

Метод расчета плотности и теплоты парообразования двуокиси углерода

Кудрявцева И.В., Рыков В.А., Рыков С.В., Селина Е.Г., Курова Л.В.

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

В статье рассмотрен инновационный способ расчета теплофизических свойств на линии насыщения. Апробация проведена на примере двуокиси углерода. Приведены термодинамические таблицы.

Ключевые слова: линия насыщения, плотность, теплота парообразования, двуокись углерода.

В пищевой и холодильной промышленности с каждым годом возрастает потребность в использовании двуокиси углерода. В данной работе предложена система взаимосогласованных уравнений линии насыщения и линии упругости CO_2 , которая позволяет рассчитывать плотность и теплоту парообразования с высокой точностью: по плотности – 0,01% и по теплоте парообразования – 0,3%.

Уравнение линии упругости и уравнения паровой и жидкостной ветвей линии насыщения выбираются таким образом, чтобы выполнялась система равенств (1):

$$\begin{cases} p_s(T_s(\rho^-)) = p_s(T_s(\rho^+)) \\ T_s(\rho^-) = T_s(\rho^+) \end{cases} \quad (1)$$

Как показано в работах [1–4] линия фазового равновесия от тройной точки до критической точки может быть описана уравнениями (2) – (4):

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

$$\frac{1}{\rho^-} = \frac{r^*(t)}{T(dp_n(t)/dt)}, \quad (3)$$

$$T_s(\rho) = T_c \left(1 - x_0 |\Delta\rho|^{1/\beta} + c_1 |\Delta\rho|^\delta + c_2 |\Delta\rho|^{\beta/(2\beta)} + c_3 |\Delta\rho|^{\delta-\alpha/\beta} + c_4 (\Delta\rho)^5\right), \quad (4)$$

где a_i, c_i – постоянные коэффициенты; p_c – критическое давление; T_c – критическая температура; $\tau = t - 1$; $t = T/T_c$ – относительная температура; $\Delta\rho = \rho/\rho_c$; ρ_c – критическая плотность α, β, δ – критические индексы изохорной теплоемкости, кривой сосуществования и критической изотермы, соответственно; Δ – неасимптотический критический индекс; $s(i)$ – массив из натуральных чисел; x_0 – значение масштабной переменной x на линии фазового равновесия в асимптотической окрестности критической точки.

В формуле (3) зависимость r^* от температуры имеет вид:

$$r^*(t) = \frac{p_c}{\rho_c} \left(d_0 + d_1 |\tau|^\beta + d_2 |\tau|^{\beta+\Delta} + d_3 |\tau|^{1-\alpha} + \sum_{i=4}^9 d_i \tau^{m(i)} \right), \quad (5)$$

где d_i – постоянные коэффициенты.

В асимптотической окрестности критической точки линия насыщения имеет вид

$$T_s = T_c \left(1 - x_0 \left| \Delta\rho^\pm \right|^{1/\beta} \right), \quad (6)$$

где $\Delta\rho^\pm = \rho^\pm / \rho_c - 1$, то уравнения (3) и (4) имеют один общий параметр x_0 , а уравнения (2) и (3) имеют общими параметрами коэффициенты линии упругости d_i . Причем коэффициенты a_1, d_0, d_1 и x_0 связаны зависимостями $x_0 = (a_1/d_1)^{1/\beta}$ и $d_0 = a_1$.

Теплоты парообразования рассчитывается через «кажущуюся теплоту парообразования» r^* (5) по формуле:

$$r(t) = r^*(t) \left(1 - \frac{\rho^-}{\rho^+} \right). \quad (7)$$

Коэффициенты уравнений (2) – (4) находились путем минимизации следующих функционалов:

$$\Phi_{P_n} = \sum_{j=1}^{N_1} \left[Q_{P_n,j} \left(p_{n,j}^{расч} - p_{s,j}^{эксн} \right) \right]^2 + \sum_{j=1}^{N_2} \left[Q_{P_n,j} \left(\left(d^2 p / dT^2 \right)_{n,j}^{расч} - \left(d^2 p / dT^2 \right)_{n,j}^{эксн} \right) \right]^2, \quad (8)$$

$$\Phi_{\rho^-} = \sum_{j=1}^{N_2} \left[Q_{\rho^-,j}^* \left(1/\rho_{j,расч}^- - 1/\rho_{j,эксн}^- \right) \right]^2 + \sum_{j=1}^{N_3} \left[Q_{r^*,j}^* \left(r_{j,расч}^* - r_{j,эксн}^* \right) \right]^2, \quad (9)$$

$$\Phi_{\rho^+} = \sum_{j=1}^{N_2} \left[Q_{\rho^-,j}^* \left(\rho_{j,расч}^+ - \rho_{j,эксн}^+ \right) \right]^2. \quad (10)$$

