

А. Е. СМОЛДЫРЕВ

## НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА НАСЫПНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО ТРУБАМ

(Представлено академиком А. М. Терпигоревым 19 I 1954)

1. Пневматический транспорт в зависимости от вида перемещаемых материалов и технологии работ осуществляется при существенно различных характеристиках несущей среды <sup>(1)</sup>.

До последнего времени не были установлены закономерности, вскрывающие общие связи и физическую сущность явления переноса различных насыпных материалов воздушным потоком по трубам. В первую очередь это касается основной задачи расчета пневмотранспорта — определения потерь давления. Для определения этих потерь при движении смеси материала и воздуха обычно принимается, что

$$\pi = 1 + \varphi \mu, \quad (1)$$

где  $\pi$  — отношение величины падения давления при движении смеси материала и воздуха к падению давления воздуха, протекающего в тех же количествах без материала;  $\mu$  — коэффициент смеси, т. е. отношение весового количества материала к весовому количеству воздуха в единицу времени;  $\varphi$  — тангенс угла наклона прямой в координатах  $\pi, \mu$ . Соотношение (1) получено на основании тщательных экспериментов с зерном <sup>(2)</sup>. Эта зависимость подтверждена для многих видов материалов (опилок, шлака, угольной мелочи и т. п.) <sup>(3)</sup>.

В последнее время проведены обстоятельные экспериментальные исследования по пневматическому транспортированию тяжелых кусковых материалов типа коренных горных пород <sup>(4,5)</sup>. Из этих опытов также следует, что при достаточно больших  $\mu$  потерянное давление при движении смеси материала и воздуха приблизительно пропорционально длине трубопровода и увеличивается вместе с увеличением  $\mu$ , а величина  $\varphi$  есть убывающая функция скорости воздуха.

Результаты значительного числа исследований по пневмотранспорту различных насыпных материалов являются чрезвычайно пестрыми в отношении выбора величины  $\varphi$ , а иногда противоречивыми; например, по данным <sup>(2)</sup> значение  $\varphi$  для пшеницы колеблется в пределах 0,3—0,6, а по обобщенным данным <sup>(3)</sup> рекомендуется принимать  $\varphi = 0,32$ ; в работе <sup>(6)</sup> для пневмотранспорта стружек берется  $\varphi = 1$ , а по данным, приведенным в <sup>(7)</sup>,  $\varphi = 0,4—0,6$ ; при пневматическом транспортировании тяжелых закладочных материалов, по данным <sup>(8)</sup>,  $\varphi = 0,8$ , а в опытах <sup>(4)</sup>  $\varphi = 0,05—0,15$  и т. п.

При достижении некоторой величины скорости воздушного потока, например для зерна более 25 м/сек, для коренных горных пород более 80 м/сек и т. п.,  $\varphi$  принимает практически постоянное значение, что еще более усложняет выбор значений этого параметра. Следовательно, величина  $\varphi$  является по сути дела эмпирическим коэффициентом, а ее физический смысл неясен. Кроме того, на наш

взгляд, уравнение (1) непригодно для обработки экспериментальных данных, так как оно исходит из двух совершенно различных случаев движения среды, чем в значительной степени объясняется разнообразие рекомендуемых значений  $\varphi$  для одних и тех же материалов.

В данной работе сделана попытка установить закономерности, вскрывающие общие связи сил сопротивления при пневматическом транспорте различных насыпных гранулированных материалов. В основу работы положены соображения о подобии на том основании, что этот метод дает возможность установить общую форму закона сопротивления. В результате, на основе обработки весьма обстоятельных экспериментальных данных по перемещению зерна и коренных горных пород, получены формулы для определения коэффициента сопротивления движению.

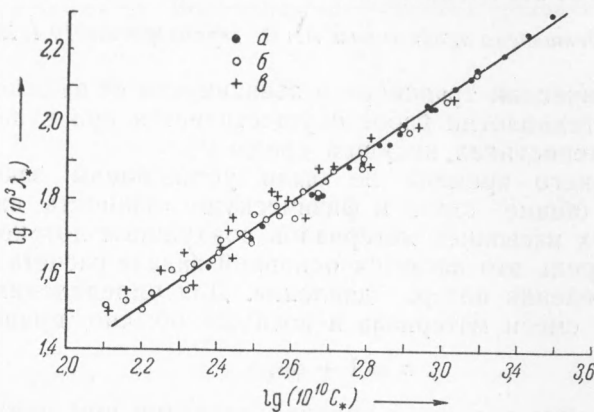


Рис. 1.  $a$  — по данным (2);  $b$  — по данным (4);  $v$  — по данным (5)

2. При пневматическом транспорте насыпных материалов по трубам имеет место непрерывное основное движение воздуха в трубопроводе и дополнительное перемещение материала. При этом температура воздуха по длине трубопровода практически остается постоянной, равной температуре окружающей среды.

