

УДК 536.7:621.564.2

А. А. Вассерман, А. В. Богданов, Д. В. Фоминский

Одесский государственный морской университет, ул. Мечникова, 34, 65029, г. Одесса, Украина

## ЕДИНЫЕ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ В ПОЛИНОМИАЛЬНОЙ ФОРМЕ ДЛЯ ХЛАДАГЕНТОВ R32 И R125

Составлены единые уравнения состояния для озононеразрушающих хладагентов R32 и R125 в полиномиальной форме в виде двойного разложения коэффициента сжимаемости по степеням плотности и температуры. Коэффициенты уравнений определены на основании экспериментальных данных о плотности и теплоемкостях  $c_v$  и  $c_p$  с учетом правила Максвелла. Уравнения описывают с точностью эксперимента термодинамические свойства R32 и R125 в интервалах температур 140...433 К и 180...480 К, соответственно, при давлениях до 70 МПа, включая и свойства на кривой насыщения.

**Ключевые слова:** дифторметан; пентафторэтан; плотность; сжимаемость; теплоемкость; уравнение состояния; R32; R125.

Unified equations of state for ozone-undestroying refrigerants R32 and R125 in polynomial form by explanation of compressibility factor as double power series of density and temperature was developed. Coefficients of equations were determined on the basis of experimental data on density and heat capacities  $c_v$  and  $c_p$  taking into account of Maxwell's rule. Equations describe with experimental precision thermodynamic properties of R32 and R125 at temperatures from 140 to 433 K and from 180 to 480 K, accordingly, at pressures up to 70 MPa including properties on the saturation curve.

**Key words:** difluoromethane; pentafluoroethane; density; compressibility factor; heat capacity; equation of state; R32; R125.

### I. ВВЕДЕНИЕ

Дифторметан (R32) и пентафторэтан (R125) являются весьма перспективными озононеразрушающими хладагентами [1]. Известны несколько единых уравнений состояния для указанных веществ, причем составленные недавно уравнения [2,3] хорошо описывают наиболее точные и новые экспериментальные данные о свойствах газа и жидкости. Эти уравнения представляют зависимость свободной энергии Гельмгольца от приведенных плотности и температуры и содержат экспоненту квадрата плотности в виде дополнительного делителя. Подобная форма уравнения, получившая наибольшее распространение среди зарубежных авторов, обеспечивает высокую точность аппроксимации экспериментальных данных, в первую очередь, за счет наличия экспоненциальных членов [4].

Отечественными исследователями на протяжении многих лет практикуется составление единых уравнений состояния в так называемой полиномиальной форме, представляющей коэффициент сжимаемости в виде двойного разложения по степеням плотности и температуры (без использования экспоненциальных членов). В этой форме составлено большое количество уравнений состояния для различных веществ. Поэтому с точки зрения унификации при включении информации о новых веществах в электронные базы данных о термодинамических свойствах для отечественных специалистов представляют интерес точные уравнения состояния в полиномиальной форме. Настоящая работа предприня-

та с целью получения единых уравнений состояния для R32 и R125 в указанной форме, близких по точности аналитического описания экспериментальных данных к уравнениям, приведенным в работе [3].

### II. УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ

В данной работе уравнения состояния представлены в форме:

$$z = \frac{P}{\rho RT} = 1 + \sum_{i=1}^{10} \sum_{j=0}^7 b_{ij} \frac{\omega^i}{\tau^j}, \quad (1)$$

где  $R$  - газовая постоянная вещества;  $\omega = \rho/\rho_c$  - приведенная плотность;  $\tau = T/T_c$  - приведенная температура; индексом  $c$  обозначены критические параметры.

Коэффициенты  $b_{ij}$  уравнений определялись следующим образом. Первоначально для каждого вещества составлялось уравнение состояния через свободную энергию Гельмгольца в виде, приведенном в [3], но без экспоненциальной части. Затем полученные коэффициенты приводились к форме (1) с учётом известного соотношения:

$$z = 1 + w \left( \frac{d\alpha}{d\omega} \right), \quad (2)$$

где  $\alpha = a(\omega, \tau)$  - реальная часть свободной энергии.

Описанный приём позволил при составлении уравнений включить в рамках линейной процедуры данные о теплоёмкости жидкости вдоль кривой насы-