

ТРАНСПОРТ

УДК 622:658

С. В. Войцеховский, канд. техн. наук

Автомобильно-дорожный институт

ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Горловка

ВЛИЯНИЕ ЗАКРУТКИ ПОТОКА НА КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ ПО ДЛИНЕ ПРИ ПНЕВМАТИЧЕСКОМ ТРАНСПОРТИРОВАНИИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Проведены экспериментальные исследования по определению коэффициента трения по длине горизонтального трубопровода при пневматическом транспортировании закрученным потоком для трех типов материалов – угольной пыли, золы и полистирола. Установлено, что относительный коэффициент трения в основном зависит от двух безразмерных параметров: массовой концентрации твердой фазы и степени закрутки потока. Получена функция отклика для определения коэффициента трения закрученного потока от этих параметров и в зависимости от коэффициента трения для прямого потока. Полученное выражение удовлетворяет требованиям к инженерным расчетам и может быть использовано при проектировании пневмотранспортных систем с закруткой потока.

Ключевые слова: коэффициент трения, пневматический транспорт, сыпучие материалы, удельные потери давления, критическая скорость транспортирования

Введение

Системы пневматического транспортирования сыпучих материалов по трубопроводу с помощью сжатого воздуха с успехом применяются во многих отраслях промышленности, энергетике и сельском хозяйстве. К их достоинствам относятся простота конструкции, надежность, возможность создания необходимой конфигурации транспортной линии (что важно при стесненных условиях производств), высокие эксплуатационные характеристики, экологическая безопасность, способность выполнять технологические функции (сушка, сепарация) и т. д. Вместе с тем к недостаткам таких систем можно отнести повышенный расход энергии, износ транспортного трубопровода, образование пробок и завалов, разрушение транспортируемых частиц (что актуально для предприятий органической химии, пищевой промышленности и сельского хозяйства).

Указанные недостатки вызваны в первую очередь необходимостью обеспечения требуемой минимальной скорости несущего потока сжатого воздуха, при которой осуществляется транспортирование частиц во взвешенном состоянии. В противном случае образуются пробки и завалы трубопровода, что сопровождается неустойчивым режимом транспортирования. Это также оказывает негативное влияние на дальность транспортирования, т. к. при большой длине трубопровода имеют место значительные потери давления. Из-за разницы давлений в начале и конце трубопровода плотность потока воздуха по мере его продвижения заметно уменьшается, а скорость и кинетическая энергия возрастают. Увеличение скорости частиц сверх необходимого для устойчивого транспортирования приводит к повышенному износу трубопровода и деградации самих частиц, вследствие их ударов о стенки. Если же снижать скорость, то на разгонном и начальном участках, где кинетическая энергия потока ниже, частицы залегают и образуются завалы.

Использование закрутки транспортирующего потока сжатого воздуха позволяет снизить влияние этих негативных факторов путем обеспечения устойчивого режима транспортирования при скоростях меньших, чем при использовании обычного прямого потока [1, 2]. Это достигается за счет того, что закрученный поток создает дополнительную подъем-

ную силу и в меньшей степени подвержен возникновению залеганий сыпучего материала и образованию пробок. Таким образом, за счет закрутки становится возможным уменьшить скорость на разгонном и начальном участках, что благоприятно сказывается в дальнейшем по мере затухания степени закрутки при одновременном увеличении прямоочной скорости потока за счет его расширения.

Вместе с тем следует отметить, что широкое применение пневмотранспортных систем с закруткой сдерживается недостаточной степенью проработанности методик расчета таких систем, и в частности влияния степени закрутки потока на потери давления и связанной с нею скорости транспортирования двухфазных сред типа воздух/твердые частицы. Таким образом, исследования по определению влияния закрутки на коэффициент трения по длине трубопровода для определения потерь давления является важной и актуальной задачей.

