УДК.621.547

АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ПНЕВМОТРАНСПОРТНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Чальцев М.Н., канд. техн. наук, профессор
Автомобильно-дорожный институт Донецкого национального технического университета

Представлено теоретическое обоснование нового метода гидравлического расчета пневмотранспортного трубопровода. Метод разработан на основе решения уравнения Бернулли для аэродисперсных потоков.

Theoretical method a new technique hydraulic account of the pneumatic transport tube is represented. The method is developed on the ground of Bernulli equation decision.

Вступление. В условиях возрастающего применения пневматического транспорта в различных отраслях промышленности исследование аэродисперсных потоков отстает от практических нужд. Проблемы, возникающие при проектировании и использовании пневмотранспортных систем, большей частью разрешаются путем проведения трудоемких и дорогостоящих экспериментов. Однако получаемые при этом эмпирические зависимости пригодны, как правило, только для ограниченного круга систем, соответствующих условиям эксперимента. Обобщение результатов экспериментальных исследований на другие условия приводит к значительным погрешностям расчета. По этой причине расчеты ведутся с неоправданно большим запасом. Завышение расходов сжатого воздуха и его давления приводит к росту энергоемкости установок, ускоряет износ основного оборудования, затрудняет процесс воздухоочистки. Возможно возникновение завалов транспортного трубопровода.

Анализ исследований и публикаций. Важнейшей задачей гидравлического расчета пневмотранспорта является правильная оценка потерь давления вдоль трассы, которая обеспечивает наименьшие энергозатраты при устойчивом процессе транспортирования с заданной производительностью.

Известные методики гидравлического расчета потерь давления можно условно подразделить на два типа, отличающихся структурой основных формул. К первому может быть отнесена формула Гастерштадта, которая имеет вид [1]:

$$\frac{\Delta P}{L} = (1 + K_{\mu}) \frac{\Delta P_{в}}{L}, \tag{1}$$

где ΔP и $\Delta P_{в}$ - потери давления на участке трубопровода длиной L; μ - массовая концентрация смеси; K - эмпирический коэффициент Гастерштадта.

По мнению многих исследователей 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) дает достаточные для инженерной практики результаты. Она проста и удобна для инженерных расчетов, однако попытки теоретически обосновать коэффициент K до сих пор не увенчались успехом.

В практике проектирования пневмотранспортных систем более широко используются методы гидравлического расчета, в основу которых положена формула Дарси - Вейсбаха для однородных жидкостей. Один из вариантов этой формулы, предложенный Г. Зеглером [2] имеет вид:

$$\frac{\Delta P}{L} = \lambda_{см} \frac{\rho_{в} U_{в}}{2D}, \tag{2}$$

где $\lambda_{см}$ – коэффициент сопротивления движению смеси воздуха с транспортируемым материалом;

$\rho_в$ и $U_в$ – плотность и скорость движения воздуха; D – диаметр трубопровода.

Коэффициент $\lambda_{см}$ в формуле (1) определяется опытным путем. Часто используется также видоизмененный вариант формулы (2), предложенный В. Бартом [3]:

$$\frac{\Delta P}{L} = (\lambda_в + \mu\lambda_м)\frac{\rho_в U_в^{\,2}}{2D}, \tag{3}$$

где $\lambda_м$ – дополнительный коэффициент сопротивления, отражающей наличие в смеси твердого материала, определяемый экспериментально.

Известны попытки создания аналитических методов расчета [4,5], но они справедливы только для потоков низкой концентрации (до 5кг/кг) и поэтому большого распространения не получили. Большинство промышленных пневмотранспортных систем работают при концентрациях 15-25 кг/кг и выше.

Из анализа состояния вопроса следует вывод о том, что к настоящему времени еще не разработана обобщенная методика гидравлического расчета пневмотранспортных трубопроводов, которая была бы применима для широкого диапазона условий транспортирования.

Цель работы. Целью данной работы является создание научно обоснованных инженерных методов гидравлического расчета для проектирования промышленных пневмотранспортных систем, обеспечения надежности и эффективности их работы.

Математическая модель. При гидравлических расчетах пневмотранспорта исходными уравнениями для решения задачи о движении газовзвеси в трубе служат гидравлические уравнения неразрывности и движения. При их записи будем полагать, что процесс расширения газа изотермический, а поток является одномерным. Это значит, что температура смеси в процессе транспортирования не изменяется, а ее плотность и концентрация изменяются при переходе от одного сечения к другому.

