

**М. Н. Чальцев, канд. тех. наук, И. В. Скороход, канд. физ.-мат. наук,  
В. В. Фадеичев, Л. С. Орлова**

*Автомобильно-дорожный институт Донецкого национального технического университета*

**ВЛИЯНИЕ ДИАМЕТРА ТРУБЫ И МАССОВОГО РАСХОДА  
МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ НА КРИТИЧЕСКУЮ  
СКОРОСТЬ ВОЗДУХА И УДЕЛЬНЫЙ ПЕРЕПАД ДАВЛЕНИЯ ПРИ  
ПНЕВМОТРАНСПОРТЕ**

*Исследовано влияние диаметра трубы и массового расхода мелкодисперсных твердых материалов на критическую скорость движения воздуха и соответствующий ей удельный перепад давления при пневмотранспорте такого рода материалов по горизонтальным прямым трубам.*

**Ключевые слова:** пневмотранспорт; критическая скорость; удельный перепад давления; расход мелкодисперсного твердого материала.

*Досліджено вплив діаметра труби і масової витрати дрібнодисперсних твердих матеріалів на критичну швидкість руху повітря та відповідний їй питомий перепад тиску при пневмотранспорті такого роду матеріалів по горизонтальних прямих трубах.*

**Ключові слова:** пневмотранспорт; критична швидкість; питомий перепад тиску; витрата дрібнодисперсних твердих матеріалів.

*Influence of diameter of a pipe and the mass expense fine-dispersed firm materials for critical velocity of movement of air and specific pressure difference corresponding it is investigated at pneumotransport of such materials on horizontal direct pipes.*

**Key words:** pneumotransport; critical velocity; specific pressure difference; the expense fine-dispersed firm material.

Настоящая работа посвящена исследованию пневмотранспорта мелкодисперсных твердых материалов, средняя крупность которых не превышает 100 мкм. При этом речь идет о критическом, как наиболее энергетически выгодном, режиме пневмотранспортирования по горизонтальным прямым трубам. Цель работы – изучить влияние диаметра трубы и массового расхода мелкодисперсного твердого материала на основные параметры пневмотранспортирования – критическую скорость потока воздуха  $v_{кр}$  и соответствующий ей

удельный вес (на единице длины трубы) перепад давления  $\frac{\Delta p}{L}$ . Для достижения этой цели

используется современная научно обоснованная методика расчета вышеуказанных основных параметров пневмотранспортирования, разработанная Институтом гидромеханики НАН Украины совместно с Автомобильно-дорожным институтом Донецкого национального технического университета.

В зависимости от величины средней скорости потока воздуха возможны три характерных режима пневмотранспорта сыпучих материалов в горизонтальных трубах: режим стабильного перемещения всего твердого материала без заиливания нижней стенки трубы, режим нестабильного движения твердого материала при частичном или полном выпадении его в осадок и критический режим, разделяющий режимы стабильного и нестабильного пневмотранспорта.

Стабильное перемещение твердого материала наблюдается при достаточно больших средних скоростях потока воздуха и характеризуется тем, что твердые частицы транспортируются во взвешенном состоянии и практически равномерно распределяются по поперечному сечению трубы. В данном случае процесс взвешивания твердых частиц, обусловленный вертикальными турбулентными пульсациями скоростей потока, преобладает над силой тяжести. При меньших скоростях в большей мере проявляется сила тяжести и

поэтому наблюдается перераспределение твердого материала по сечению трубы: большая концентрация выявляется у нижней части сечения трубы, а меньшая – у верхней части этого сечения. При дальнейшем уменьшении скорости воздуха основная масса твердого материала скапливается у дна трубы и начинает нарушаться стабильность транспортирования. Наконец, при еще меньших скоростях образуется осадок на нижней стенке трубы.

Скорость движения воздуха, соответствующая началу нарушения стабильности транспортирования твердого материал, т. е. началу заилиения нижней стенки трубы, называется критической скоростью пневмотранспорта. Следует отметить, что при критической скорости удельный перепад давления является наименьшим в сравнении с удельными перепадами давления при скоростях больших или меньших критической, поэтому критический режим пневмотранспорта считается наиболее экономически выгодным.