Предложенную методику можно использовать и для расчета линии фазового равновесия веществ, для которых нет экспериментальной информации о плотности и давлении в окрестности тройной точки.

В Таблице 1 приведены значения температуры, давления, кажущейся теплоты парообразования, теплоты парообразования на линии насыщения и плотности на жидкостной и паровой ветвях линии фазового равновесия, рассчитанные по уравнениям (2) – (4).

Таблица 1

T_s, K	$P_s, бар$	$\rho^-, кг/м^3$	$\rho^+, кг/м^3$	$r^*, кДж/кг$	$r, кДж/кг$
250	17,850	46,646	1045,99	302,81	289,31
252	19,007	49,802	1036,94	299,34	284,96
254	20,217	53,144	1027,73	295,81	280,52
256	21,483	56,684	1018,32	292,22	275,95
258	22,806	60,436	1008,71	288,57	271,28
260	24,187	64,415	998,88	284,84	266,47
262	25,629	68,636	988,82	281,03	261,52
264	27,133	73,120	978,51	277,15	256,44
266	28,700	77,887	967,93	273,17	251,19
268	30,333	82,961	957,04	269,09	245,76
270	32,033	88,369	945,83	264,91	240,16
272	33,802	94,144	934,26	260,62	234,36
274	35,642	100,32	922,30	256,19	228,32
276	37,554	106,94	909,90	251,62	222,05
278	39,542	114,07	897,02	246,90	215,51
280	41,607	121,75	883,58	242,00	208,65
282	43,752	130,06	869,51	236,90	201,46
284	45,978	139,11	854,73	231,57	193,88
286	48,290	148,99	839,10	225,98	185,85
288	50,688	159,88	822,48	220,08	177,30
290	53,178	171,97	804,65	213,80	168,11
292	55,761	185,56	785,33	207,07	158,14
294	58,443	201,06	764,10	199,76	147,20
296	61,227	219,12	740,29	191,68	134,94
298	64,121	240,86	712,78	182,49	120,83
300	67,131	268,54	679,31	171,55	103,73
301	68,682	286,12	658,82	164,99	93,336
302	70,268	308,15	633,87	157,14	80,746
303	71,891	338,99	600,12	146,80	63,877

303	71,891	338,99	600,12	146,80	63,877
304	73,556	406,19	530,02	126,56	29,568

Список литературы:

1. Рыков С.В., Самолетов В.А., Рыков В.А. Линия насыщения аммиака // Вестник Международной академии холода. – 2008. – № 4. – С. 20–21.
2. Кудрявцева И.В., Рыков В.А., Рыков С.В. Асимметричное единое уравнение состояния R134a // Вестник Международной академии холода. 2008 г. Выпуск № 2. С. 36–39.
3. Рыков С.В., Багаутдинова А.Ш., Кудрявцева И.В., Рыков В.А. Асимметричное масштабное уравнение состояния // Вестник Международной академии холода. 2008 г. Выпуск № 3. С. 30–32.
4. Кудрявцева И.В., Рыков А.В.. Линия насыщения R23 // Сборник тезисов докладов международной конференции с элементами научной школы для молодежи Инновационные разработки в области техники и физики низких температур. – М.: МГУИЭ, 2011.

Calculation method of density and heat of vaporization of carbon dioxide

Kudryavtseva I.V., Rykov V.A., Rykov S.V., Selina E.G.

*National Research University of Information Technologies,
Mechanics and Optics*

In article the innovative expedient of calculation thermalphysic properties on a saturation line is viewed. Approbation is spent on an example of carbon dioxide. Thermodynamic tables are given.

Key words: saturation line, density, heat of vaporization, carbon dioxide.