Рассматривая задачу об удельных потерях давления в трубопроводе, т.е. на коротких его отрезках, будем считать несущую среду несжимаемой. В этих условиях гидравлические уравнения неразрывности и движения газовзвеси имеют вид:

$$\rho_T S U_T = G_T \tag{4}$$

$$\rho_в (1-S) U_в \omega = G_в \tag{5}$$

$$\rho_{см}\frac{U_{см}^{\,2}}{2} + P + \Delta P = const., \tag{6}$$

где $\rho_T, \rho_в, \rho_{см}$ - плотность твердых частиц воздуха и их смеси; $G_T, G_в$ - массовый расход материала и воздуха; *P* – давление; ΔP - потери давления на участке трубопровода длиной *L*.

Выражение (6) является уравнением Бернулли для газовзвеси. С учетом соответствующих зависимостей, представленных в работах [6] и [7], уравнение (6) преобразуется к виду:

$$\left[\frac{1-S}{(1-C)^2}\beta_в + \frac{\rho_T}{\rho_в}\frac{S^3}{C^2(1-S)^2}\beta_T\right]\rho_в\frac{U_в^2}{2} + P + \Delta P = const; \tag{7}$$

где $\beta_в$ и β_T – безразмерные коэффициенты, являющиеся аналогом коэффициента Кориолиса для потоков однородной жидкости. Однако если для однородной жидкости величина $\beta_в$ принимает значения 1.04 ÷ 1.1, то величина β_T может существенно отличаться от 1.

В (7) входят расходная объемная концентрация S, равная отношению объемного расхода твердых частиц Q_T к объемному расходу газовзвеси $Q = Q_T + Q_в$, и средняя объемная концентрация C, учитывающая асимметрию поля скоростей и концентраций в поперечном сечении трубы. Функциональная связь концентрации S и C получена по результатам исследований гидравлического трубопроводного транспорта [6]:

$$S = C\left[1 - f\left(\mathrm{Re}_T\right)\left(1 - \frac{C}{C_m}\right)^{2.16}\left(\frac{u_{kp}}{u}\right)1.66\right]; \tag{8}$$

$$f(\mathrm{Re}_T) = 0.45\left[1 + SignX \cdot th\left(0.967|X|^{0.6}\right)\right]; \tag{9}$$

$$X = \lg \mathrm{Re}_T - 0.88; \tag{10}$$

где C_m – предельная объемная концентрация твердого материала; u_{kr} – 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 твердых частиц, т.е.

$$X = \lg \mathrm{Re}_T - 0.88,$$

$v_г$ – кинематическая вязкость газа.

Учитывая, что объемные концентрации газовзвеси обычно небольшие, естественно предположить, что коэффициент Кориолиса для газовой фазы равен 1, т.е. $\beta_в \approx 1$. Кроме того, в первом слагаемом в квадратных скобках в (7) можно пренебречь величинами S<<1 и C<<1, поскольку значение этого слагаемого намного меньше второго слагаемого в этих скобках. С учетом вышесказанного, а также после некоторых преобразований, уравнение (7) может быть приведено к виду:

$$\left[1 + \frac{\mu^3\left(\frac{\rho_в}{\rho_T}\right)^2}{C^2(1 - \mu\frac{\rho_в}{\rho_T})^2}\beta_T\right]\rho_в\frac{U_в^{\,2}}{2} + P + \Delta P = const., \tag{11}$$

где $\mu = \dfrac{G_T}{G_в}$ – массовая концентрация смеси.

Как известно в гидравлике, удельная потеря давления $\dfrac{\Delta P}{L}$(обусловленная трением несжимаемой жидкости) в трубопроводе, пропорциональна удельной (на единицу объема) кинематической энергии потока $\rho\dfrac{U^2}{2}$, которую выражает первое слагаемое левой части уравнения Бернулли (6) и определяется по формуле Дарси-Вейсбаха:

$$\frac{\Delta P}{L} = \lambda\frac{1}{d}\rho\frac{U^2}{2}, \tag{12}$$

где λ – коэффициент гидравлического трения;

d – проходной диаметр круглой трубы.

Переходя от потока жидкости к потоку газовзвеси и учитывая выражение в квадратных скобках левой части уравнения Бернулли (11) можно написать по аналогии с (12):

$$\frac{\Delta P}{L} = \left[1 + \frac{\mu^3\left(\frac{\rho_в}{\rho_T}\right)^2}{C^2\left(1 - \mu\frac{\rho_в}{\rho_T}\right)^2}\beta_T\right]\lambda_{см}\frac{\rho_в}{d}\frac{U_в^{\,2}}{2}, \tag{13}$$

где $\lambda_{см}$ – коэффициент гидравлического трения смеси.