Алгебраическое уравнение, описывающее критический режим пневмотранспорта мелкодисперсных материалов, имеет вид [1]:

$$\bar{\lambda} \left[ 1 + \left( \frac{\rho_T}{\rho} - 1 \right) \frac{\alpha}{1 + \alpha} \right] \lambda \frac{v_{кр}^2}{2gD} = \left( \frac{\rho_T}{\rho} - 1 \right) K; \quad (1)$$

$$\bar{\lambda} = \left[ 1 - 1 - \varphi \operatorname{th} 47,16\sqrt{\alpha} \right]; \quad (2)$$

$$\varphi = 0,127 + 1 + 1,016 \operatorname{Re}_T - 0,022 \operatorname{Re}_T; \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{G_T}{\rho_T F v_{кр}}; \quad (4)$$

$$K = \begin{cases} \beta_1 \alpha & \text{при } \alpha \leq 0,04; \\ 0,04\beta_1 + \alpha - 0,04 \beta_2 & \text{при } \alpha > 0,04. \end{cases}$$

В (1)–(6) приняты следующие обозначения:  $\rho_T$ ,  $\rho$  – плотность твердых частиц и воздуха;  $G_T$  – массовый расход твердого материала;  $v_{кр}$  – критическая скорость потока воздуха;  $\lambda$  – коэффициент гидравлического сопротивления;  $g$  – ускорение свободного падения;  $D$  – внутренний диаметр трубы;  $\operatorname{Re}_T$  – число Рейнольдса для твердых частиц:

$$\operatorname{Re}_T = \frac{dw}{\nu}, \quad (7)$$

где  $d$  и  $w$  – диаметр и скорость витания (гидравлическая крупность) твердых частиц;  $\nu$  – кинематическая вязкость воздуха. Коэффициенты  $\beta_1$  и  $\beta_2$  в (5) и (6) зависят от отношения диаметров  $\frac{d}{D}$ .

Уравнение (1) получено в предположении, что воздух – несжимаемая среда. Поскольку в действующих пневмотранспортных установках отношение перепада давлений на концах трубы  $\Delta p$  к давлению в начальном сечении трубы  $p_1$  обычно не превышает 0,05, поэтому в данном случае, согласно [2], сжимаемостью воздуха можно пренебречь.

Для определения степени достоверности уравнения (1) расчетные значения критической скорости  $v_{кр}$ , полученные из решения этого уравнения для заданных условий пневмотранспорта, сопоставлены с экспериментальными значениями. Для этого использованы опытные данные по измерению  $v_{кр}$  при пневмотранспорте цемента, золы, угольной пыли [3] и концентрата железной руды [4]. В результате установлено, что среднеквадратичное относительное отклонение расчетных значений  $v_{кр}$  от опытных не превышает 3 %.

Для установления характера влияния диаметра трубы и массового расхода твердого материала на вышеуказанные параметры, рассмотрен, в качестве примера, пневмотранспорт

измельченного концентрата железной руды средней крупностью  $d = 80$  мкм и плотностью  $\rho_T = 4500$  кг/м<sup>3</sup>. Критическая скорость воздуха, пневмотранспортирующего этот материал по горизонтальной трубе, определена решением уравнения (1). При этом диаметр трубы изменялся от 50 до 100 мм, а массовый расход твердого материала от 500 до 1500 кг/час. Плотность воздуха принималась равной 1,2 кг/м<sup>3</sup>, а его кинематическая вязкость  $\nu = 0,15 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с.

Уравнение (1) решалось графическим методом. Для заданных условий пневмотранспорта строились кривые зависимости функций  $F_1$  и  $F_2$ , представляющих собой левую и правую части уравнения (1) соответственно, от произвольно заданных значений  $v_{кр}$ . По точке пересечения этих кривых определялось искомое значение критической скорости.

Левая и правая части уравнения (1) физически представляют собой удельный (на единице длины трубы) перепад давлений, отнесенный к единице веса воздуха и соответствующий критическому режиму пневмотранспорта. Приняв в качестве выражения этого перепада давлений правую часть уравнения (1), можно написать:

$$\frac{1}{\rho g} \frac{\Delta p}{L} = \left( \frac{\rho_T}{\rho} - 1 \right) K, \quad (8)$$

где  $\Delta p$  – перепад давлений по длине расчетного участка трубы  $L$ .

Из (8) получаем

$$\frac{\Delta p}{L} = \rho g \left( \frac{\rho_T}{\rho} - 1 \right) K. \quad (9)$$

Расчетные значения удельного перепада давлений определялись для тех же условий пневмотранспорта, что и для критической скорости.

Параметрические, по массовому расходу твердого материала  $G_T$ , кривые зависимости величин  $v_{кр}$  и  $\frac{\Delta p}{L}$  от диаметра трубы  $D$  показаны на рис. 1 и 2 соответственно.

