекс изоэнтальной теплоемкости; β – критический индекс кривой сосуществования; Δ – неасимптотический критический индекс; a_i, d_i – постоянные коэффициенты; $k_i, s_i \in N$.

Задача вычисления коэффициентов уравнения паровой ветви линии фазового равновесия, интерпретация статистического сравнения с экспериментальными данными, графического анализа полученных результатов и расчета таблиц решена в математическом пакете MathCAD. Коэффициенты уравнения были найдены с помощью метода сингулярного разложения. Для нахождения сингулярных чисел матрицы плана на основе экспериментальной информации о поведении вещества на паровой ветви линии фазового равновесия были использованы встроенная в пакет MathCAD функция svd2 и программа, написанная авторами. После сравнения результатов, полученных обеими методами, авторы выбрали набор коэффициентов d_i уравнения (2), полученный вторым способом. Достоинством математического пакета MathCAD, несомненно, является то, что в нем удобно и наглядно реализована не только процедура линейной оптимизации функции, но и возможно решение задачи нелинейной оптимизации, например, по критическим индексам α и β .

Наглядность реализации и удобство программирования численных методов в пакете MathCAD позволяют успешно использовать его в учебном процессе при изучении разделов дисциплин, посвященных решению уравнений и систем уравнений, линейной и нелинейной оптимизации, дифференцированию и интегрированию. При использовании для этих целей других математических пакетов и алгоритмических языков, таких как, например, Фортран или Matlab, приходится уделять много времени на изучение особенностей ввода и вывода информации, особенностей программирования. Значительную часть аудиторных занятий приходится тратить на отладку кода программы. В случае пакета MathCAD для начала решения научных, практических и учебных задач достаточно провести несколько установочных часов посвященных основам работы. Также использование MathCAD в учебном процессе позволяет основное внимание уделять особенностям работы математических методов, а не языков программирования.

Основным недостатком пакета MathCAD является достаточно медленная работа с большими объемами информации. Например, поиск решения системы линейных алгебраических уравнений из нескольких тысяч уравнений с большим количеством неизвестных, к которому часто сводится задача поиска оптимума функции, может занимать несколько минут. Для решения таких задач удобнее использовать языки Фортран и Matlab. Использование пакета MathCAD для проверки результатов, полученных в Фортран или Matlab, позволяет контролировать согласованность формул и отсутствие ошибок в них при оставлении отчета [9].

В результате обработки экспериментальных и табличных данных о плотности ρ^- [10–12] были выбраны следующие значения параметров паровой ветви линии насыщения (1), (2): $T_c = 345,03$ К; $p_c = 26,7886$ бар; $\rho_c = 628$ кг/м³; $\alpha = 0,11$; $\beta = 325$; $\Delta = 0,5$; $k_4 = 2$; $k_5 = 3$; $k_6 = 5$; $k_7 = 7$; $d_1 = 16,25316816030627$; $d_2 = 7,643688088526538$; $d_3 = 6,9422345515772586$; $d_4 = 1,273615933106107$; $d_5 = 1,273615933106107$; $d_6 = -0,1337812059188208$; $d_7 = -0,11754540426216975$.

Коэффициенты линии упругости (3) были выбраны в соответствии с рекомендациями [13]: $s_4 = 2$; $s_5 = 3$; $s_6 = 5$; $s_7 = 7$; $a_0 = 10,2$; $a_1 = 7,925892495526347$; $a_2 = 58,21776118636697$; $a_3 = -32,79619921853542$; $a_4 = -33,41974070636767$; $a_5 = -15,80383754946752$; $a_6 = 0,2827064631835001$; $a_7 = 1,0400011352850764$.

Как следует из рис. 1, на котором представлены отклонения значений ρ^- , рассчитанных по уравнению (1) от данных [10–12] и рис. 2 с графиком паровой ветви кривой сосуществования перфторпропана, уравнение (3) передает экспериментальные $\rho^- - T_s$ – данные в с удовлетворительной точностью.

Результаты расчета плотности ρ^- , «кажущейся» теплоты парообразования и давления p_s по уравнениям (1), (2) и (3) представлены в табл. 1.

Рассмотренная в работе система уравнений (1)–(4) может быть использована для расчета теплофизических характеристик СКФ не только на линии насыщения [14–18], но и при разработке новых моделей как линии фазового равновесия [19–28], так и масштабных [24–39] и широкодиапазонных [40–47] уравнений состояния. Эти уравнения используются для расчета равновесных свойств СКФ и технически важных веществ, нашедших применение в низкотемпературных технологиях [48–56].

