

ВЯЗКОСТЬ СМЕСЕЙ ГАЗОВ И ЖИДКОСТЕЙ

И. И. Новиков

(Новосибирск)

Рассматривается один из возможных способов установления общих зависимостей для определения вязкости газовых смесей и смесей жидкостей по известным значениям вязкости составляющих смесь компонентов. Этим же путем могут быть получены аналогичные зависимости для теплопроводности смеси, скорости распространения звука в смесях и т. п.

Как известно из теории термодинамического подобия [1], значение коэффициента вязкости в газообразном или жидком состоянии может быть представлено в следующей форме:

$$\eta = \frac{\mu^{1/2} p_*^{2/3}}{R g^{1/2} T_*^{1/6}} \theta \left(\pi, \tau, \frac{c_0}{R} \right) \quad \left(\tau = \frac{T}{T_*}, \pi = \frac{p}{p_*} \right) \quad (1)$$

Здесь T_* и p_* — критические температура и давление данного вещества, μ — молекулярный вес его, τ и π — приведенные температура и давление, R — универсальная газовая постоянная, g — ускорение силы тяжести, c_0 — молекулярная теплоемкость в идеальном-газовом состоянии, т. е. при $p \rightarrow 0$. Функция θ одинакова для всех термодинамически подобных веществ, имеющих равную величину c_0 . Как известно, критическая температура и критическое давление связаны со значениями составляющих второго вариального коэффициента $b - a / RT$ следующими соотношениями:

$$T_* \approx \frac{a}{Rb}, \quad p_* \approx \frac{a}{b^2} \quad (2)$$

Подставив эти выражения в формулу (1), получим

$$\eta = \frac{\mu^{1/2} R^{2/3} a^{1/2}}{g^{1/2} b^{1/6}} \varphi \left(\frac{b^2}{a} p, \frac{Rb}{a} T, \frac{c_0}{R} \right) \quad (3)$$

Очевидно, что функция φ равна произведению функции θ на некоторое число, одинаковое для всех веществ.

Второй вариальный коэффициент бинарной смеси, равный

$$b_\Sigma - a_\Sigma / RT$$

может быть вычислен по известным значениям вторых вариальных коэффициентов веществ, составляющих смесь (при условии, что они не реагируют химически между собой) при помощи следующих зависимостей (см., например, [2]):

$$b_\Sigma = \sum b_j z_j, \quad a_\Sigma = \left(\sum \sqrt{a_j} z_j \right)^2 \quad (4)$$

Здесь z_j — молярная концентрация j -го компонента смеси.

Основываясь на соотношениях (3) и (4), можно найти искомую зависимость вязкости смеси от состава ее.

Рассмотрим для простоты смесь, состоящую из двух газов, и предположим, что критические температуры обоих газов незначительно отличаются одна от другой, т. е. $(b/a)_1 \approx (b/a)_2$. Допустим далее, что

a_1 и a_2 имеют сравнительно близкие значения. Тогда на основании (4) находим

$$\left(\frac{b}{a}\right)_\Sigma = \left(\frac{b}{a}\right)_1 = \left(\frac{b}{a}\right)_2$$

Отсюда следует также, что при одинаковых p и T величины $(b^2/a)p$ и $(Rb/a)T$ для каждого из компонентов смеси и всей смеси в целом будут иметь примерно одинаковые значения. Вязкость составляющих смесь газов и самой смеси на основании уравнения (3) составит

$$\begin{aligned}\eta_1 &= \frac{\mu_1^{1/2} R^{2/3} a_1^{1/2}}{g^{1/2} b_1^{7/6}} \Phi_1 \left(\frac{b_1^2}{a_1} p, \frac{Rb_1}{a_1} T, \frac{c_{01}}{R} \right) \\ \eta_2 &= \frac{\mu_2^{1/2} R^{2/3} a_2^{1/2}}{g^{1/2} b_2^{7/6}} \Phi_2 \left(\frac{b_2^2}{a_2} p, \frac{Rb_2}{a_2} T, \frac{c_{02}}{R} \right) \\ \eta_\Sigma &= \frac{\mu_\Sigma^{1/2} R^{2/3} a_\Sigma^{1/2}}{g^{1/2} b_\Sigma^{7/6}} \Phi_\Sigma \left(\frac{b_\Sigma^2}{a_\Sigma} p, \frac{Rb_\Sigma}{a_\Sigma} T, \frac{c_{0\Sigma}}{R} \right)\end{aligned}\quad (5)$$

Из выражения для η_1 находим

$$b_1 = \frac{R\mu_1^{3/4}}{g^{3/4}\eta_1^{3/2}} \left(\frac{a}{b}\right)_1^{3/4} \Phi_1^{3/2}$$

Аналогичные выражения получим также и для b_2, b_Σ . Подставим полученные таким образом значения b_1, b_2, b_Σ в первое равенство (4):

$$\frac{\mu_\Sigma^{3/4}}{\eta_\Sigma^{3/2}} \Phi_\Sigma = \frac{\mu_1^{3/4}}{\eta_1^{3/2}} \Phi_1 z_1 + \frac{\mu_2^{3/4}}{\eta_2^{3/2}} \Phi_2 z_2 \quad (6)$$

Уравнение (6) связывает вязкость смеси газов η_Σ при температуре T и давлении p с вязкостями η_1, η_2 составляющих смесь газов при той же температуре и давлении. Заметим, что это же уравнение будет справедливым и для смеси жидкостей. Кроме того, оно может быть распространено на смесь любого числа веществ.

