

УДК 621.4

## ПАДЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ ВОЗДУХА ПРИ ПНЕВОТРАНСПОРТИРОВАНИИ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ

**Крючков А.В., Лещенко А.А.**

*Филиал ФГБУ «48 Центральный научно-исследовательский институт»  
Министерства обороны Российской Федерации, Киров, e-mail: kryuchkov.57@bk.ru*

Получены уравнения для расчета изменения коэффициента сопротивления трубопровода и падения давления воздуха при установившемся режиме пневмотранспортирования твердых частиц. Уравнения получены из соотношения, в котором сумма сил, действующих на частицы и на стенку трубопровода со стороны потока воздуха, приравнена к произведению падения давления воздуха в трубопроводе на площадь его поперечного сечения. Учтена также зависимость силы, действующей на частицу в воздушном потоке, от относительной скорости частицы. Для случая пневмотранспортирования сферических частиц равного диаметра, в том числе и для стоковского режима обтекания частиц воздухом, выведены явные соотношения для коэффициента сопротивления трубопровода. В случае известного распределения частиц по скоростям получены уравнения для расчета коэффициента сопротивления трубопровода. Показано, что зависимость изменения коэффициента сопротивления и падения давления воздуха при пневмотранспортировании твердых частиц прямо пропорциональна расходу частиц через сечение трубопровода.

**Ключевые слова:** пневмотранспортирование, падение давления, коэффициент сопротивления

## DRAG OF AIR PRESSURE IN PNEUMATIC CONVEYING OF SOLID PARTICLES

**Kryuchkov A.V., Leschenko A.A.**

*Affiliation of the Federal state establishment «48 Central Research and Development Institute»  
Russian Federation Ministry of Defense, Kirov, e-mail: kryuchkov57@bk.ru*

Paper refers to the calculation of the air pressure drop in pneumatic conveying of solid particles. Displayed value to calculate the differential pressure changes due to the presence of aerosol particles in the flow. The equations for calculating the change ratio of resistance of the pipe and the pressure drop of air at steady state pneumatic transport solid particles obtained. The equations obtained from the ratio in which the sum of the forces acting on the particles and on the wall of the pipeline by air flow, equal to the product of the pressure drop in the pipeline in the area of its cross section. Also takes into account the dependence of the forces acting on particles in the air stream, from their relative velocities. For the case of pneumatic transport spherical particles of equal diameter, including for Stokowski mode around the particles of air, derived explicit expressions for the drag coefficient of the pipeline. In the case of known distribution of particle velocities obtained equations for the calculation of the coefficient of resistance of the pipeline. It is shown that the dependence of the drag coefficient of the pipe and the pressure drop of air at pneumatic transport solid particles is directly proportional to the flow of particles through the pipeline cross-section.

**Keywords:** pneumatic conveying, pressure drop, coefficient of the resistance

Транспортирование измельченных твердых материалов в трубопроводах при помощи потока воздуха – пневмотранспортирование – широко используется в промышленности.

Существующие методы расчета характеристик пневмотранспортных установок основаны, как правило, на эмпирических зависимостях, выявленных при экспериментальных исследованиях движения различных сыпучих материалов в различных условиях. Коэффициенты, входящие в эмпирические зависимости, у разных авторов различаются, и применение методов расчета ограничено теми диапазонами условий пневмотранспортирования, при которых проводились эксперименты. Экспериментальные исследования при других условиях движения сыпучих материалов требуют создания новых установок, их проведение сложно, длительно и дорогостояще. Практика создания пневмотранспортных систем

ставит задачу разработки методики их инженерного расчета. Такая методика должна быть пригодной для расчета систем при различных условиях пневмотранспортирования материалов. Использование в исследованиях процессов пневматического транспортирования методов математического моделирования позволяет уменьшить затраты на разработку методик расчета гидравлического сопротивления участков пневмотранспортных установок, в частности трубопроводов. Следует отметить, что еще недостаточно изучено турбулентное движение даже чистого воздуха в трубопроводах. Однако определение гидравлического сопротивления трубопроводов при движении чистого воздуха представляет собой все же менее сложную проблему, чем при транспортировании воздухом сыпучих материалов.

