УДК 621.547

Чальцев М. Н., канд. тех. наук, профессор

**Автомобильно-дорожный институт
Донецкого национального технического университета**

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОТЕРЬ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ПНЕВМОТРАНСПОРТЕ ПО ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ ТРУБАМ

Для взвесенесущих потоков методами гидромеханики составлены уравнения, предназначенные для расчета удельных потерь давления при пневмотранспорте сыпучих материалов по горизонтальным трубам.

For listed particles flows by methods of a hydromechanics the equations intended for calculation of specific losses of pressure at pneumotransport are formed.

Удельные потери напора на трение на горизонтальных участках транспортного трубопровода являются важным параметром, определяющим энергетические характеристики промышленных пневмотранспортных систем. Известные методики гидравлического расчета пневмотранспорта построены на эмпирических зависимостях, область применения которых обычно ограничена условиями эксперимента, а погрешность расчета достигает 40 % и более.

Одной из наиболее употребительных формул расчета удельных потерь давления является формула Гастерштадта, которая имеет вид:

$$\frac{\Delta P}{L} = \left(1 + K\mu\right)\frac{\Delta P}{L}, \tag{1}$$

где ΔP и ΔP – потери давления на участке трубопровода длиной L;

μ – массовая концентрация смеси;

K – эмпирический коэффициент Гастерштадта.

По мнению автора, зависимость (1) может рассматриваться как всеобщая, а численные значения коэффициента K должны определяться для каждого конкретного случая экспериментально.

При условии тщательно выполненных экспериментов формула (1) может дать достаточно точные для инженерной практики результаты. Однако попытки теоретически обосновать коэффициент K до сих пор не увенчались успехом.

Цель данной работы заключается в теоретическом обосновании и уточнении формулы (1) Гастерштадта, и в более широком плане – создание предпосылок для разработки новой методики гидравлического расчета взвесенесущих потоков.

Удельные потери давления обычно определяются на длине трубы 1 м. В этом случае разница давлений на концах этого участка невелика, и может быть принято допущение о несжимаемости и изотермичности газовой среды. Поток рассматривается одномерным, т. е. скорость, давление, температура, плотность и концентрация постоянны в поперечном сечении трубы и меняются при переходе от одного сечения к другому.

Исходя из этих допущений в работе [1] были составлены уравнения движения газовзвеси на участке трубопровода длиной L, одно из которых представляет собой уравнения Бернулли для газовзвеси. В работе [1] уравнение Бернулли не было решено, как нет этого решения и в международной практике. Позднее в работе [2] решение этого уравнения было найдено, в результате чего появилась возможность разработки новой, теоретически обоснованной методики гидравлического расчета пневмотранспорта.

Уравнение Бернулли для газовзвеси может быть представлено в виде [3]:

$$\rho_{см}\frac{u_{см}^2}{2}+P+\Delta P=const, \tag{2}$$

где $\rho_{см}$ – плотность газосмеси;

$u_{см}$ – средняя скорость движения газосмеси;

P – давление;

ΔP – потери давления на трение на участке трубопровода длиной L.

С учетом соответствующих зависимостей, выведенных в работах [1] и [2], а также представленных в [3] уравнение (2), преобразуется к виду:

$$\left[1+\frac{\rho_T}{\rho}\frac{C_p^3}{C^2\left(1-C_p\right)^2}\beta_T\right]\rho\frac{u^2}{2}+P+\Delta P=const, \tag{3}$$

где ρ_T и ρ – плотность твердых частиц и газа;

u – средняя скорость газа;

β_T – коэффициент Кориолиса для твердых частиц.

В (3) входят расходная объемная концентрация C_p равная отношению объемного расхода твердых частиц Q_T к объемному расходу газовзвеси $Q=Q_T+Q_{ã}$ и средняя объемная концентрация C. Однако в практике пневмотранспортирования понятиями расходной и действительной объемных концентраций не пользуются, поскольку C_p и C трудно измеряемые величины. Вместо них используют понятие расходной массовой концентрации μ, равной отношению массового расхода твердого материала G_T к массовому расходу газа G, так что

$$\mu=\frac{G_T}{G}, \tag{4}$$

при этом величина G_T обычно задается, а G определяется по формуле

$$G=\rho u\omega. \tag{5}$$

Выразим C_p и С через m_p. Учитывая, что

$$C_p=\frac{Q_T}{Q_T+Q}$$

и $Q_T=G_T/\rho_T$, $Q=G/\rho$, имеем

$$C_p=\frac{1}{1+\frac{G}{G_T}\frac{\rho_T}{\rho}}. \tag{6}$$

Поскольку $\frac{G}{G_T}\frac{\rho_T}{\rho}\gg 1$, единицей в знаменателе правой части равенства (6) можно пренебречь, в результате чего это равенство принимает, с учетом переобозначения C_p на α_p, вид

$$\alpha_p=\frac{G_T}{G}\frac{\rho}{\rho_T}=\mu\frac{\rho}{\rho_T}. \tag{7}$$

При записи формулы (7) переобозначение символа C_p на α_p связано с тем, что эти символы обозначают разные по смыслу расходные объемные концентрации: C_p – отношение объемного расхода твердого материала к объемному расходу газовзвеси, тогда как α_p – отношение объемного расхода твердого материала к объемному расходу газа.