Такое движение определяется следующей системой параметров:  $l$  — длина трубопровода;  $D$  — диаметр трубы;  $\rho_v$  — плотность воздушного потока;  $\Delta p_m$  — перепад давления при движении смеси материала и воздуха;  $v_v$  — скорость движения воздуха;  $T$  — его температура;  $R$  — газовая постоянная;  $\mu_0$  — коэффициент вязкости воздуха;  $v_k$  — скорость движения материала;  $d_k$  — максимальный поперечный размер частиц материала (или приведенный поперечный размер);  $\rho_m$  — плотность материала в насыпке;  $\mu$  — коэффициент смеси.

Найдем необходимое и достаточное условие механического и геометрического подобия для двух случаев пневматического транспорта насыпных материалов. В основу анализа механического подобия положим метод размерностей. Воспользуемся теоремой (9).

Если имеем систему из  $n$  независимых параметров, размерности которых выражены через размерности  $k$  основных единиц, и  $n \geq k$ , то из  $n$  основных параметров можно образовать  $n - k$  независимых безразмерных комбинаций; тогда необходимое и достаточное условие механического подобия двух явлений выразится равенством между собой этих независимых комбинаций.

Решая поставленную задачу, находим, что величины  $R$  и  $T$  в обычных условиях постоянны, а независимыми параметрами являются  $l$ ,  $D$ ,  $\mu_0$ ,  $d_k$ ,  $\mu$ , величины которых выражены через 3 единицы измерения.

Из этих величин можно составить две независимые безразмерные комбинации вида:  $l_1/D, l_2/D, \dots, l_n/D$ ;  $\mu d_*/Re = C_{*0}$ , где  $l_1, l_2, \dots, l_n$  — длины отдельных прямолинейных участков трубопровода;  $d_* = d_k/D$  (в случае разнородного по крупности материала можно принимать его средневзвешенный размер <sup>(1)</sup>);  $Re = \rho_v D v_v / \mu_0$  — число Рейнольдса.

Имеем один существенный критерий механического подобия.

Запишем его для удобства в форме, которая дает лучший разброс точек при обработке опытных данных:  $C_* = \mu \sqrt{d_*} / Re \sqrt{Re}$ .

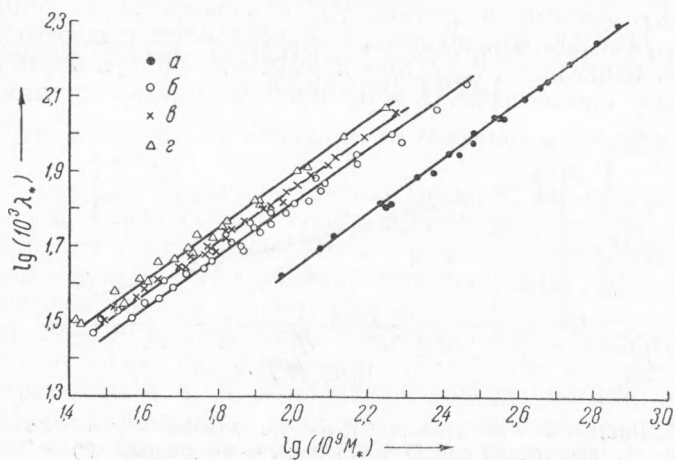


Рис. 2. а — по данным <sup>(2)</sup> для  $D = 92 \frac{1}{2}$  мм; б — по данным <sup>(4)</sup> для  $D = 150$  мм; в — по данным <sup>(4)</sup> для  $D = 175$  мм; г — по данным <sup>(4)</sup> для  $D = 200$  мм

3. Перепад давления при движении смеси материала и воздуха можно представить как сумму потерь давления за счет трения воздуха о стенки трубопровода и полезных потерь давления, вызываемых переносом находящегося в трубопроводе материала. Для пневмотранспорта насыпных материалов, на основании результатов опытов <sup>(2, 4)</sup> и следуя <sup>(10)</sup>, справедливо равенство:

$$\frac{\Delta p_m}{l} = \frac{\rho_v v_v^2}{2D} \lambda_* (C_*), \quad (2)$$

где  $\lambda_*$  — безразмерный коэффициент сопротивления, учитывающий оба вышеозначенных фактора, которым осредняются сопротивления движению воздуха в поперечном сечении трубопровода. Заметим, что на основании экспериментальных данных <sup>(2, 4, 5, 11)</sup> можно считать, что в области этих опытов для участков трубопровода с установившимся движением,  $\lambda_*$  не зависит от числа Маха. Для практического пользования законом сопротивления, выраженным в общей форме (2), нужно определить функцию  $\lambda_*(C_*)$ .