Падение давления воздуха в трубопроводе, в котором транспортируется сыпучий

материал, вычисляют по формуле Дарси – Вейсбаха [3]:

$$\Delta P = \lambda_T \frac{l}{D} \cdot \frac{\rho U^2}{2}, \quad (1)$$

где  $\Delta P$  – падение давления воздуха в трубопроводе,  $\lambda_T$  – коэффициент сопротивления единицы относительной длины трубопровода движению воздуха и взвешенных твердых частиц;  $l$ ,  $D$  – длина и внутренний гидравлический диаметр трубопровода;  $\rho$  – плотность воздуха;  $U$  – средняя скорость воздуха по сечению трубопровода, рассчитываемая как отношение объемного расхода воздуха к площади поперечного сечения трубопровода.

Для концентраций частиц достаточно больших, чтобы можно было пренебречь их влиянием на сглаживание пульсаций скорости воздуха («эффект Томса» [3]), экспериментально определено, что имеет место соотношение [2, 6]:

$$\lambda_T = \lambda_0 + \lambda_1, \quad (2)$$

где  $\lambda_0$  и  $\lambda_1$  – коэффициенты сопротивления единицы относительной длины трубопровода соответственно движению чистого воздуха и движению взвешенных твердых частиц. Величина  $\lambda_1$  пропорциональна массовому расходу частиц через сечение трубопровода  $m$  [2, 6].

Целью исследования явилось теоретическое определение зависимости  $\lambda_1$  от внутреннего диаметра трубопровода, расхода твердых частиц, скорости движения частиц, плотности, вязкости и скорости воздуха, а следовательно, и падения давления воздуха в горизонтальном трубопроводе при пневмотранспортировании твердых частиц в непрерывном режиме.

В качестве метода исследования использовано математическое моделирование взаимодействия частиц с воздушным потоком в трубопроводе. Рассмотрено установившееся пневмотранспортирование сыпучего материала – твердых частиц сферической формы – на прямом горизонтальном участ-

ке трубопровода. Предполагалось, что диаметры частиц превышают длину свободного пробега молекул дисперсионной среды (воздуха) и теплообмен между газозвесью и окружающей средой отсутствует. Поток рассматривается стационарным. Это значит, что скорость воздуха, его плотность, скорость частиц и их концентрация не меняются при переходе от одного сечения трубопровода к другому.

Пусть  $\Delta P_0$  – падение давления чистого воздуха (не несущего поток твердых частиц) при его движении со средней скоростью  $U$ . Из соотношений (1) и (2)

$$\Delta P_0 = \lambda_0 \frac{l}{D} \cdot \frac{\rho U^2}{2}. \quad (3)$$

В дальнейшем зависимость  $\lambda_0$  от скорости движения воздуха, его плотности и вязкости, от шероховатости стенок трубопровода и его внутреннего диаметра считается известной.

При движении воздуха, несущего твердые частицы, произведение падения давления воздуха и площади поперечного сечения равно сумме сил, действующих на воздух со стороны движущихся частиц, и силы трения, действующей на воздух со стороны стенок трубы. Последнюю силу вследствие малого количества частиц можно считать равной силе при движении чистого воздуха в трубопроводе. Из этого следует, что

$$(\Delta P - \Delta P_0)S = \sum_i F_i, \quad (4)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения трубопровода;  $F_i$  – величина проекции на ось трубопровода силы, действующей со стороны воздуха на  $i$ -ю частицу, а суммирование в правой части соотношения производится по всем частицам, находящимся на участке трубопровода длиной  $l$ . В случае, когда скорость частицы меньше скорости движения воздуха, величина  $F_i$  положительна, а когда больше – отрицательна.