В уравнение (6) входит функция

$$\Phi_j \left(\frac{b_j^2}{a_j} p, \frac{Rb_j}{a_j} T, \frac{c_{0j}}{R} \right)$$

аналитическое выражение которой вообще неизвестно. Если составляющие смесь газы или жидкости представляют собой термодинамически подобные вещества и притом имеют равные значения теплоемкостей c_0 (последнее будет иметь место в том случае, когда эти вещества в газобразном состоянии построены из молекул с равным числом атомов), то функции $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_\Sigma$ будут одинаковы. Так как, кроме того, согласно сделанному ранее предположению значения $(b^2/a)p$ и $(Rb/a)T$ составляющих смесь газов или жидкостей и у самой смеси при одинаковых температурах и давлениях одни и те же, то

$$\Phi_1 \left(\frac{b_1^2}{a_1} p, \frac{Rb_1}{a_1} T, \frac{c_{01}}{R} \right) = \Phi_2 \left(\frac{b_2^2}{a_2} p, \frac{Rb_2}{a_2} T, \frac{c_{02}}{R} \right) = \Phi_\Sigma \left(\frac{b_\Sigma^2}{a_\Sigma} p, \frac{Rb_\Sigma}{a_\Sigma} T, \frac{c_{0\Sigma}}{R} \right)$$

Поэтому

$$\frac{\mu_\Sigma^{3/4}}{\eta_\Sigma^{3/2}} = \sum \frac{\mu_j^{3/4}}{\eta_j^{3/2}} z_j$$

Или, так как $\mu_\Sigma = \sum \mu_j z_j$, то

$$\frac{1}{\eta_\Sigma^{3/2}} = \sum \frac{1}{\eta_j^{3/2}} \left(\frac{\mu_j}{\sum \mu_j z_j} \right)^{3/4} z_j \quad (7)$$

Уравнение (7) получено для смесей термодинамически подобных веществ, имеющих незначительно отличающиеся значения составляющей a второго вариального коэффициента (называемой вандерваальсовской константой a), а также близкие значения критической температуры T_* .

Таблица

Вязкость смеси сжиженных газов

Состав смеси	Температура, T °K	Вязкость, η 10^5 CGS			
		составляющих		смеси	
				измеренная	по ур. (7)
20 % O_2 + 80 % N_2	68.5	O_2	N_2		
	77.0	425.5	223	248	247
60 % O_2 + 40 % N_2	68.5	307.5	161	176	178
	77.0	425.5	223	352	310
27.2 % CH_4 + 72.8 % N_2	68.5	307.5	161	228	224
	97	CH_4	N_2		
50.6 % CH_4 + 49.4 % N_2	124	169.1	100	114.5	115
	97	93.4	62.7	72.6	69.3
76 % CH_4 + 24 % N_2	124	169.1	100	125.4	125.7
	97	93.4	62.7	82.2	75.4
36.2 % C_6H_6 + 63.8 % CCl_4	124	169.1	100	154.9	145
		93.4	62.7	87.3	83.5
80.5 % C_6H_6 + 19.5 % CCl_4	60	C_6H_6	CCl_4		
		3.89	5.84	5.03	5.0
	60	3.89	5.84	4.23	4.2

Примером смесей, удовлетворяющих этим условиям, являются, например:

1) смесь кислорода O_2 и азота N_2

$$\frac{T_*\{O_2\}}{T_*\{N_2\}} = 1.2, \quad \frac{a\{O_2\}}{a\{N_2\}} = 1.0, \quad \frac{s_*\{O_2\}}{s_*\{N_2\}} = 1.0 \quad \left(\varepsilon_* = \frac{RT_*}{p_*V_*} \right)$$

2) смесь метана CH_4 и азота N_2

$$\frac{T_*\{CH_4\}}{T_*\{N_2\}} = 1.5, \quad \frac{a\{CH_4\}}{a\{N_2\}} = 1.5, \quad \frac{s_*\{CH_4\}}{s_*\{N_2\}} = 1$$

3) смесь бензола C_6H_6 и четыреххлористого углерода CCl_4

$$\frac{T_*\{C_6H_6\}}{T_*\{CCl_4\}} = 1.01, \quad \frac{a\{C_6H_6\}}{a\{CCl_4\}} = 0.96, \quad \frac{s_*\{C_6H_6\}}{s_*\{CCl_4\}} = 1.02$$

В таблице приводятся данные о вязкости смесей указанных сжиженных газов, измеренные на опыте [3,4] и вычисленные по уравнению (7) (под сжиженными газами разумеется состояние жидкой фазы на кривой насыщения; вследствие этого вязкость является функцией одной температуры). Из сравнения видно, что уравнение (7) обладает точностью, достаточной для всякого рода расчетов.

Поступила 10 V 1961

ЛИТЕРАТУРА

1. В у к а л о в и ч М. П., Н о в и к о в И. И. Техническая термодинамика. Госэнергоиздат, 1956, стр. 141—144.
2. Ф а у л е р Р., Г у г г е н г е й м Э. Статистическая термодинамика. ИИЛ, 1949, стр. 351—354.
3. Г а л к о в Г. П., Г е р ф С. Ф. Вязкость сжиженных чистых газов и их смесей. II. ЖТФ, 1941, т. XI, № 7.
4. Г а л к о в Г. П., Г е р ф С. Ф. Вязкость сжиженных чистых газов и их смесей. III. ЖТФ, 1941 т. XI, № 9.