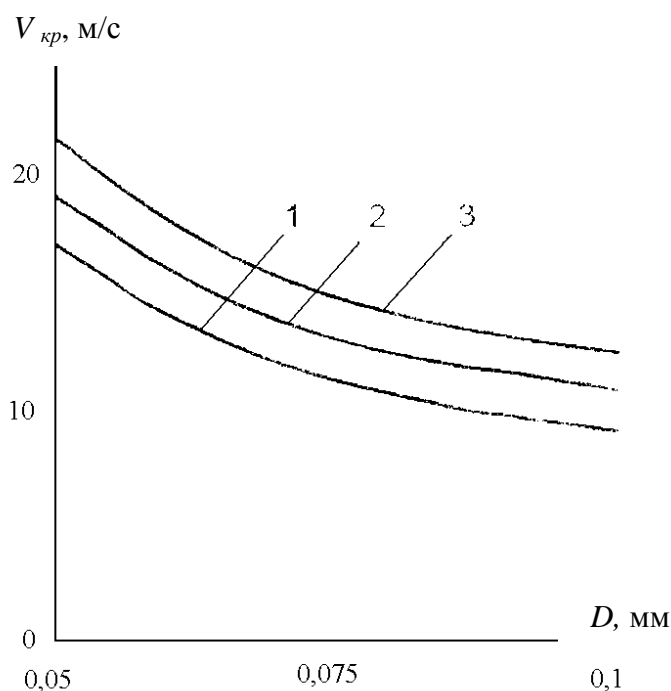


Рисунок 1 – Зависимость  $v_{кр}$  от  $D$  и  $G_T$ ;  $G_T$ , кг/час: 1 – 500; 2 – 1000; 3 – 1500

$$\frac{\Delta p}{L} \quad \text{Па/м}$$

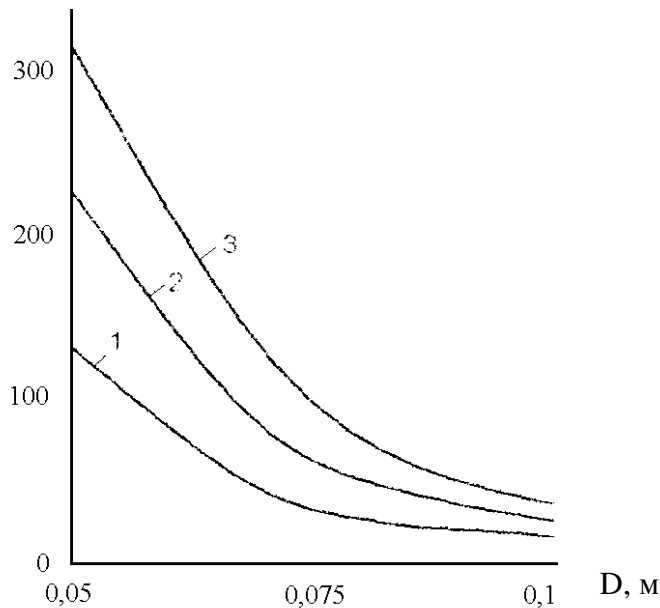


Рисунок 2 – Зависимость  $\frac{\Delta p}{L}$  от  $D$  и  $G_T$ ;  $G_T$ , кг/час: 1 – 500; 2 – 1000; 3 – 1500

На рис. 1 и 2 видно, что такие параметры, как критическая скорость воздуха и соответствующий ей удельный перепад давления уменьшаются с ростом диаметра трубы при заданном массовом расходе твердого материала и эти параметры возрастают с увеличением массового расхода твердого материала при заданном диаметре трубы.

Пользуясь вышеуказанными методами расчета параметров  $v_{кр}$  и  $\frac{\Delta p}{L}$ , можно построить кривые, аналогичные кривым на рис. 1 и 2, для любого мелкодисперсного твердого материала. Указанные кривые необходимы для проектирования и создания пневмотранспортных установок.

#### Список литературы

1. Криль С. И. Гидравлический расчет потоков газозвесей / С. И. Криль, М. Н. Чальцев // Промислова гідраліка і пневматика. – Вінниця: ВДАУ, 2005. – № 4 (10). – С. 26–29.
2. Альтшуль А. Д. Гидравлика и аэродинамика / А. Д. Альтшуль, П. Г. Киселев. – М.: Стройиздат, 1974. – 327 с.
3. Исследовать параметры пневмотранспортных потоков повышенной и средней концентрации // Отчет о НИР, Автомобильно-дорожный инст-т ДонНТУ. – Горловка. – 2002. – 128 с.
4. Кузнецов Ю. М. Теоретические основы, принципы конструирования и внедрение устройств для интенсификации процессов производства чугуна и стали путем вдувания в металл порошкообразных материалов: дисс. ... док. наук / Ю. М. Кузнецов. – Свердловск, 1987. – 321 с.