

М. Н. Чальцев, канд. тех. наук, проф.

О ГИДРАВЛИЧЕСКОМ РАСЧЕТЕ ТРУБОПРОВОДОВ ДЛЯ ПНЕВОТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Составлена замкнутая система гидравлических уравнений, описывающих установившееся движение газозвесей в трубах и представляющих собой основу методики аэродинамического расчета трубопроводов для промышленных пневмотранспортных систем.

Перекачка по трубам измельченных твердых материалов при помощи потока газа (воздуха) широко используется в различных отраслях промышленности. Как показывает опыт, пневмотранспорт может осуществляться в непрерывном, грядообразном или пробковом режиме. В настоящей работе речь идет о непрерывном режиме пневмотранспорта.

При непрерывном режиме движения газозвеси по горизонтальной трубе существенную роль играет действующая на твердые частицы сила тяжести, из-за чего они неравномерно распределяются по вертикальному сечению диаметра трубы и основная их масса перемещается у дна трубы. Поскольку степень неравномерности распределения твердых частиц в заданном поперечном сечении зависит от средней скорости потока, существует так называемая критическая скорость или скорость завала, при которой твердые частицы начинают выпадать в осадок, образуя на дне трубы заилиения. Кроме того, в рассматриваемых потоках наблюдается осевая асимметрия скоростного поля. Она выражается в том, что профиль осредненной продольной скорости не симметричен относительно оси трубы и местоположение максимальной осредненной скорости находится выше этой оси. Что касается перепадов давления при пневмотранспорте, то при одинаковой средней скорости потока они больше перепадов давления в соответствующем потоке газа, что связано с дополнительными затратами энергии газа на транспортировку твердого материала. Гидравлический расчет пневмотранспорта, естественно, более сложный, чем гидравлический расчет обычных газопроводов.

В научной литературе известны различные методики расчета пневмотранспорта. Однако в большинстве своем они носят чисто эмпирический характер, поэтому области применения их ограничены условиями эксперимента. Кроме того, многие расчетные зависимости для определения перепадов давления характеризуются низкой степенью точности. Общим недостатком существующих методов расчета является то, что они не учитывают связи потерь давления, обусловленных гидравлическими сопротивлениями, с кинематической структурой потока. Так что ограниченность, а в некоторых случаях и недопустимо низкая степень точности предложенных методик расчета и большое разнообразие условий пневмотранспортирования на практике не всегда позволяют обеспечить надежность и эффективность работы проектируемых пневмотранспортных установок.

Таким образом, практика проектирования и создания промышленных пневмотранспортных систем ставит задачу разработки научно обоснованной обобщенной методики инженерного расчета пневмотранспорта, пригодной для практического использования в широких диапазонах изменения условий пневмотранспортирования. Некоторые соображения насчет разработки такой методики расчета изложены ниже. Они основываются на современных научных достижениях в области исследования гидравлического трубопроводного транспорта.

Потоки газозвесей при пневмотранспорте, аналогично потокам смесей жидкости и твердых частиц при гидротранспорте, являются установившимися. Основное различие между ними заключается лишь в том, что потоки газозвесей в трубах постоянного сечения неравномерны из-за непрерывного изменения плотности газа вдоль трубы, тогда как потоки гидросмесей равномерны. Поэтому с методологической точки зрения интерес представляет разработка методики расчета пневмотранспорта на основе современной методики

гидравлического расчета пульпопроводов, разработанной в [1], но с учетом влияния сжимаемости несущей среды – газа.

При гидравлических расчетах пневмотранспорта, равно как и газопроводов, рассматривают обычно два случая: низконапорное движение при малых относительных перепадах давления между начальным и конечным сечениями трубопровода, и высоконапорное движение при больших перепадах. Однако, независимо от того, какой из этих случаев рассматривается, исходными уравнениями для решения задачи о движении газозвеси в трубе должны служить гидравлические уравнения неразрывности, баланса энергии и гидравлических сопротивлений. При их записи будем предполагать, что процесс расширения газа адиабатический, т. е., что теплообмен между газозвесью и окружающей средой отсутствует. Кроме того, поток рассматривается одномерным. Это значит, что скорость, давление, плотность, температура и концентрация постоянны в поперечном сечении трубы и меняются при переходе от одного сечения к другому. В данном случае указанные гидравлические уравнения движения газозвеси, написанные для участка трубы между двумя произвольными поперечными сечениями 1 и 2, имеют вид

$$\rho_1 (1 - c_1) V_1 = \rho_2 (1 - c_2) V_2; \tag{1}$$

$$\rho_T c_1 V_1 = \rho_T c_2 V_2; \tag{2}$$

$$\frac{1}{2} \rho_1^* V_1^2 + P_1 + \rho_1^o g Z_1 + \rho_1^o m \frac{RT_1}{k-1} = \frac{1}{2} \rho_2^* V_2^2 + P_2 + \rho_2^o g Z_2 + \rho_2^o m \frac{RT_2}{k-1} + \Delta P, \tag{3}$$

