

О МЕТОДЕ РАСЧЕТА ЭНТРОПИИ ПО АКУСТИЧЕСКИМ ДАННЫМ

И. С. Радовский (Москва)

В работе [1] был предложен графоаналитический метод расчета энтропийных диаграмм по экспериментальным данным о скорости звука и зависимости p, V, T . Этот метод основан на двух известных термодинамических соотношениях для изоэнтропического процесса

$$\left(\frac{\partial V}{\partial p}\right)_S = -\frac{V^2}{a^2}, \quad \Delta V = \int_{p_1}^{p_2} \left(\frac{\partial V}{\partial p}\right)_S dp \quad (1)$$

Здесь a — скорость звука, ΔV — изменение удельного объема в изоэнтропическом процессе при изменении давления от p_1 до p_2 .

Из (1) видно, что при таком расчете исключается дифференцирование экспериментальных данных. Изменение величины $(\partial V/\partial p)_S$ по изоэнтропе в зависимости от давления заранее неизвестно; поэтому предлагалось вычислять интеграл в выражении для ΔV путем последовательных приближений с использованием двух вспомогательных графиков: изобар в координатах V, T и $(\partial V/\partial p)_S, T$. Подробно последовательность расчета изложена в работе [1].

Ниже делается попытка избавить метод от необходимости графических построений.

Экспериментальные данные о зависимости p, V, T могут быть представлены для каждой изобары в виде $V = f(T)$.

Аналогичным образом для каждой изобары может быть представлена зависимость производной $(\partial V/\partial p)_S$, вычисленной по формуле (1), от температуры

$$(\partial V/\partial p)_S = \varphi(T) \quad (2)$$

Интеграл в правой части второго выражения (1) для какой-либо изоэнтропы может быть вычислен по одной из формул приближенного интегрирования, например по формуле трапеций

$$\int_{p_1}^{p_2} \left(\frac{\partial V}{\partial p}\right)_S dp = \frac{1}{2} \left[\varphi(T) + \left(\frac{\partial V}{\partial p}\right)_{S1} \right] (p_2 - p_1) \quad (3)$$

Здесь $(\partial V/\partial p)_{S1}$ — величина производной при давлении p_1 , т. е. для первой точки изоэнтропы; $\varphi(T)$ — неизвестная пока величина производной при давлении p_2 , которая зависит от температуры в точке пересечения данной изоэнтропы с изобарой p_2 . Этой же температурой однозначно определяется и величина удельного объема в точке пересечения изоэнтропы с изобарой p_2 , поэтому, подставив $V = f(T)$ и (3) во второе соотношение (1), получим уравнение для искомой температуры

$$f(T) - V_1 = \frac{1}{2} \left[\varphi(T) + \left(\frac{\partial V}{\partial p}\right)_{S1} \right] (p_2 - p_1) \quad (4)$$

или

$$F(T) + A = 0 \quad (5)$$

Здесь A — свободный член уравнения, V_1 — величина удельного объема для первой точки изоэнтропы, т. е. при давлении p_1 .

Приведенные выше рассуждения справедливы и для любой другой изоэнтропы, следовательно, решив уравнение (5), можно получить единую формулу, по которой затем определяется температура для точек пересечения различных изоэнтроп с изобарой p_2 .

Функции $f(T)$, $\varphi(T)$, а следовательно и $F(T)$, обычно имеют вид полиномов, причем часто удается ограничиться полиномами второй или третьей степеней. В случае полинома второй степени решение уравнения (5) имеет следующий вид:

$$T = a - \sqrt{b + cx} \quad (6)$$

Здесь a, b, c — константы, которые вычисляются путем несложных арифметических действий над коэффициентами полиномов $f(T)$ и $\varphi(T)$; параметр x выражается через величины $(\partial V/\partial p)_{S1}$ и V_1 , т. е. он имеет различные значения для различных изоэнтроп.

Таким образом, подставляя в формулу (6) различные значения x , можно вычислить значения температуры по изобаре для всех заданных изоэнтроп. Соответствующие значения V и $(\partial V/\partial p)_S$ вычисляются по соотношениям $V = f(T)$ и (2) и используются затем при вычислении параметра x для следующей изобары. При наличии вычисленных значений V и $(\partial V/\partial p)_S$ хотя бы для двух изобар целесообразно применять при интегрировании формулу парабол как более точную, чем формула трапеций. В этом случае вместо выражения (3) получим

$$\int_{p_1}^{p_2} \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_S dp = \frac{1}{6} \left[\Phi(T) + \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_{S1} + 4 \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_{S2} \right] (p_2 - p_1) \quad (7)$$

В качестве исходных могут быть использованы данные об энтропии по линии насыщения.

Предлагаемый метод был применен для расчета энтропии аргона в диапазоне температур 120—270° К и давлений 10—75 бар. Для расчета использовались экспериментальные данные о скорости звука в аргоне [2-4] и плотности аргона [5]. Значения энтропии на кривой насыщения принимались по данным работы [6]. Результаты расчета приведены в таблице.

Энтропия аргона, Дж/кг °К

T, °К	p = 10	20	30	40	50	60	70	75
120	2870							
130	2938							
140		2780	2614					
150		2836	2704	2570				
160		2887	2764	2660	2557			
170		2935	2813	2723	2635	2556	2482	2450
180			2856	2769	2697	2624	2562	2534
190			2898	2813	2743	2681	2624	2598
200			2937	2852	2786	2728	2676	2649
210				2889	2822	2769	2719	2696
220				2925	2857	2805	2758	2735
230					2891	2837	2793	2772
240					2923	2868	2825	2805
250					2952	2898	2854	2835
260						2927	2882	2863
270						2955	2910	2889

Величины изменения энтропии по изобарам 40 и 70 бар сравнивались с соответствующими величинами по данным Мичельса [7]. Расхождение составляет 0.5—1%.

Поступила 10 XII 1965

ЛИТЕРАТУРА

- Новиков И. И., Трелин Ю. С. Новый метод построения термодинамических диаграмм рабочих веществ. Теплоэнергетика, 1962, № 2.
- Радовский И. С. Экспериментальное исследование скорости звука в аргоне на линии насыщения. ПМТФ, 1963, № 3.
- Радовский И. С. Исследование скорости звука в жидком и газообразном аргоне. ПМТФ, 1964, № 3.
- Van Itterbeek A., Dael W., Grevendonk W. Measurements on the velocity of sound in argon under high pressure. Physica, 1959, vol. 25, No. 7, p. 640.
- Michels A., Levelt J. M., De Graaff W. Compressibility isotherms of argon at temperatures between -25° C and -155° C, and at densities up to 640 amagat. Physica, 1958, vol. 24, No. 8, p. 659.
- Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. Госэнергоиздат, 1963.
- Michels A., Levelt J. M., Walkers G. J. Thermodynamic properties of argon at temperatures between 0° C and -140° C and at densities up to 640 amagat. Physica, 1958, vol. 24, No. 10, p. 769.