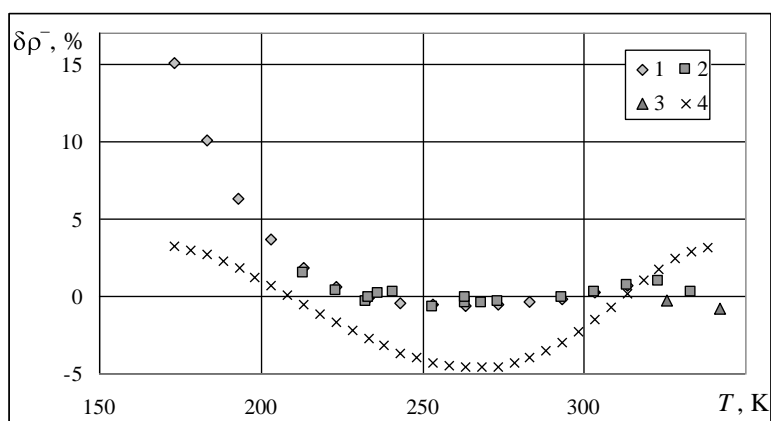


Рис. 1. Относительные отклонения плотности R218 на паровой ветви линии фазового равновесия, рассчитанных по уравнению (1), от данных: 1 – [10]; 2 – [11]; 3, 4 – [12].

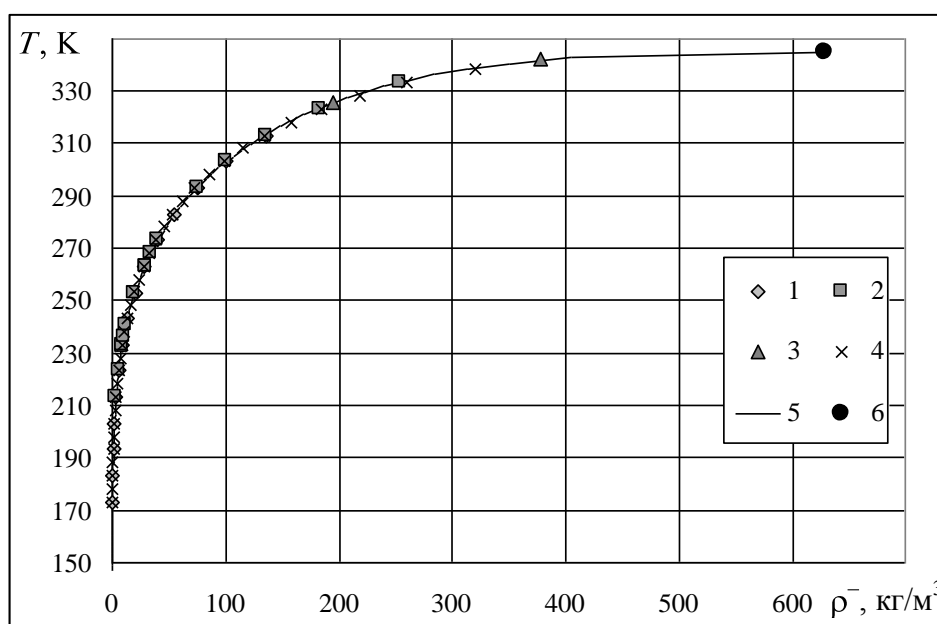


Рис. 2. Паровая ветвь линии фазового равновесия хладона R218:
1 – [10]; 2 – [11]; 3, 4 – [12]; 5 – расчет по уравнению (1);
6 – критическая точка.

Таблица 1

T, K	$\rho^-, \text{кг/м}^3$	$r^*, \text{кДж/кг}$	$p_s, \text{Бар}$
125	0,00034	140,5332	1,838e-5
130	0,00086	139,0618	4,8929e-5
135	0,00201	137,5852	1,1975e-4
140	0,0044	136,1029	2,7208e-4
145	0,00903	134,6146	5,7871e-4
150	0,01749	133,1199	1,1606e-3
155	0,03218	131,6184	2,2081e-3
160	0,05656	130,1097	4,007e-3
165	0,09539	128,5931	6,9682e-3
170	0,155	127,0683	0,0117
175	0,24355	125,5347	0,0188
180	0,3712	123,9916	0,0295
185	0,55033	122,4384	0,0449
190	0,79564	120,8743	0,0665
195	1,1243	119,2987	0,0961
200	1,55595	117,7107	0,136
205	2,11279	116,1094	0,1886
210	2,81962	114,4937	0,2567
215	3,70392	112,8625	0,3434
220	4,79594	111,2148	0,4523
225	6,12887	109,549	0,5872
230	7,73904	107,8638	0,7522
235	9,66624	106,1575	0,9517
240	11,95407	104,4282	1,1905
245	14,65038	102,6738	1,4736
250	17,80778	100,8921	1,8062
255	21,48433	99,0802	2,1941
260	25,7442	97,2351	2,643
265	30,65872	95,3533	3,159
270	36,30755	93,4306	3,7483
275	42,78037	91,4621	4,4176
280	50,17927	89,442	5,1734
285	58,6221	87,3632	6,0228
290	68,24765	85,2171	6,9728
295	79,22325	82,9931	8,0307
300	91,75676	80,6775	9,2042
305	106,11563	78,2527	10,501
310	122,65825	75,6949	11,9297
315	141,88841	72,9709	13,4993
320	164,55558	70,0321	15,2203
325	191,85743	66,8021	17,1052
330	225,90469	63,149	19,17
335	271,02693	58,8053	21,4372
340	339,09833	53,0396	23,9434
345	570,08584	37,1516	26,7702
345,03	628	33,8095	26,7886