Выражение (10) может быть представлено в виде:

$$\frac{\Delta P}{L} = \varphi\frac{\Delta P_в}{L}, \tag{14}$$

где $\frac{\Delta P_в}{L}$ – удельные потери давления при движении чистого воздуха:

$$\frac{\Delta P_в}{L} = \lambda_в \frac{\rho_в}{d} \frac{U_в^{\,2}}{2}, \tag{15}$$

коэффициент φ равняется:

$$\varphi = \left[1 + \frac{\mu^3 \left(\frac{\rho_в}{\rho_T} \right)}{C^2 \left(1 - \mu \frac{\rho_в}{\rho_T} \right)^2} \beta_T \right] \frac{\lambda_{см}}{\lambda_в} \tag{16}$$

Для практического использования формулы (11) необходимо определить параметры $\lambda_в, \lambda_{см}$ и β_T. Что касается коэффициентов гидравлического сопротивления $\lambda_в$ и $\lambda_{см}$, то в квадратичной области сопротивления их значения одинаковы, поскольку они не зависят от числа $\mathrm{Re}_в$. В случае доквадратичной области гидравлического сопротивления величина $\lambda_в$ определяется по формуле Альтшуля [8]:

$$\lambda_в = 0.11 \left[\frac{68}{\mathrm{Re}_в} + \frac{K_э}{d} \right]^{0.25} \tag{17}$$

где число Рейнольдса $\mathrm{Re}_в = \frac{U_в d}{\nu_в}$, $\nu_в$ - кинематическая вязкость воздуха; $K_э$ – относительная шероховатость внутренних стенок трубы.

Значение $\lambda_{см}$ определяется по той же формуле (10), но только с учетом числа Рейнольдса $\mathrm{Re}_{см} = \frac{U_в d}{\nu_{см}}$, где вязкость смеси может быть вычислена по формуле:

$$\nu_{см} = \nu_в \frac{1 + 3.5C}{1 + \left(\frac{\rho_T}{\rho_в} - 1 \right) C} \tag{18}$$

Функциональная зависимость коэффициента Кориолиса β_T для твердого материала от определяющих его параметров установлена путем обработки опытных данных по измерению удельных потерь на трение в горизонтальной трубе.

Если принять $\frac{\lambda_{см}}{\lambda_в} \approx 1$, что справедливо для потоков низко концентрации, и ввести обозначение:

$$K = \left[\frac{\mu \frac{\rho_г}{\rho_T}}{C(1 - \mu \frac{\rho_г}{\rho_T})} \right]^2 \beta_T, \tag{19}$$

то $\varphi = 1 + Km_p$, и в этом случае формула (16) преобразуется в эмпирическую формулу Гастерштадта (1).

Принципиальное значение формулы (16) состоит в том, что она теоретически обосновывает зависимость коэффициента К от определяющих его параметров.

Проверочные расчеты по формуле (11) показали их хорошее совпадение с опытными данными. Погрешность расчетов не превышает 10%.

Вывод. Полученная на основе решения уравнения Бернулли формула (14) может быть рекомендована для гидравлических расчетов установившихся потоков в горизонтальном пневмотранспортном трубопроводе.

Список источников:

1. Гастерштадт И. Пневматический транспорт, -Л.: Изд. Сев. – зап. обл. Промбюро ВСНЗ, 1927. – 119с.
2. Зеглер Г., Шредер П. Пневмотранспортирование зерна пневматическим способом, - Харьков, ОНТИ, 1937. – 152с.
3. Bart W. Chemie Ingenieur Technic. 1960. №3, p.164-171.
4. Клячко Л.С. и др. Пневматический транспорт сыпучих материалов. - М$_{Н}$.: Наука и техника, 1983. – 216с.
5. Хрусталев Б.М. Пневматический транспорт (теория, проектирование, реализация). – Дисс. докт. техн. наук – Москва, 1998. – 51с.
6. Чальцев М.Н. О гидравлическом расчете трубопроводов для пневмотранспортных систем// Вестник НТУУ (КПИ), Серия Машиностроение, - 2000, №38, т.1, - с.50-54.
7. Криль С.И., Чальцев М.Н. Уравнение Бернулли для потока газовзвеси // Прикладная гидромеханика, т.6, №1, 2004.
8. Альтшуль А.Д., Киселев П.Г. Гидравлика и аэродинамика. М.: Стройиздат, 1975 – 327с.