

Л. А. РОТТ

## СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВУКА В СЖАТОМ ГАЗЕ

Как было показано ранее [1], для весьма широкого интервала давлений сильно сжатого газа данные  $P-V-T$  хорошо передаются уравнением:

$$\ln \frac{P - \frac{RT}{V}}{A} = C \frac{r_m - r}{T}, \quad (1)$$

где  $P$ —давление, атм.;  $V$ —объем см<sup>3</sup>/моль;  $T$ —температура;  $R$ —универсальная газовая постоянная ( $R=82,06 \frac{\text{см}^3 \cdot \text{атм.}}{\text{град} \cdot \text{моль}}$ );  $r = \sqrt[3]{V}$ ;  $A$ ,  $C$  и  $r_m$ —постоянные величины.

Уравнение (1) было проверено по экспериментальным данным [2] для сжимаемости азота и аммиака в интервале давлений от 3000 до 10 000 атм. при различных значениях температуры. Входящие в уравнение константы равны: для азота  $r_m=2,84$ ,  $C=1291$ ,  $A=13\,238$  и для аммиака  $r_m=2,65$ ,  $C=2596$ ,  $A=13630$ .

Плотность сильно сжатого газа становится настолько большой, что его отождествляют с жидкостью. Действительно, дальнейшая проверка показала, что уравнение (1) применимо также к жидкостям. Так, оно передает данные  $P-V-T$  для воды (имеются в работе [3]), если входящим в уравнение константам придать соответственно значения:  $r_m=2,38$ ;  $C=5420$ ,  $A=26\,700$ .

Уравнение (1) было использовано для вычисления термодинамических функций [4] (летучести, коэффициента Джауля-Томсона, изменения теплосодержания, энтропии, внутренней энергии, температурного коэффициента расширения). Полученные формулы весьма удобны для практических физико-химических расчетов.

Представляет интерес вычисление скорости распространения звука в конденсированной системе (жидкость, сжатый газ), дающее возможность экспериментально проверить уравнение состояния.

При условии, что звуковая волна является адиабатическим движением, скорость распространения последней  $U$  определяется следующим выражением:

$$U = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_s}, \quad (2)$$

где  $\rho$ —плотность вещества.

Выражение (2) определяет скорость звука по адиабатической сжимаемости вещества. Последняя связана с изотермической сжимаемостью:

$$\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_s = \frac{c_p}{c_v} \left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_T. \quad (3)$$

Тогда скорость звука равна:

$$U = \sqrt{-\frac{c_p}{c_v} V^2 \left(\frac{\partial p}{\partial V}\right)_T}. \quad (4)$$

Подставляя выражение для производной:

$$\left(\frac{\partial p}{\partial V}\right)_T = -\frac{RT}{V^2} - \frac{ab}{3V^{5/3}} \exp\left\{-bV^{1/3}\right\} \quad (5)$$

$$a = A \exp\left\{\frac{cr_m}{T}\right\}, \quad b = \frac{c}{T},$$

получим:

$$U^2 = \frac{c_p}{\mu c_v} \left[ RT + \frac{cV^{4/3}}{3T} \left( P - \frac{RT}{V} \right) \right], \quad (6)$$

где  $\mu$ —молекулярный вес системы.

Первый член правой части (6) определяет квадрат скорости распространения звука в идеальном газе. Поэтому второй член можно интерпретировать как величину, характеризующую отклонение реальной системы от идеального газа.

Значения теплоемкостей вычисляются по следующим формулам:

$$c_v = c_v^0 + T \int_{V_0}^V \left(\frac{\partial^2 p}{\partial T^2}\right)_v dV = c_v^0 + 3 \left[ \Phi(p, V, T) - \Phi(p_0, V_0, T) \right], \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} \Phi(p, V, T) = & \left( P - \frac{RT}{V} \right) \left\{ \frac{2}{c} \left[ -V^{2/3} + kV^{1/3} + \frac{2}{b} \left( k - \frac{1}{b} \right) \right] + \right. \\ & \left. + \frac{1}{T} \left( V - kV^{2/3} - \frac{2kV^{1/3}}{b} - \frac{2k}{b^2} \right) \ln \frac{P - \frac{RT}{V}}{A} \right\} \\ & b = \frac{c}{T}, \quad k = r_m - \frac{2}{b} \end{aligned}$$