Список литературы

1. Алиев А.М., Раджабов Г.К., Степанов Г.В. Компонентный состав экстракта шишкочагод 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. Кудрявцева И.В., Рыков В.А., Рыков С.В., Селина Е.Г., Курова Л.В. Метод расчета плотности и теплоты парообразования двуокси углерода // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2013. № 1.
4. 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. № 4. С. 30.
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. № 4. С. 31.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. Fang F., Ioffe J. Thermodynamic properties of perfluoropropane // J. Chem. Eng. Data. 1966. Vol. 11. № 3. P. 376–379.
11. Brown I.A. Physical properties of perfluoropropane // J. Chem. Eng. Data. 1963. Vol. 8. № 11. P. 106–108.
12. Рябушева Т.И. Исследование изохорной теплоемкости холодильных агентов: Дис. ... канд. техн. наук. Л., 1979. 189 с.
13. Рыков С.В., Самолетов В.А., Рыков В.А. Линия насыщения аммиака // Вестник Международной академии холода. 2008. № 4. С. 20–21.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
 17. 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.
 18. 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.
 19. Рыков В.А. Масштабное уравнение состояния, верно воспроизводящее метастабильную область // Инженерно-физический журнал. 1985. Т. 49. № 3. С. 506.
 20. Рыков В.А. Масштабное уравнение состояния, верно воспроизводящее метастабильную область // Инженерно-физический журнал. 1985. Т. 49. № 3. С. 506.
 21. Рыков В.А. Масштабное уравнение состояния в ρ – T -переменных с учетом неасимптотических членов // Журнал физической химии. 1985. Т. 59. № 8. С. 2069.
 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 and Thermophysics. 1985. T. 48. № 3. С. 341–345.
 23. Рыков В.А. Метод расчета ρ – T -параметров границы устойчивости однородного состояния вещества // Журнал физической химии. 1985. Т. 59. № 8. С. 2070.
 24. 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.
 25. 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.
 26. 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.
 27. Рыков В.А. Термодинамические свойства R23 на линии насыщения в диапазоне температур от 180 до 298 К // Вестник Международной академии холода. 2000. № 4.
 28. 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.
 29. 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.

30. 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.
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. 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.
33. Рыков В.А. Масштабное уравнение состояния в физических переменных // Теплофизика высоких температур. 1986. Т. 25. № 2. С. 345.
34. 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.
35. Рыков В.А. Уравнение состояния в критической области, построенное в рамках метода нескольких «псевдоспинодальных» кривых // Журнал физической химии. 1985. Т. 59. № 10. С. 2605.
36. 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.
37. 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.
38. 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.
39. 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.
40. Рыков В.А. О гипотезе «псевдоспинодальной» кривой // Журнал физической химии. 1986. Т. 60. № 3.
41. 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.
42. 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. № 3. С. 28.
43. Рыков С.В. Выбор структуры масштабных функций асимметричного уравнения состояния // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Холодильная техника и кондиционирование. 2009. № 2. С. 1–6.
44. 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

45. Рыков А.В., Кудрявцева И.В., Рыков В.А. Асимметричное масштабное уравнение состояния хладагента R23 // Вестник Международной академии холода. 2012. № 4. С. 26–28.
46. Рыков С.В., Багаутдинова А.Ш., Кудрявцева И.В., Рыков В.А. Ассимметричное масштабное уравнение состояния // Вестник Международной академии холода. 2008. № 3. С. 30–32.
47. Кудрявцева И.В., Рыков А.В., Рыков В.А., Рыков С.В. Единое неаналитическое уравнение состояния перфторпропана, удовлетворяющее масштабной теории критических явлений // Вестник Международной академии холода. 2013. № 3. С. 22–26.
48. Носков А.Н., Петухов В.В. Изменение параметров состояния пара хладагента в элементарном рабочем процессе маслозаполненного холодильного винтового компрессора // Холодильная техника и кондиционирование. 2007. № 1. С. 10–14.
49. 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.
50. Носков А.Н., Петухов В.В., Чернов Н.П. Результаты испытаний маслозаполненного винтового компрессора малой производительности // Холодильная техника и кондиционирование. 2007. № 1. С. 15–18.
51. 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.
52. Носков А.Н., Зимков А.А. Расчет процесса всасывания маслозаполненного холодильного винтового компрессора // Холодильная техника и кондиционирование. 2012. № 1. С. 2.
53. Бараненко А.В., Кириллов В.В., Сивачев А.Е. О выборе хладагента для систем косвенного охлаждения // Вестник Международной академии холода. 2010. № 2. С. 22–24.
54. Ховалыг Д., Бараненко А.В. Методы расчета градиента давления двухфазного потока при течении в малых каналах // Вестник Международной академии холода. 2012. № 1. С. 3–10.
55. Бараненко А.В., Кириллов В.В. Разработка хладагентов на основе электролитных водно-пропиленгликолевых растворов // Холодильная техника и кондиционирование. 2007. № 3. С. 38–41.
56. 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.