

А. Е. СМОЛДЫРЕВ

## ТЕЧЕНИЕ СЖАТОГО ВОЗДУХА В НАКЛОННЫХ ТРУБОПРОВОДАХ

(Представлено академиком А. И. Некрасовым 19 IX 1951)

1. В рабочий трубопровод пневматических транспортных установок для перемещения дробленых горных пород для закладки выработанного пространства на угольных шахтах обычно включаются наклонные участки, достигающие длины порядка 100 м и больше. В общей трассе они составляют значительную протяженность, и работой этих участков часто определяется эффективность пневматического транспортирования (1).

При уточненном расчете рабочих трубопроводов важно знать скорость перемещаемых материалов по длине наклонной трубы, которая определяется скоростью движения в ней сжатого воздуха (2). Температуру воздуха по длине трубы при этом можно считать постоянной, равной температуре окружающей среды. Изотермическое течение сжатого воздуха в горизонтальном трубопроводе рассмотрено С. А. Христиановичем (3). В результате получено уравнение движения, из которого можно определить расход воздуха через круглую трубу с шероховатыми стенками. Это уравнение имеет вид:

$$\lambda \frac{s}{D} = \frac{F^2}{RTQ^2} (p_1^2 - p^2) + 2 \ln \frac{p}{p_1}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  — коэффициент сопротивления движению;  $s$  — расстояние вдоль трубопровода;  $D$  — диаметр трубы;  $F$  — площадь поперечного сечения трубы;  $R$  — газовая постоянная;  $T$  — абсолютная температура;  $Q$  — расход воздуха;  $p_1$  и  $p$  — давление, соответственно, в начале и в конце отрезка трубы.

Течение сжатого воздуха в наклонных трубопроводах не рассматривалось.

Необходимое для расчетов пневмотранспорта уравнение движения сжатого воздуха в наклонных трубопроводах может быть получено из условия постоянства расхода при изотермическом течении воздуха. Искомое дифференциальное уравнение движения воздуха находим из уравнения изменения количества движения. В общем случае наклонного трубопровода это уравнение имеет вид:

$$v_b \frac{dv_b}{ds} = - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{ds} + g \sin \alpha - \frac{\lambda}{2D} v_b^2, \quad (2)$$

где  $v_b$  — средняя скорость движения;  $\rho$  — плотность воздуха;  $g$  — ускорение силы тяжести;  $\alpha$  — угол наклона трубопровода.

К уравнению (1) добавляются условия постоянства расхода и температуры

$$Q = F\rho v_b = \text{const}, \quad T = \text{const}. \quad (3)$$

Замечая, что

$$\rho = \frac{p}{gRT} \quad \text{и} \quad v_b = \frac{RTQ}{pF}, \quad (4)$$

уравнение (2) можно записать в виде:

$$\frac{\lambda}{2D} ds = \frac{\left(1 - \frac{RTQ^2}{F^2 p^2}\right) dp}{p \frac{\lambda RT}{\sin \alpha} - \frac{RTQ}{F^2 p g}}. \quad (5)$$

Граничное условие уравнения (5) может быть взято в форме:  $s=0$   $p = p_1$ ; тогда интеграл уравнения (5) будет иметь вид:

$$s \frac{\lambda}{D} = \frac{1}{A} \ln \frac{p^2 A - B}{p_1^2 A - B} + \ln \frac{p^2 (p_1^2 A - B)}{p_1^2 (p^2 A - B)}, \quad (6)$$

где обозначено:  $A = \frac{2D}{\lambda RT} \sin \alpha$ ,  $B = \frac{RTQ^2}{gF^2}$ .

Уравнение движения сжатого воздуха в наклонном трубопроводе в случае подъема можно получить из (6), изменив знак при  $A$ . Если положить  $\alpha = 0$ , то в выражении (6) в первом слагаемом имеет место неопределенность. Раскрывая ее, получим уравнение (1).

Для пневматического транспорта характерны небольшие значения чисел Маха в начале рабочего трубопровода. В этом случае второе слагаемое в правой части уравнения (6) весьма мало по сравнению с первым. Пренебрегая этим слагаемым, получим следующие формулы для определения расхода: для опускающегося трубопровода

$$Q = \sqrt{\pi \frac{\exp(Dl) p_1^2 - p_2^2}{\exp(Dl) - 1}}; \quad (7)$$

для поднимающегося трубопровода

$$Q = \sqrt{\pi \frac{p_1^2 - \exp(Dl) p_2^2}{\exp(Dl) - 1}} \quad (8)$$

(здесь  $l$  — длина трубопровода;  $p_2$  — давление в конце трубопровода;  $\pi = \frac{2DgF^2}{\lambda R^2 T^2} \sin \alpha$ ,  $D = \frac{2}{RT} \sin \alpha$ );

для горизонтального трубопровода

$$Q = F \sqrt{\frac{p_1^2 - p_2^2}{RT\lambda/D}}. \quad (9)$$

2. В качестве примера определим длину трубопровода диаметром 0,15 м, расположенного под углом  $60^\circ$  к горизонтальной плоскости. По поднимающемуся трубопроводу проходит 2 кг сжатого воздуха в секунду, перепад давления в конечных точках составляет 2 ата. В результате выполненных подсчетов по уравнениям (1) и (6) длина трубопровода равна, соответственно, 500 и 460 м.

Таким образом, уравнение (6) дает возможность вести расчет течения сжатого воздуха по наклонным трубопроводам, а следовательно, учитывать их влияние на эффективность работы пневмотранспорта.

Институт горного дела  
Академии наук СССР

Поступило  
6 IX 1951

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

<sup>1</sup> А. О. Спиваковский, Конвейерные установки, ч. IV, 1935. <sup>2</sup> А. Е. Смолдырев, ДАН, 80, № 6 (1951). <sup>3</sup> С. А. Христианович, Прикладная газовая динамика, 1948.