

УДК 536.71

Расчет жидкостной ветви линии насыщения R218 в пакете MATHCAD

канд. техн. наук **Рыков С.В.** togg1@mail.ru
канд. техн. наук **Кудрявцева И.В.** 165627@niuitmo.ru
Киселев С.В.
Университет ИТМО
Институт холода и биотехнологий
191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

Предложено уравнение жидкостной ветви линии фазового равновесия хладагента R218, которое удовлетворяет масштабной гипотезе, имеет рабочий диапазон от тройной точки до критической точки и задано в виде зависимости температуры на линии насыщения от плотности. Полученное уравнение может быть использовано в холодильной, криогенной технике. Вычисление коэффициентов уравнения производилось в математическом пакете MathCAD. В статье приведены все необходимые формулы и значения коэффициентов для использования уравнения. Проведен анализ первой производной уравнения жидкостной ветви линии фазового равновесия и показано, что ее поведение носит монотонный характер во всей рабочей области. Приведена таблица для жидкой фазы R218 в состоянии насыщения с рассчитанными значениями температуры, плотности и первой производной по плотности. Полученное уравнение может быть использовано в качестве опорной кривой при построении масштабных и широкодиапазонных уравнений состояния.

Ключевые слова: линия фазового равновесия, жидкость, плотность, температура, R218, линия насыщения, критические индексы.

Calculation of a liquid branch of the saturation line R218 in MATHCAD

Ph.D. **Rykov S.V.** togg1@mail.ru,
Ph.D. **Kudryavtseva I.V.** 165627@niuitmo.ru,
Kiselev S.V.
University ITMO
Institute of Refrigeration and Biotechnologies
9, Lomonosov Street, St Petersburg, 191002

The equation of a liquid branch of a line of phase equilibrium R218 which satisfies to a scale hypothesis is offered, has a working range from a threefold point to a critical point and is set in the form of dependence of temperature on a line of saturation from density. The gained equation can be used in the refrigerating, cryogenic technics. Evaluation of coefficients of the equation was yielded in mathematical package MathCAD. In article all necessary formulas and values of coefficients for equation use are given. The anal-

ysis of the first derivative of the equation of a liquid branch of a line of phase equilibrium is carried out and is shown that its behaviour has the monotonous character in all working area. The table for liquid phase R218 in a state of saturation with the calculated values of temperature, density and the first derivative on density is given. The gained equation can be used as a basic curve at build-up of scale and wide-band equations of state.

Key words: line of phase equilibrium, liquid, density, temperature, R218.

При расчете циклов холодильных, криогенных установок, систем кондиционирования требуется информация о теплофизических свойствах вещества. Одной из важнейших характеристик при этом является плотность на линии насыщения. Обсуждению этого вопроса посвящено большое количество работ [1–12]. Принято находить форму уравнения для плотности ρ^+ на жидкостной ветви линии насыщения в виде зависимости $\rho^+(T)$ [1–12]. Это обусловлено тем, что в таком случае проще удовлетворить правилу криволинейного диаметра, согласно которому должно выполняться условие (см., например, [12]):

$$\frac{\rho^+ + \rho^-}{2} - \rho_c \sim A|\tau|^{1-\alpha}, \tag{1}$$

где ρ^- – плотность на паровой ветви линии насыщения; ρ_c – критическая плотность; α – критический индекс изохорной теплоемкости; $\tau = T/T_c - 1$; T – абсолютная температура; T_c – критическая температура.

Однако, при построении масштабных [12–21] и широкодиапазонных [22–26] уравнений состояния в физических переменных на основе метода псевдокритических точек [27, 28], в структуру уравнений входит температура на линии насыщения T_s , как функция плотности ρ , а также её производные $T'_s \rho$ и $T''_s \rho$. Поэтому в этом случае удобнее представлять $\rho^+ - T_s$ -данные в виде зависимости $T_s \rho^+$. При этом необходимо выбрать такую форму зависимости $T_s \rho^+$, которая удовлетворяла бы в условию (1).

Именно к такому типу зависимостей $T_s \rho^+$ относится выражение:

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

где x_0, c_i ($i=1,2,3,\dots$) – постоянные коэффициенты; $m_i \in N$; δ – критический индекс критической изотермы; β – критический индекс кривой сосуществования; Δ – попра-

вочный критический индекс, учитывающий следующее (неасимптотическое) приближение масштабной теории.

Критические индексы α , β и δ связаны между собой равенствами Гриффитса:

$$2 - \alpha = \beta\delta + \beta \text{ и } \gamma = \beta\delta - \beta, \quad (3)$$

где γ – критический индекс изотермической сжимаемости.