где нижними индексами 1 и 2 обозначены величины, относящиеся к первому и второму сечениям соответственно. В уравнениях (1) – (3) приняты следующие обозначения: V – средняя по поперечному сечению трубы скорость движения газозвеси; ρ и ρ_T – плотность газа и твердых частиц; c – расходная объемная концентрация, равная отношению объемного расхода твердых частиц к объемному расходу газозвеси; P – давление в газе; g – ускорение силы тяжести; Z – геометрическая высота центра масс газозвеси; m – расходная массовая концентрация газа, равная отношению массового расхода газа к массовому расходу газозвеси; R – газовая постоянная; k – показатель адиабаты, равный отношению теплоемкостей газа при постоянном давлении и постоянном объеме (для воздуха при нормальных условиях $k = 1,405$); T – абсолютная температура; ΔP – потери давления, обусловленные трением газозвеси о стенки трубы и местными гидравлическими сопротивлениями; ρ^o – представляет собой расходную плотность газозвеси, а величина ρ^* – эффективную плотность. Входящими в (3) плотности ρ^o и ρ^* определяются согласно формулам

$$\rho^o = \rho (1 - c) + \rho_T c; \tag{4}$$

$$\rho^* = \rho \frac{(1 - c)^3}{(1 - s)^2} + \rho_T \frac{c^3}{s^2}, \tag{5}$$

где s – объемная концентрация твердых частиц.

Уравнения (1) и (2) выражают постоянство массовых расходов газа и твердых частиц вдоль потока, тогда как уравнение (3) представляет собой уравнение Бернулли для потока реальной газозвеси. Первые три члена в обеих частях этого уравнения имеют тот же физический смысл, что и соответствующие члены обычного уравнения Бернулли для потока несжимаемой однородной жидкости. Четвертый же член связан с температурным напором газа

$$m \frac{RT}{g(k-1)}.$$

Для горизонтальных труб разницей удельных (на единицу объема) потенциальных энергий положения $\rho_1^0 g Z_1 - \rho_2^0 g Z_2$ можно пренебречь. Если к тому же предположить, что течение изотермическое, то уравнение (3) упрощается и принимает вид

$$\frac{1}{2} \rho_1^* V_1^2 + P_1 = \frac{1}{2} \rho_2^* V_2^2 + P_2 + \Delta P. \quad (6)$$

Система четырех уравнений (1), (2), (5) и (6) незамкнута, поскольку содержит семь неизвестных величин ρ, ρ^*, c, s, V, P , и ΔP . Для ее замыкания используется уравнение состояния идеального газа

$$P = \rho R T \quad (T = const), \quad (7)$$

и уравнение связи концентраций c и s , полученное в [1]

$$c = s \left[1 - f(\xi) (1-s)^{2,16} \left(\frac{V_{кр}}{V} \right)^{1,66} \right]; \quad (8)$$

$$f(\xi) = 0,45 \left[1 + \text{sign} \xi \cdot \text{th}(0,967) |\xi|^{0,6} \right]; \quad (9)$$

$$\xi = \lg \text{Re}_T - 0,88, \quad (10)$$

где $V_{кр}$ – критическая скорость пневмотранспортирования;

$\text{Re}_T = W d_T / \nu$ – число Рейнольдса, выраженное через гидравлическую крупность твердых частиц W , их средний диаметр d_T и кинематическую вязкость несущей среды ν .

Что касается величины ΔP , то она определяется по методике, аналогичной разработанной в [1] методики расчета гидротранспорта, и учитывающей особенности кинематической структуры двухфазного потока. Как утверждается в [2], по своей достоверности эта методика приемлема и для пневмотранспорта.

Таким образом, получена замкнутая система гидравлических уравнений, описывающих изотермическое течение газозвесей в трубах и представляющих собой основу обобщенной методики расчета пневмотранспорта. Предварительная апробация этой методики на конкретных экспериментальных данных показала, что расчетные значения параметров пневмотранспортирования вполне удовлетворительно согласуются с опытными.

Список используемой литературы

1. 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. – 1990. – 160 s.
2. Криль С. И. Численное моделирование течения газозвесей в трубах при высоких давлениях / С. И. Криль, В. П. Берман // Гидромеханика. – 1996. – Вып. 70. – С. 53–60.
Kril S. I. Chislennoye modelirovaniye techeniya gazovzvesey v trubah pri vysokih davleniyah (Numerical Modelling of Gas Suspensions Flowing in Pipes at High Pressure) / S. I. Kril, V. P. Berman // Gidromekhanika. – 1996. – Vyp. 70. – S. 53–60.