Величина  $F_i$  для сферических частиц определяется следующим равенством:

$$F_i = \text{Проекция} \left( C(\text{Re}_i) \frac{\pi d_i^2}{4} \cdot \frac{\rho(\bar{U}_i - \bar{V}_i) |\bar{U}_i - \bar{V}_i|}{2} \right), \quad (5)$$

где  $d_i$  – диаметр  $i$ -й частицы;  $U_i$  – скорость воздуха в месте нахождения частицы;  $V_i$  – скорость движения частицы;  $C(\text{Re}_i)$  – коэффициент сопротивления частицы, зависящий от числа Рейнольдса [1, 4, 5, 7]:

$$\text{Re}_i = \frac{\rho d_i |\bar{U}_i - \bar{V}_i|}{\mu}, \quad (6)$$

где  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости воздуха.

Из соотношения (4) с учетом (1)–(3) и (5) получаем

$$\lambda_1 \frac{l}{D} \cdot \frac{\rho U^2}{2} \cdot \frac{\pi D^2}{4} = \sum_i \text{Проекция} \left( C(\text{Re}_i) \frac{\pi d_i^2}{4} \cdot \frac{\rho (\bar{U}_i - \bar{V}_i) |\bar{U}_i - \bar{V}_i|}{2} \right). \quad (7)$$

Для моодисперсных сферических частиц, заменяя в соотношении (7) разницу в скорости воздуха и частиц на среднее значение, имеем

$$\lambda_1 \frac{\pi \rho D U^2 l}{8} = n \cdot C(\text{Re}) \frac{\pi d^2}{8} \cdot \rho (U - V)^2, \quad (8)$$

где  $n$  – число частиц на участке трубопровода длиной  $l$ .

Из последнего соотношения получаем

$$\lambda_1 = C(\text{Re}) \frac{d^2}{D} \cdot \left( \frac{n}{l} \right) \cdot \left( 1 - \frac{V}{U} \right)^2. \quad (9)$$

Величина  $n/l$  равна количеству частиц, приходящемуся на единицу длины трубопровода.

Расход частиц равен следующей величине

$$m = \rho_1 \frac{\pi \cdot d^3}{6} \cdot n_1, \quad (10)$$

где  $m$  – массовый расход частиц;  $\rho_1$  – плотность частиц;  $n_1$  – число частиц, поступающих в трубопровод в единицу времени (количественный расход частиц). Величина  $n_1$  связана с  $n$  следующим соотношением

$$n_1 = n \cdot \frac{V}{l}. \quad (11)$$

Из (10) и (11) следует, что

$$\frac{n}{l} = \frac{6}{\pi \rho_1 d^3 V} m. \quad (12)$$

С учетом последнего равенства из соотношения (9) следует выражение для коэффициента сопротивления

$$\lambda_1 = C(\text{Re}) \cdot \left( \frac{6}{\pi \rho_1 d D V} \right) \cdot \left( \frac{U - V}{U} \right)^2 m. \quad (13)$$

В том случае, когда  $\text{Re} < 1$ , коэффициент сопротивления частицы можно рассчитать по формуле [1, 4, 7]:

$$C(\text{Re}) = \frac{24}{\text{Re}} = \frac{24\mu}{\rho(U - V)d}, \quad (14)$$

и тогда

$$\lambda_1 = \frac{144\mu}{\pi \rho \rho_1 d^2 D V U^2} (U - V) m. \quad (15)$$

При  $(U - V) \ll U$

$$\lambda_1 \approx \frac{144\mu}{\pi \rho \rho_1 d^2 D U^3} (U - V) m. \quad (16)$$

При выводе соотношений для изменения перепада давления воздуха вследствие запыленности потока предполагали, что скорость движения частиц меньше, чем скорость воздуха. В том случае, если это не так (это может иметь место, например, при движении частиц при расширении трубопровода), перепад давления воздуха, несущего частицы, будет меньше на величину  $\lambda \rho U^2 l / (2D)$  перепада давления чистого воздуха, движущегося с той же скоростью, что и воздух, несущий частицы.