В работе <sup>(12)</sup> была сделана попытка найти средний, для данной длины трубопровода, коэффициент сопротивления  $\lambda_{пр}$ . Полученная для определения  $\lambda_{пр}$  эмпирическая формула основана на опытных данных, выполненных в производственных условиях, которые, очевидно, нельзя считать точными, расчеты по определению перепада давления в этом случае ведутся методом последовательных приближений.

А. Для определения функции  $\lambda_*(C_*)$  воспользуемся экспериментальными данными по перемещению зерна <sup>(2)</sup> и тяжелых кусковых материалов <sup>(4, 5)</sup>, в горизонтальном трубопроводе. Из рис. 1 находим,

что угловой коэффициент  $n = 0,7$ ; тогда коэффициент сопротивления движению определится по формуле:

$$\lambda_* = 9,4 \cdot 10^3 C_*^{0,7}. \quad (3)$$

Формула (3) справедлива для чисел  $C_*$  от  $1,6 \cdot 10^{-8}$  до  $1,8 \cdot 10^{-7}$ .

При обработке экспериментальных данных брались значения:  $15 \geq \mu \geq 2$  для легких сыпучих материалов и  $60 \geq \mu \geq 10$  для тяжелых кусковых материалов.

На рис. 2 представлены зависимости  $\lambda_*(\mu_* = C_*/\sqrt{d_*})$  для различных диаметров трубопровода.

Поскольку данные в работе (4), относящиеся к условиям  $D = 175$  мм и  $D = 200$  мм, получены теоретически с некоторыми допущениями, на наш взгляд мало обоснованными, то при обработке экспериментальных данных (рис. 1 и 3) они в расчет не принимались.

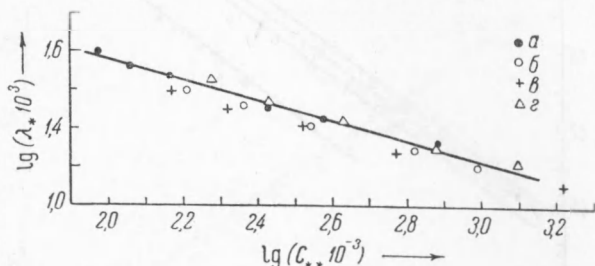


Рис. 3. а — по данным (2); б — по данным (4); в — по данным (4) для  $D = 175$  мм; з — по данным (6)

Б. При  $C_* < 1,6 \cdot 10^{-8}$ , что соответствует  $\varphi = \text{const}$ , имеем:  $\lambda_* = f(C_*, \varepsilon)$ , где  $\varepsilon = Q_v/Q_m$  — удельный расход воздуха на единицу объема материала. Составим из величин  $C_*$  и  $\varepsilon$  безразмерный параметр вида  $C_{**} = \mu d_* \varepsilon^2 \sqrt{\varepsilon}$ ; тогда, откладывая по осям координат вычисленные значения логарифмов  $\lambda_*$  и  $C_{**}$  (см. рис. 3), получим  $n = -0,25$ ; следовательно:

$$\lambda_* = 0,67 C_{**}^{-0,25}. \quad (4)$$

4. Из вышеизложенного следует что в основе сил сопротивления, проявляющихся при пневматическом транспорте материалов по трубам, лежат общие закономерности (2), (3) и (4), которые с известным приближением можно распространить на случай любых насыпных гранулированных материалов. При выполнении расчета пневматических транспортных и, в частности, закладочных установок определение потребного перепада давления можно вести по формулам газовой динамики, используя уравнения (3) и (4), которые дают ошибку в пределах точности экспериментов.

Институт горного дела  
Академии наук СССР

Поступило  
8 I 1954

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> А. Е. Смолдырев, Изв. АН СССР, ОТН, № 8 (1953). <sup>2</sup> И. Гастершгадт, Пневматический транспорт, 1927. <sup>3</sup> А. О. Спиваковский, Конвейерные установки, ч. 4, 1935. <sup>4</sup> G. Peter, Glückauf, 88, Н. 33/34 (1952). <sup>5</sup> И. Ф. Гончаревич, Некоторые вопросы расчета и повышения эффективности работы пневматических закладочных установок, Изд. АН СССР, 1953. <sup>6</sup> Г. Р. Карг, Пневматический транспорт, 1930. <sup>7</sup> З. Э. Орловский, Тр. Ростовск. инж.-строит. инст., 1952. <sup>8</sup> E. Deutschl, Glückauf, No. 2 и. 3 (1931). <sup>9</sup> Л. И. Седов, Методы подобия и размерности в механике, 1951. <sup>10</sup> С. А. Христианович, В. Г. Гальперин и др., Прикладная газовая динамика, 1948. <sup>11</sup> J. T. Whetton, P. H. Broadhurst, Trans. Inst. Min. Engrs., 3, No. 11 (1952). <sup>12</sup> А. Е. Смолдырев, ДАН, 82, № 3 (1952).