Для расчета коэффициентов уравнения (2) использовалась программа, разработанная в математическом пакете MathCAD [29–31]. Достоинством этого пакета является то, что формулы записываются в виде максимально приближенном к традиционной форме принятой в математике. Для примера на рис. 1 приведена функция, которая описывает зависимость температуры от давления на жидкостной ветви линии фазового равновесия (2). Еще одно несомненное достоинство этого пакета – наличие большого количество встроенных функций, которые позволяют производить численное интегрирование и дифференцирование, находить корни нелинейных уравнений, решать задачу нахождения оптимума функции и многие другие задачи. Это дает возможность оперативно проводить проверку расчетов и находить ошибки во введенных формулах. Результаты, полученные в пакете MathCAD, легко переносить в другие приложения для оформления отчетов [32].

В результате обработки экспериментальных и табличных данных [33–36] о плотности ρ^+ хладагента R218 были выбраны следующие значения параметров паровой ветви линии насыщения (1): $T_c = 345,03$ К; $\rho_c = 628$ кг/м³; $\alpha = 0,11$; $\beta = 0,325$; $\Delta = 0,5$; $n = 5$; $m_4 = 5$; $m_5 = 7$; $c_1 = -35,662041937428775$; $c_2 = 44,10449286040255$; $c_3 = -19,964143933279587$; $c_4 = 11,535785653381325$; $c_5 = -0,00903940809269258$. Значение критического индекса δ найдено на основе первого равенства Гриффитса (3): $\delta = 4,815$.

Значение параметра x_0 устанавливается из выражения:

$$x_0 = \left(\frac{a_1}{d_1} \right)^{1/\beta}, \quad (4)$$

и равно $x_0 = 0,109733421051126$. Коэффициенты a_1 и d_1 находятся из уравнения линии упругости [37] и паровой ветви линии фазового равновесия [38], соответственно. Заметим, что, в отсутствии информации о коэффициентах a_1 и d_1 , параметр x_0 включается в общую расчетную схему и его значение устанавливается на основе известной информации о $\rho^+ - T_s$ -данных.

Как следует из рис. 2, на котором представлены отклонения значений ρ^+ , рассчитанных по уравнению жидкостной ветви линии насыщения хладагента R218 (3), от данных [33–36], уравнение (2) передает $\rho^+ - T_s$ -данные от тройной точки до критической точки с удовлетворительной точностью. Об этом свидетельствует также то, что не только функция $T_s \rho$ является монотонной (рис. 3), но монотонными являются также и её производная:

$$\frac{dT_s}{d\rho} = \frac{T_c}{\rho_c} \left(-\frac{x_0}{\beta} |\Delta\rho|^{1/\beta-1} + \delta c_1 |\Delta\rho|^{\delta-1} + \frac{(1+\Delta)c_2}{\beta} |\Delta\rho|^{(1+\Delta-\beta)/\beta} + \left(\delta - \frac{\alpha}{\beta} \right) c_3 |\Delta\rho|^{(\gamma-\alpha)/\beta} + \sum_{i=4}^n m_i c_i \Delta\rho^{m_i-1} \right) \quad (5)$$

где $\Delta_1 = (1 + \Delta) / (1 + \Delta - \beta)$.

Монотонный характер поведения предложенной в работе функции $T_s \rho$ (табл. 1) и производной (5) имеет большое значение, особенно при построении уравнений состояния на основе свободной энергии Гельмгольца [39–44], структурно содержащей «обобщенную» масштабную переменную \tilde{x} , определяемую из равенства:

$$\tilde{x} = \tau / \tau_s, \quad (6)$$

где τ_s определяется через функцию $T_s \rho$ на основе равенства:

$$\frac{T_s \rho}{T_c} - 1 = -x_0 \tau_s. \quad (7)$$

Действительно, согласно (6), (7) и термодинамическим равенствам $p = \rho^2 \partial F / \partial \rho_T$ и $K_T = 1/V \partial V / \partial p_T$, в расчетные формулы для давления p , изотермической сжимаемости K_T , а также энтальпии, изобарной теплоемкости, скорости звука и ряда других термодинамических характеристик входят функция $T_s \rho$ (3) и производная $T'_s \rho$ (5). Следовательно, характер поведения зависимостей $T_s \rho$, $T'_s \rho$ и $T''_s \rho$ непосредственно влияет на точность описания равновесных свойств уравнениями состояния, структурно содержащими переменную \tilde{x} .