$c_v^0$ —теплоемкость при начальных значениях объема  $V_0$  и давления  $P_0$ .

$$C_p - C_v = -T \frac{\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v^2}{\left(\frac{\partial p}{\partial V}\right)_T} = \frac{\left[RT - V\left(p - \frac{RT}{V}\right) \ln \frac{p - \frac{RT}{V}}{A}\right]^2}{RT^2 + \frac{c}{3} V^{4/3} \left(p - \frac{RT}{V}\right)} \quad (8)$$

или

$$C_p - C_v = \alpha_k \left[ RT - V\left(p - \frac{RT}{V}\right) \ln \frac{p - \frac{RT}{V}}{A} \right], \quad (9)$$

где  $\alpha_k$  — температурный коэффициент расширения.

В табл. 1 и 2 приведены вычисленные значения теплоемкостей для азота при двух значениях температуры.

Таблица 1

T = 100°C					
P атм	V см <sup>3</sup> /моль	C <sub>v</sub> $\frac{\text{кал}}{\text{град. моль}}$	C <sub>p</sub>	C <sub>p</sub> - C <sub>v</sub>	$\frac{C_p}{C_v}$
3000	37,60	6,09	12,00	5,91	1,97
4000	34,33	6,59	11,66	5,17	1,77
5000	32,16	7,23	11,52	4,29	1,59
6000	30,37	7,79	11,46	3,67	1,47
7000	28,93	8,51	11,41	2,90	1,34
8000	27,82	9,13	11,33	2,20	1,24
9000	26,79	9,65	11,38	1,73	1,18
10000	25,84	10,15	11,41	1,26	1,12

Таблица 2

T = 50°C					
P атм	V см <sup>3</sup> /моль	C <sub>v</sub> $\frac{\text{кал}}{\text{град. моль}}$	C <sub>p</sub>	C <sub>p</sub> - C <sub>v</sub>	$\frac{C_p}{C_v}$
3000	35,29	6,22	11,84	5,62	1,90
4000	32,77	6,59	11,49	4,90	1,74
5000	30,66	7,40	11,57	4,17	1,56
6000	29,16	8,02	11,44	3,42	1,43
7000	27,99	8,61	11,29	2,68	1,31
8000	27,00	9,23	11,31	2,08	1,23
9000	26,11	9,76	11,33	1,57	1,16
10000	25,35	10,26	11,36	1,10	1,11

Таблица 3

P атм	U м/сек	
	T = 50°C	T = 100°C
3000	2200	2210
4000	2270	2220
5000	2210	2170
6000	2160	2110
7000	2100	2040
8000	2070	1970
9000	2050	1940
10000	2030	1910

Результаты вычисления скорости звука по формуле (6) для сильно сжатого азота приведены в табл. 3.

Значения  $C_v^0$  взяты из работы [5] и соответственно равны: при  $50^\circ\text{C}$  и  $P = 3000$  атм.  $C_v^0 = 6,22 \frac{\text{кал}}{\text{град. моль}}$ , при  $100^\circ\text{C}$  и  $P = 3000$  атм.  $C_v^0 = 6,09$ .

Следует отметить, что в отличие от идеального и слабо сжатого реального газа в сильно сжатом газе при постоянном давлении с ростом температуры скорость звука уменьшается. Указанную инверсию экспериментально наблюдал А. Лакам, исследуя скорость звука в различных веществах до давлений 1000—1200 атм [6].

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Л. А. Ротт. ЖФХ, 30, вып. 12, 1956.
- [2] Д. С. Циклис. ДАН, 79, 289, 1951; 91, 889, 1953.
- [3] P. W. Bridgman. Proc. Am. Acad. Arts Sci, 66, 185, 1931.
- [4] Л. А. Ротт. Сб. науч. трудов Белорусск. лесотехническ. ин-та, вып. 10, 1957; вып. 11, 1958.
- [5] П. Е. Большаков. ЖФХ, 18, вып. 3—4, 1944.
- [6] A. Lacom. I. Phys. et radium, 14, 351, 1953; 15, 830, 1954; 16, 72, 1955.