Подставляя в (3) вместо C_p выражение (7), получаем

$$\left[1+\frac{m_p^3\left(\frac{\rho}{\rho_T}\right)^2}{C^2\left(1-m_p\frac{\rho}{\rho_T}\right)^2}\beta_T\right]\rho\frac{u^2}{2}+P+\Delta P=const. \quad (8)$$

Что касается функциональной связи объемной концентрации C с расходной массовой концентрацией μ, то для ее определения используют уравнение

$$C_p=C\left[1-f\left(\mathrm{Re}_T\right)\left(1-\frac{C}{C_m}\right)^{2,16}\left(\frac{u_{кр}}{u}\right)^{1,66}\right]; \quad (9)$$

$$f\left(\mathrm{Re}_T\right)=0,45\left[1+SignX\cdot th\left(0,967|X|^{0,6}\right)\right], \quad (10)$$

$$X=\lg\mathrm{Re}_T-0,88, \quad (11)$$

полученное в области исследования гидравлического трубопроводного транспорта твердых дисперсных материалов [4]. В (9) – (11) приняты обозначения: C_m – предельная объемная концентрация твердого материала; $u_{кр}$ – критическая скорость пневмотранспортирования по горизонтальному трубопроводу, соответствующая началу выпадения твердых частиц в неподвижный осадок на нижней стенке трубы; Re_T – число Рейнольдса, выраженное через скорость свободного падения w_T и средний диаметр d_T твердых частиц, т. е.

$$\mathrm{Re}_T=\frac{w_T d_T}{\nu},$$

где ν – кинематическая вязкость газа.

Подставляя в (9) вместо C_p выражение (7), получаем искомое уравнение связи величин C и μ:

$$\mu\frac{\rho}{\rho_T}=C\left[1-f\left(\mathrm{Re}_T\right)\left(1-\frac{C}{C_m}\right)^{2,16}\left(\frac{u_{кр}}{u}\right)^{1,66}\right]. \quad (12)$$

Для заданных величин $\mu\frac{\rho}{\rho_T}$, Re_T, C_m и $\frac{u_{кр}}{u}$ решение уравнения (12) позволяет определить объемную концентрацию *C*. При этом уравнение (12) решается численным или графическим методом.

Отметим, что в частном случае, когда $\mu=0$, уравнение (8) преобразуется в обычное уравнение Бернулли для горизонтального потока несжимаемой жидкости плотностью ρ:

$$\rho\frac{u^2}{2}+P+\Delta P=const. \quad (13)$$

Как известно в гидравлике, удельная потеря давления $\Delta P/L$, обусловленная трением несжимаемой жидкости о стенки трубы, пропорциональна удельной (на единицу объема) кинетической энергии потока $\rho u^2/2$, которую выражает первое слагаемое левой части уравнения Бернулли (8), и определяется по формуле Дарси – Вейсбаха

$$\frac{\Delta P}{L} = \lambda \frac{1}{d} \rho \frac{u^2}{2}, \tag{14}$$

где λ – коэффициент гидравлического трения;

d – проходной диаметр круглой трубы.

Переходя к потоку газовзвеси и учитывая выражение первого слагаемого левой части уравнения Бернулли (8), можем написать по аналогии с (14),

$$\frac{\Delta P}{L} = \left[1 + \frac{\mu^3 \left(\dfrac{\rho}{\rho_T} \right)^2}{C^2 \left(1 - \mu \dfrac{\rho}{\rho_T} \right)^2} \beta_T \right] \lambda_{см} \frac{1}{d} \rho \frac{u^2}{2}, \tag{15}$$

где $\lambda_{см}$ – коэффициент гидравлического трения газовзвеси. Его значение определяется по тем же формулам, что и при движении несжимаемых жидкостей, только с учетом числа Рейнольдса $\mathrm{Re}_{см}$, выраженного через среднюю скорость газа u, диаметр трубы d и кинематическую вязкость газовзвеси ν, т. е.

$$\mathrm{Re} = \frac{ud}{\nu_{см}}. \tag{16}$$

Кинематическая вязкость $\nu_{см}$ определяется как $\nu_{см} = \dfrac{\mu_{см}}{\rho_{см}}$, где $\mu_{см}$ и $\rho_{см}$ – средние по сечению трубы эффективная динамическая вязкость и плотность газовзвеси. Для малых объемных концентраций C величина $\mu_{см}$ определяется по формуле [5]:

$$\mu_{см} = \mu (1 + 3{,}5C). \tag{17}$$

Средняя же плотность газовзвеси равняется:

$$\rho_{см} = \rho \left[1 + \left(\frac{\rho_T}{\rho} - 1 \right) C \right]. \tag{18}$$