Таким образом, полученные в работе результаты могут быть использованы как при расчете параметров жидкостной ветви линии фазового равновесия, так и при построении

уравнений состояния, удовлетворяющих требованиям масштабной теории критических явлений. Также они могут найти применение при расчете термодинамических циклов холодильного и криогенного оборудования [45–53].

$$T_s(\rho) := T_c \cdot \left[1 - x_0 \cdot \left| \Delta\rho(\rho) \right|^{\frac{1}{\beta}} + c_1 \cdot \left| \Delta\rho(\rho) \right|^{\delta} + c_2 \cdot \left| \Delta\rho(\rho) \right|^{\frac{3}{2\beta}} + c_3 \cdot \left| \Delta\rho(\rho) \right|^{\frac{\delta-\alpha}{\beta}} + \sum_{i=4}^{m_3} \left(c_i \cdot \Delta\rho(\rho)^{s_{3i}} \right) \right]$$

Рис. 1. Вид уравнения жидкостной ветви линии фазового равновесия (2) в математическом пакете MathCAD.

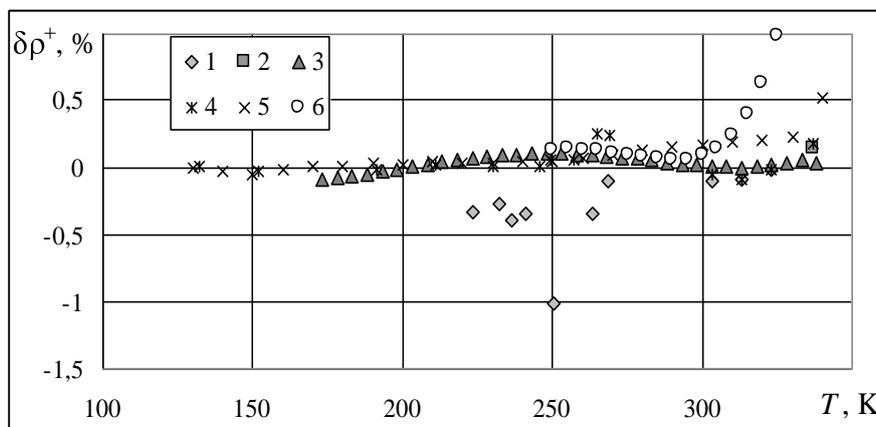


Рис. 2. Относительные отклонения плотности R218 на жидкостной ветви линии фазового равновесия, рассчитанных по уравнению (1), от данных: 1 – [33]; 2, 3, 4 – [34]; 5 – [35]; 6 – [36].

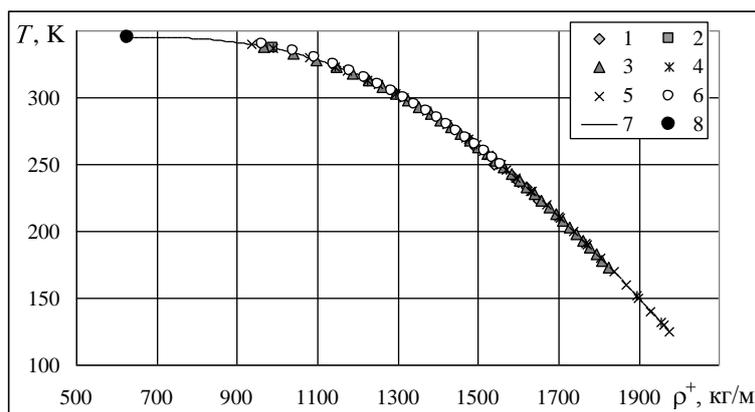


Рис. 3. Жидкостная ветвь линии фазового равновесия хладона R218: 1 – [33]; 2, 3, 4 – [34]; 5 – [35]; 6 – [36]; 7 – расчет по уравнению (1); 8 – критическая точка.

Таблица 1

T_s, K	$\rho^+, \text{кг/м}^3$	$dT_s/d\rho$
125	1975,0694	-0,33614
130	1960,1264	-0,33312
135	1945,0524	-0,33031
140	1929,8534	-0,32766
145	1914,5338	-0,32512
150	1899,0963	-0,32266
155	1883,5418	-0,32024
160	1867,8694	-0,31782
165	1852,0766	-0,31537
170	1836,1591	-0,31286
175	1820,1111	-0,31026
180	1803,925	-0,30754
185	1787,5915	-0,30468
190	1771,0997	-0,30166
195	1754,4371	-0,29846
200	1737,5893	-0,29506
205	1720,54	-0,29145
210	1703,2712	-0,2876
215	1685,7626	-0,28352
220	1667,9918	-0,27917
225	1649,9336	-0,27456
230	1631,5604	-0,26967
235	1612,8409	-0,2645
240	1593,7407	-0,25902
245	1574,2208	-0,25324
250	1554,2374	-0,24714
255	1533,7411	-0,24072
260	1512,6754	-0,23396
265	1490,9758	-0,22685
270	1468,5675	-0,21939
275	1445,3635	-0,21155
280	1421,2611	-0,20333
285	1396,1379	-0,1947
290	1369,8458	-0,18564
295	1342,2027	-0,17612
300	1312,9801	-0,16609
305	1281,8842	-0,15551

