

РАСЧЁТ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КРИОПРОДУКТОВ НА ЛИНИИ НАСЫЩЕНИЯ С ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТЬЮ

Борзенко Е.И., Зайцев А.В., Кудашова Н.В.

valdurtera@rambler.ru

Санкт-Петербургский государственный университет
низкотемпературных и пищевых технологий

Представлен алгоритм и результаты вычисления теплофизических свойств вещества на линии насыщения. Применяя выбранные уравнения состояния в термодинамических соотношениях равновесия газовой и жидкой сред, получены результаты повышенной точности.

Ключевые слова: теплофизические свойства, фазовое равновесие, алгоритм, уравнение состояния.

Extra Accuracy Calculation of Thermal Properties of Substance in Saturated State

Borzenko E.I., Zaitsev A.V., Kudashova N.V.

S. Petersburg State University of Refrigeration and Food Engineering

Here is presented the algorithm and results of the thermal properties calculation of substance in saturated state. The extra accuracy results are received by using the gas law in thermodynamic equilibrium equation.

Keywords: thermal properties, phase balance, algorithm, gas law, calculation.

1. Рассмотрим эмпирическое уравнение состояния реального газа

$$pv = zRT, \quad (1)$$

где p – давление, v – удельный объём, z – коэффициент сжимаемости, R – газовая постоянная, T – температура. Перепишем уравнение (1) в приведённых координатах

$$\pi = \omega \tau z / z_{кр}, \quad \omega = \rho / \rho_{кр}, \quad \tau = T / T_{кр}.$$

Здесь π , ω , τ – приведённые давление, плотность, температура, а $p_{кр}$, $\rho_{кр}$, $T_{кр}$ – соответствующие критические параметры. Получим

$$\pi = \omega \tau / z_{кр}, \quad z_{кр} = \frac{p_{кр}}{RT_{кр} \rho_{кр}}. \quad (2)$$

Будем использовать уравнение состояния в следующем виде [1, 3]:

$$z = 1 + \sum_{i=1}^r \sum_{j=0}^{s_i} b_{ij} \frac{\omega^i}{\tau^j}. \quad (3)$$

2. Нас интересуют свойства вещества на линии насыщения (кипения). В книге [1] используются интерполяционные уравнения вида

$$\lg p_{нас} = \sum_{i=1}^n f_i \Theta_T^{(i-2)}, \quad (4)$$

приведённые в [2].

Мы хотим получить зависимости вида

$$p = p(T); \quad T = T(p) \quad (5)$$

на линии насыщения непосредственно из уравнения (1), используя основные термодинамические соотношения. Краткое описание алгоритма приведено в [3].

3. Из условий равновесия газовой и жидкой сред следует (см. [4])

$$\begin{cases} \tau' = \tau'' = \tau_s; \\ \pi' = \pi'' = \pi_s; \\ \varphi' = \varphi'' = \varphi_s, \end{cases} \quad (6)$$

где φ – химический потенциал. Одним штрихом отмечены параметры, относящиеся к жидкой среде, двумя штрихами – к газовой среде. Параметры с индексом s относятся к линии насыщения.

Если производится расчёт в зависимости от температуры, то из (6) вытекают уравнения для нахождения неизвестных плотностей жидкой и газовой сред

$$\begin{cases} \omega' - \omega'' + \sum_{i=1}^r \sum_{j=0}^{s_i} b_{ij} \frac{\omega'^{i+1} - \omega''^{i+1}}{\tau_s^j} = 0; \\ \ln \frac{\omega'}{\omega''} + \sum_{i=1}^r \sum_{j=0}^{s_i} \frac{i+1}{i} b_{ij} \frac{\omega'^i - \omega''^i}{\tau_s^j} = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Если производится расчёт в зависимости от давления, то получается система из трёх уравнений для поиска температуры и плотностей жидкой и газовой сред

$$\begin{cases} \pi_s - \frac{\omega' \tau_s}{z_{kp}} \left(1 + \sum_{i=1}^r \sum_{j=0}^{s_i} b_{ij} \omega'^{i+1} / \tau_s^j \right) = 0; \\ \pi_s - \frac{\omega'' \tau_s}{z_{kp}} \left(1 + \sum_{i=1}^r \sum_{j=0}^{s_i} b_{ij} \omega''^{i+1} / \tau_s^j \right) = 0; \\ \ln \frac{\omega'}{\omega''} + \sum_{i=1}^r \sum_{j=0}^{s_i} \frac{i+1}{i} b_{ij} \frac{\omega'^i - \omega''^i}{\tau_s^j} = 0. \end{cases} \quad (8)$$

4. В предложенном алгоритме системы (7) и (8) решаются стандартным методом Ньютона. Программа реализована на алгоритмическом языке Fortran-95. В программе присутствует специальный регулируемый параметр FEPS равный наибольшему из абсолютных значений правых частей уравнений систем (7) и (8). В нашей программе $FEPS=10^{-12}$.

В тестовых расчётах в качестве исследуемых веществ выбраны азот и кислород.