С учетом формул (17) и (18) выражение для $\nu_{см}$ имеет вид:

$$\nu_{см} = \nu \frac{1 + 3{,}5C}{1 + \left(\dfrac{\rho_T}{\rho} - 1 \right) C}. \tag{19}$$

Если умножить и разделить правую часть уравнения (15) на коэффициент гидравлического трения λ при движении чистого (без твердых частиц) газа, выражение в квадратных скобках обозначить φ и учесть формулу (14), то это уравнение можно написать в виде:

$$\frac{\Delta P}{L} = \varphi \cdot \frac{\lambda_{см}}{\lambda} \frac{\Delta P}{L}, \tag{20}$$

где $\frac{\Delta P}{L}$ – удельные потери давления при движении чистого газа.

Для взвесенесущих потоков можно принять $\lambda_{см}/\lambda \approx 1$. Тогда вводя обозначение:

$$K = \frac{\mu^2 \left(\frac{\rho}{\rho_T}\right)^2}{C^2 \left(1 - \mu \frac{\rho}{\rho_T}\right)^2} \beta_T, \tag{21}$$

получим:

$$\frac{\Delta P}{L} = \left(1 + K\mu\right) \frac{\Delta P}{L} \tag{22}$$

и в этом случае формула (20) преобразуется в известную формулу Гастерштадта (1).

Линейная зависимость типа (1) многими исследователями закладывалась в основу обработки экспериментальных данных по измерению удельных потерь давления на трение при пневмотранспорте. В последствии установлено, что для потоков повышенной концентрации коэффициент K не есть постоянная величина. Его значение зависит от многих параметров, в частности, от средней скорости транспортирующего газа, крупности и плотности твердых частиц, плотности и вязкости газа, массовой и объемной концентраций твердого материала, диаметра трубы. Зависимость коэффициента K от определяющих его параметров собственно раскрывает уравнение (21), вытекающее из (20). В этом и заключается принципиальное отличие обобщающей формулы (20) от формулы Гастерштадта (1).

Таким образом, на основе уравнения Бернулли для установившегося потока газовзвеси в горизонтальной круглоцилиндрической трубе получена научно обоснованная формула удельных потерь давления на трение (20). Проверочные расчеты по этой формуле показывают их хорошее совпадение с опытными данными. Погрешность расчетов не превышает 10 %.

Список источников

1. Чальцев М. Н. О гидравлическом расчете трубопроводов для пневмотранспортных систем / М. Н. Чальцев // Вестник НТУУ (КПИ), серия Машиностроение. – 2000. – Т. 1, № 38. – С. 50–54.

Chaltsev M. N. O gidravlicheskom raschete truboprovodov dlya pnevmotransportnykh system (About Pipelines Hydraulic Design for Pneumatic Conveying Systems) / M. N. Chaltsev // Vestnik NTUU (KPI) seriya Mashinostroyeniye. – 2000. – T. 1, № 38. – S. 50–54.

2. Криль С. И. Уравнение Бернулли для потока газовзвеси / С. И. Криль, М. Н. Чальцев // Прикладная гидромеханика. – 2004. – Т. 6 (78), № 1.

Kril S. I. Uravneniye Bernulli dlya potoka gazovzvesi (The Bernoulli's Equation for Gas Suspension Flow) / S. I. krill, M. N. Chaltsev // Prikladnaya gidromekhanika. – 2004. – T. 6 (78), № 1.

3. Константинов Ю. М. Гидравлика / Ю. М. Константинов. – К.: Высшая школа, 1981. – 358 с.

Konstantinov Yu. M. Gidravlika (Hydraulics) / Yu. M. Konstantinov. – K.: Vysshaya shkola, 1981. – 358 s

4. Криль С. И. Напорные взвесенесущие потоки / С. И. Криль. – К.: Наук. думка, 1990. – 160 с.

Kril S. I. Napornyye vzvesenesushchiye potoki (Pressure Suspension Flows) / S. I. Kril. – K.: Nauk. dumka, 1990. – 160 s

5. Кріль С. І. До питання про реологічне моделювання суспензій / С. І. Кріль // Прикладна гідромеханіка. – 2003. – Т. 5 (77), № 2. – С. 20–26.

Kril S. I. Do pytannya pro reologichne modelyuvannya suspenziy (On the Question of Suspensions Rheological Modelling) / S. I. Kril // Prykladna gidromekhanika. – 2003. – T. 5 (77), № 2. – S. 20–26