Постановка задачи

Чтобы оценить потери давления и энергетические затраты на транспортирование сыпучего материала по трубопроводу, необходимо установить связь между коэффициентом потерь давления по длине и массовой концентрацией материала. Обычно потери давления из-за наличия твердых частиц определяют по аналогии с общепринятой формулой [3]:

$$\Delta p = m_t \lambda_z \frac{L}{D} \frac{\rho V^2}{2}, \quad (1)$$

$$m_t = \frac{G_m}{G_b}, \quad (2)$$

где m_t – массовая концентрация смеси,

G_m и G_b – массовые расходы сыпучего материала и воздуха, соответственно,

L – длина трубопровода,

D – диаметр трубопровода,

V – скорость воздуха,

ρ – плотность воздуха.

Что касается коэффициента трения по длине λ_z , учитывающего наличие твердой фазы, то большинство авторов определяют его как функцию от чисел Рейнольдса или Фруда в зависимости от массовой концентрации m_t [4]. В нашем случае стоит задача установить, каким образом закрутка потока отражается на величине λ_z по сравнению с незакрученным потоком в зависимости от m_t , т. е. с учетом формул (1) и (2) получить функцию вида:

$$\frac{\lambda'_z}{\lambda_z} = f(m_t, \Lambda), \quad (3)$$

$$\lambda'_z, \lambda_z = \frac{1}{m_t} \frac{D}{L} \frac{2\Delta p}{\rho V^2}, \quad (4)$$

где λ'_z и λ_z – коэффициенты трения по длине с закруткой и без закрутки потока, при одинаковых значениях массовой концентрации сыпучего материала m_t ,

Λ – безразмерный параметр закрутки потока.

Для выполнения поставленной задачи были проведены эксперименты по определению коэффициентов трения при транспортировании трех типов твердых частиц (угольная пыль, зола, полистирол) с различной степенью закрутки потока (включая полностью незакрученный поток). Расчет λ'_z и λ_z производился по измеренным значениям Δp на экспериментальной

установке, представляющей собой транспортный трубопровод внутренним диаметром 55 мм и длиной 8 м (его начальный стабилизирующий участок длиной 2 м имел прозрачное исполнение для визуализации), измерение давления производилось в начале и конце трубопровода датчиками давления. Сжатый воздух поступал от компрессора в трубопровод через калиброванное сопло и тангенциальный щелевой завихритель, у которого имелась возможность изменять степень закрутки потока путем изменения количества тангенциальных подводов (от 2 до 6). Расход воздуха измерялся по перепаду давления на диафрагме, расход сыпучего материала определялся путем взвешивания. Степень закрутки рассчитывалась из соотношения тангенциального и осевого массовых расходов воздуха [5]:

$$\Lambda = \frac{G_B^t}{G_B^a}, \quad (5)$$

$$G_B = G_B^t + G_B^a. \quad (6)$$

Физические характеристики транспортируемых частиц [6, 7]: угольная пыль – диаметр частиц 30–50 мкм, взвешенная плотность 1900 кг/м³, скорость витания 2,84 м/с; зола – диаметр частиц 40–80 мкм, плотность 3100 кг/м³, скорость витания 6,2 м/с; полистирол – диаметр частиц 1,65 мм, плотность 965 кг/м³, скорость витания 5,9 м/с.

Результаты и обсуждение

На рисунке 1 представлена экспериментальная величина относительного коэффициента трения λ'_z/λ_z в зависимости от массовой концентрации твердой фазы двухфазного закрученного потока при различных значениях параметра крутки Λ .

