Горные стационарные установки и машины.
Записки Ленинградского горного института. Л., 1988

УДК 621.51

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУХА ПРИ ЕГО ДВИЖЕНИИ ПО ТРУБОПРОВОДУ

К.А.ДОЛГОВ

В одномерной задаче для определения параметров воздуха при его движении по трубопроводу может быть принята следующая система дифференциальных уравнений:

уравнение Д.Бернулли

$$\frac{dp}{\rho} + w\,dw + \frac{\lambda}{D}\,\frac{w^2}{2}\,dx = 0; \qquad (1)$$

уравнение сплошности

$$w\,d\rho + \rho\,dw = 0; \qquad (2)$$

уравнение состояния для идеального газа

$$\frac{dp}{p} - \frac{d\rho}{\rho} - \frac{dT}{T} = 0; \qquad (3)$$

первый закон термодинамики

$$dq \quad c_p\,dT + \frac{dp}{\rho} = 0; \qquad (4)$$

уравнение теплообмена

$$dq = \frac{\pi k_l}{M}\,(T_{0н} - T)\,dx + \frac{\lambda}{D}\,\frac{w^2}{2}\,dx, \qquad (5)$$

где p - абсолютное давление; w - скорость движения воздуха; T - абсолютная температура; ρ - плотность; q - удельное количество тепла; λ - коэффициент гидравлического трения; D - диаметр трубопровода; c_p - удельная теплоемкость при постоянном давлении; $T_{0н}$ - температура наружного воздуха; M - массовый расход воздуха; k_l - линейный коэффициент теплопередачи.

Значения величин λ, D, c_p, k_l, M, $T_{0н}$ принимаются постоянными.

Система уравнений (1)-(5) имеет пять неизвестных: p, w, T, ρ, q. При условии задания начальных значений $p = p_0$, $w = w_0$, $T = T_0$, $\rho = \rho_0$ $q = q_0$ решение этой системы может быть произведено численным интегрированием методом Рунге - Кутта. При этом система приводится к следующему виду

$$\frac{dp}{dx} = -A\,; \tag{6}$$

$$\frac{dT}{dx} = \frac{1}{c_p}\left(\frac{A}{\rho} + B\right); \tag{7}$$

$$\frac{d\rho}{dx} = \frac{A}{w^2} + \frac{\lambda\rho}{2D}\,; \tag{8}$$

$$\frac{dw}{dx} = -\left(\frac{A}{\rho w} + \frac{\lambda w}{2D}\right); \tag{9}$$

$$\frac{dq}{dx} = B, \tag{10}$$

где

$$A = \frac{w^2\left(\frac{\lambda c_p}{2D} + \frac{B}{T}\right)}{c_p\left(\frac{w^2}{p} - \frac{1}{\rho}\right) - \frac{w^2}{\rho T}}\,;$$

$$B = \frac{\pi k_e (T_{0н} - T)}{M} + \frac{\lambda}{D}\,\frac{w^2}{2}\,.$$

Начальные значения могут быть определены путем задания расхода воздуха, а также значений величин p_0 и T_0. Начальные значения величин w_0 и ρ_0 находят по формулам

$$M = \rho_0 w_0 F \qquad \text{и} \qquad p_0 = \rho_0 R T_0\,,$$

где F – площадь сечения трубопровода; R – газовая постоянная воздуха.

Проверка предлагаемой методики расчета параметров воздуха при движении его в магистральном воздухопроводе производилась на ЭВМ при следующих начальных условиях: $p_0 = 8{,}5\cdot10^5$ Па; $T_0 = 400$ К; $\rho_0 = 7{,}404$ кг/м^3; $w_0 = 11{,}61$ м/с; $q_0 = 0$. Постоянные величины имели следующие значения: $c_p = 1012$ Дж/(кг·К); $D = 0{,}4$ м; $k_e = 4$ Вт/(м·К); $\lambda = 0{,}021$; $T_{0н} = 248$ К. Длина воздухопровода принималась равной 800 м (для условий Кировского рудника ПО „Апатит").

Шаг при расчете параметров определялся ЭВМ из условия, чтобы получаемые значения температур в конце воздухопровода не отличались друг от друга более 0,01 К. Начальные условия сжатого воздуха соответствуют возможному режиму работы компрессоров на воздухопровод. Линейный коэффициент теплопередачи был получен по данным ВНИИГАЗ для наземной прокладки газопроводов в северных районах. Ниже приведены расчетные значения параметров воздуха в сечениях, отстоящих друг от друга на 100 м:

x, м	$p \cdot 10^{-5}$, Па	t, °С	ρ, кг/м³	w, м/с
0	8,50	123	7,40	11,6
100	8,48	111	7,70	11,2
200	8,45	96	7,98	10,8
300	8,43	83	8,26	10,4
400	8,40	71	8,51	10,1
500	8,38	61	8,76	9,8
600	8,36	51	8,98	9,6
700	8,34	43	9,20	9,3
800	8,32	35	9,39	9,2

Данные расчета показывают, что при движении воздуха в трубопроводе имеет место политропный процесс сжатия воздуха с отрицательным показателем политропы. Это является следствием резкого падения температуры воздуха при его движении по воздухопроводу.

Система дифференциальных уравнений (I)–(5) является наиболее общей для случая движения идеального газа. Решение ее дает возможность определять потери напора и скорости движения с учетом сжимаемости и теплообмена газа с окружающей средой.