Соотношения для коэффициента  $\lambda_1$ , полученные выше в предположении одинаковой скорости движения частиц, распространяются на пневмотранспортирование частиц, имеющих разные скорости. Если  $f(V)$  – плотность функции распределения частиц по скорости, то вместо соотношений (13), (15), (16) для расчета коэффициента сопротивления единицы относительной длины трубопровода движению взвешенных твердых частиц следует использовать соответственно следующие формулы:

$$\lambda_1 = \frac{6}{\pi \rho_1 d D} m \int_0^\infty \frac{C(\text{Re})}{V} \left( 1 - \frac{V}{U} \right)^2 f(V) dV, \quad (17)$$

$$\lambda_1 = \frac{144\mu}{\pi \rho \rho_1 d^2 D U} m \int_0^\infty \frac{1}{V} \left( 1 - \frac{V}{U} \right) f(V) dV, \quad (18)$$

$$\lambda_1 = \frac{144\mu}{\pi \rho \rho_1 d^2 D U^2} m \int_0^\infty \left( 1 - \frac{V}{U} \right) f(V) dV. \quad (19)$$

Предварительная апробация этих соотношений на ряде экспериментальных данных показала, что расчетные значения падения давления воздуха при движении газозвесей удовлетворительно согласуются с опытыми данными.

Таким образом, получены соотношения для коэффициента сопротивления трубопровода движению взвешенных сфериче-

ских твердых частиц, а также частные соотношения для этого коэффициента при стоковом режиме обтекания частиц потоком воздуха. Эти соотношения, после выявления зависимости скорости движения частиц от скорости воздуха и параметров трубопровода, могут быть положены в основу методики расчета непрерывного горизонтального пневмотранспорта сыпучих материалов.

#### Список литературы

1. Берд Р., Стюарт В., Лайтфут Е. Явления переноса. – М.: Химия, 1974. – 688 с.
2. Горбис З.П. Теплообмен и гидромеханика дисперсных сквозных потоков. – М.: Энергия, 1975. – 296 с.
3. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / под ред. М.О. Штейнберга. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. VI. Гидродинамика. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 736 с.
5. Процессы и аппараты химической технологии. Явления переноса, макрокинетика, подобие, моделирование, проектирование: В 5 т. Т.1. Основы теории процессов химической технологии / Д.А. Баранов, А.В. Вязьмин, А.А. Гухман и др.; под ред. А.М. Кутепова. – М.: Логос, 2000. – 480 с.
6. Разумов И.М. Псевдооживление и пневмотранспорт сыпучих материалов. – М.: Химия, 1964. – 160 с.
7. Райст П. Аэрозоли. Введение в теорию: пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 280 с.

#### References

1. Berd R., Stuart V., Lightfoot E. Javlenija perenosa. M.: Himija, 1974. 688 p.
2. Gorbis Z.P. Teploobmen i gidromehanika dispersnyh skvoznih potokov. M.: Jenergija, 1975. 296 p.
3. Idelchik I.E. Spravochnik po gidravlicheskim soprotivlenijam. Pod red. M.O. Shtejnberga. 3-e izd., perer. i dop. M.: Mashinostroenie, 1992. 672 p.
4. Landau L.D., Lifshits E.M. Teoreticheskaja fizika. T. VI. Hidrodinamika. M.: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit., 1986. 736 p.
5. Processy i apparaty himicheskoj tehnologii. Javlenija perenosa, makrokinetika, podobie, modelirovanie, proektirovanie: Vol. 5 t. T.1. Osnovy teorii processov himicheskoj tehnologii. D.A. Bogdanov, A.V. Vjaz'min, A.A. Guhman i dr.; Pod red. A.M. Kutepova. M.: Logos, 2000. 480 p.
6. Razumov I.M. Psevdoozhizhenie i pnevmotransport sy-puchih materialov. M.: Himija, 1964. 160 p.
7. Rajst P. Ajerzoli. Vvedenie v teoriju: Per. s angl. M.: Mir, 1987. 280 p.

#### Рецензенты:

Флегентов И.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой промышленной экологии и безопасности, Вятский государственный университет, г. Киров;

Кучеренко А.С., д.т.н., доцент, главный научный сотрудник филиала ФГБУ «48 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации, г. Киров.

Работа поступила в редакцию 28.11.2014.