Для азота получены зависимости (5) в диапазонах $65 \text{ K} \leq T \leq 126 \text{ K}$ и $0,02 \text{ МПа} \leq p \leq 3,4 \text{ МПа}$. В этих диапазонах найдены значения энтропии и энтальпии для жидкой и газовой сред на линии насыщения.

В таблицах 1 и 2 приведены некоторые результаты расчёта теплофизических свойств азота. Представлено сравнение значений плотности жидкого и газообразного азота на линии насыщения в зависимости от температуры и давления.

Таблица 1

| T, К | Плотность жидкого азота ρ' , кг/м ³ | | | Плотность газообразного азота ρ'' , кг/м ³ | | |
|------|--|--------|---------|---|--------|---------|
| | [1] | [3] | Расчёт | [1] | [3] | Расчёт |
| 84 | 773,7 | 773,74 | 773,742 | 8,967 | 8,98 | 8,977 |
| 94 | 722,3 | 722,30 | 722,297 | 20,666 | 20,71 | 20,708 |
| 104 | 663,3 | 663,33 | 663,334 | 42,126 | 42,18 | 42,180 |
| 114 | 587,9 | 587,91 | 587,906 | 81,865 | 81,69 | 81,694 |
| 124 | 455,4 | 455,26 | 455,259 | 179,143 | 178,74 | 178,742 |

Таблица 2

| p, МПа | Плотность жидкого азота ρ' , кг/м ³ | | | Плотность газообразного азота ρ'' , кг/м ³ | | |
|--------|--|--------|---------|---|--------|---------|
| | [1] | [3] | Расчёт | [1] | [3] | Расчёт |
| 0,1 | 805,98 | 806,00 | 806,002 | 4,547 | 4,55 | 4,548 |
| 0,8 | 685,76 | 685,87 | 685,874 | 32,935 | 32,95 | 32,947 |
| 1,20 | 645,67 | 645,68 | 645,680 | 50,270 | 50,27 | 50,271 |
| 2,20 | 554,86 | 554,39 | 554,393 | 103,274 | 103,12 | 103,120 |
| 3,10 | 448,13 | 448,14 | 448,137 | 184,835 | 184,84 | 184,839 |

Для кислорода получены зависимости (5) в диапазонах $55 \text{ К} \leq T \leq 154 \text{ К}$ и $0,0002 \text{ МПа} \leq p \leq 5,0 \text{ МПа}$. В этих диапазонах найдены значения энтропии и энтальпии для жидкой и газовой сред на линии насыщения.

Таблицы 3 и 4, в которых приведены некоторые результаты расчёта теплофизических свойств кислорода, аналогичны таблицам 1 и 2. К сожалению по типографским причинам данные по жидкому кислороду на линии насыщения в книге [1] отсутствуют.

Таблица 3

| T, К | Плотность жидкого кислорода ρ' , кг/м ³ | | | Плотность газообразного кислорода ρ'' , кг/м ³ | | |
|------|--|---------|----------|---|---------|----------|
| | [1] | [3] | Расчёт | [1] | [3] | Расчёт |
| 75 | – | 1212,62 | 1212,616 | 0,751 | 0,755 | 0,7546 |
| 90 | – | 1140,50 | 1140,514 | 4,410 | 4,408 | 4,4078 |
| 110 | – | 1034,16 | 1034,160 | 21,366 | 21,366 | 21,3661 |
| 130 | – | 901,10 | 901,104 | 68,298 | 68,503 | 68,5026 |
| 150 | – | 674,81 | 674,808 | 212,521 | 212,521 | 212,5206 |

Таблица 4

| p , МПа | Плотность жидкого кислорода ρ' , кг/м ³ | | | Плотность газообразного кислорода ρ'' , кг/м ³ | | |
|-----------|--|---------|----------|---|---------|----------|
| | [1] | [3] | Расчёт | [1] | [3] | Расчёт |
| 0,02 | 1202,60 | 1202,78 | 1202,775 | 1,010 | 1,011 | 1,0108 |
| 0,08 | 1150,42 | 1150,45 | 1150,451 | 3,611 | 3,611 | 3,6113 |
| 1,60 | 914,35 | 914,63 | 914,631 | 62,313 | 62,350 | 62,3502 |
| 3,60 | 738,83 | 738,72 | 738,715 | 164,630 | 164,586 | 164,5855 |
| 5,00 | 551,30 | 551,30 | 551,299 | 318,247 | 318,247 | 318,2460 |

Полученные результаты согласуются со стандартными величинами вплоть до пятого знака.

Список литературы:

1. Акулов Л.А, Борзенко Е.И, Новотельнов В.Н., Зайцев А.В. Теплофизические свойства криопродуктов. – СПб.: Политехника, 2001. – 243 с.
2. Борзенко Е.И. Статика и динамика элементов криогенных систем. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1988. – 212 с.
3. Термодинамические свойства азота/Сычев В.В., Вассерман А.А., Козлов А.Д. и др. – М.: Изд-во стандартов, 1977. – 352 с.
4. Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е. Техническая термодинамика. – М.: Наука, 1979. – 512 с.