310	1248,5256	-0,14429
315	1212,368	-0,13231
320	1172,6344	-0,11941
325	1128,1181	-0,10529
330	1076,749	-0,08946
335	1014,3614	-0,07096
340	929,5909	-0,04734
345	684,9858	-0,00168
345,03	628	-0,00016

Литература

1. 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.
2. 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.
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. С. 25.
4. 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.
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. 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.
7. 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.

8. 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.

9. 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.

10. 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.

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

12. 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.

13. Рыков В.А. Масштабное уравнение состояния в p – T –переменных с учетом неасимптотических членов // Журнал физической химии. 1985. Т. 59. № 8. С. 2069.

14. Рыков В.А. Масштабное уравнение состояния, верно воспроизводящее метастабильную область // Инженерно-физический журнал. 1985. Т. 49. № 3. С. 506.

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

16. 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.

17. 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.

18. 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.

19. 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.

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

21. 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.

22. Рыков С.В., Кудрявцева И.В., Демина Л.Ю. Единое уравнение состояния R717, учитывающее особенности критической области // Вестник Международной академии холода. 2009. № 4. С. 29–32.25.

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

24. 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.

25. Кудрявцева И.В., Демина Л.Ю. О структуре фундаментального уравнения состояния, учитывающего асимметрию жидкости и пара // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Холодильная техника и кондиционирование. 2009. № 1. С. 35–38.

26. Kozlov A.D., Lysenkov V.F., Popov P.V., Rykov V.A. Single non-analytic equation of R218 chladon state // Инженерно-физический журнал. 1992. Т. 62. № 6. С. 840–847.

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

28. 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.

29. Кудрявцева И.В., Рыков В.А., Рыков С.А., Рыков С.В. Использование MathCAD в теории матриц: Метод. указания. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2011. – 50 с.

30. Рыков В.А., Рыков С.А., Кудрявцева И.В., Рыков С.В. Практические занятия в пакете MathCAD по исследованию систем линейных алгебраических уравнений: пособие. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2009. – 107 с.

31. Математика. Теория и примеры в MathCAD: Пособие / И.В. Кудрявцева, В.А. Рыков, А.С. Старков, С.А. Рыков, С.В. Рыков – СПб.: СПбГУНиПТ, 2011. – 92 с.

32. 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.

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

34. Рябушева Т.И. Исследование изохорной теплоемкости холодильных агентов: Дис. ... канд. техн. наук. Л., 1979. 189 с.

35. Барышев В.П. Комплексное исследование теплофизических свойств фреона-218 // Дис. ... канд. техн. наук. Л., 1981. 204 с.

36. Defibaugh D.R., Moldover M.R. Compressed and Saturated Liquid Densities for 18 Halogenated Organic Compounds // J. Chem. Eng. Data 1997. 42. 160–168.

37. Кудрявцев Д.А., Камоцкий В.И., Рыков В.А. Расчет линии упругости перфторпропана в пакете MathCAD // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2014. № 1.

38. Рыков С.В., Камоцкий В.И., Рыков В.А. Расчет паровой ветви линии насыщения перфторпропана в пакете MathCAD // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2014. № 1.

39. Рыков С.В. Выбор структуры масштабных функций асимметричного уравнения состояния // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Холодильная техника и кондиционирование. 2009. № 2. С. 1–6.

40. 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.

41. Рыков А.В., Кудрявцева И.В., Рыков С.В. Анализ экспериментальной информации о равновесных свойствах R218 на основе неаналитического уравнения состояния // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Холодильная техника и кондиционирование. 2013. № 1. С. 6.

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

43. 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.

44. Рыков В.А. Единое неаналитическое уравнение состояния газа и жидкости и таблицы термодинамических свойств аргона и хладагентов R134a, R218, R134a // Дис. на соискание уч.ст. докт. техн. наук. СПб.: СПбГУНиПТ, 2000. – 456 с.

45. 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.

46. 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.

47. 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.

48. 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.

49. 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.

50. 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.

51. 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.

52. 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.

53. 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.