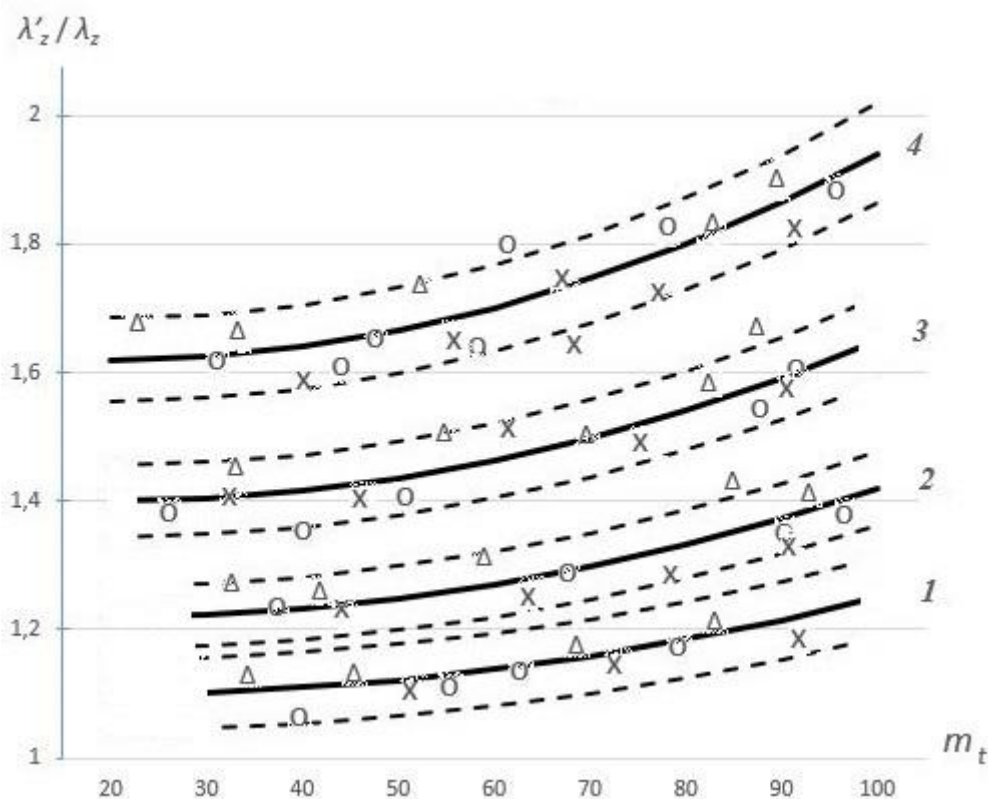


Рисунок 1 – Величина коэффициента трения в зависимости от массовой концентрации сыпучего материала

Здесь цифрами от 1 до 4 показаны кривые изменения коэффициента трения при различных степенях закрутки потока ($\Lambda = 0,5; 0,8; 1,2$ и $1,5$, соответственно), а экспериментальные точки принадлежат: \times – угольной пыли; \circ – полистиролу; Δ – золе.

Как можно заметить из рисунка, несмотря на различные физические характеристики частиц транспортируемого материала (их размер, плотность и скорость витания) при приведении параметров транспортирования к безразмерному виду значения коэффициента потерь на трение мало зависят от этих характеристик. И по крайней мере для трех данных типов материалов коэффициент трения в пределах, достаточных для инженерных расчетов (отклонения не превышают 15 %), зависит только от массовой концентрации и параметра крутки потока. Это позволяет получить аналитическую зависимость для коэффициента потерь на трение закрученного двухфазного потока, как функцию отклика от двух безразмерных параметров. В результате аппроксимации полученных экспериментальных зависимостей методом наименьших квадратов уравнение (3) принимает вид:

$$\frac{\lambda'_z}{\lambda_z} = 1 + 1,1 \cdot 10^{-4} m_i + 0,12\Lambda - 0,67 \cdot 10^{-6} m_i + 0,302\Lambda^2. \quad (7)$$

Таким образом, используя зависимость (7) и одну из существующих методик расчета коэффициента потерь на трение для прямого двухфазного потока λ_z , можно получить значение данного коэффициента для закрученного потока λ'_z .

На рисунке 2 представлены результаты расчета удельных (на единицу длины трубопровода) потерь давления в зависимости от скорости воздуха при транспортировании сыпучего материала с помощью закрученного потока с использованием формул (1) и (7).

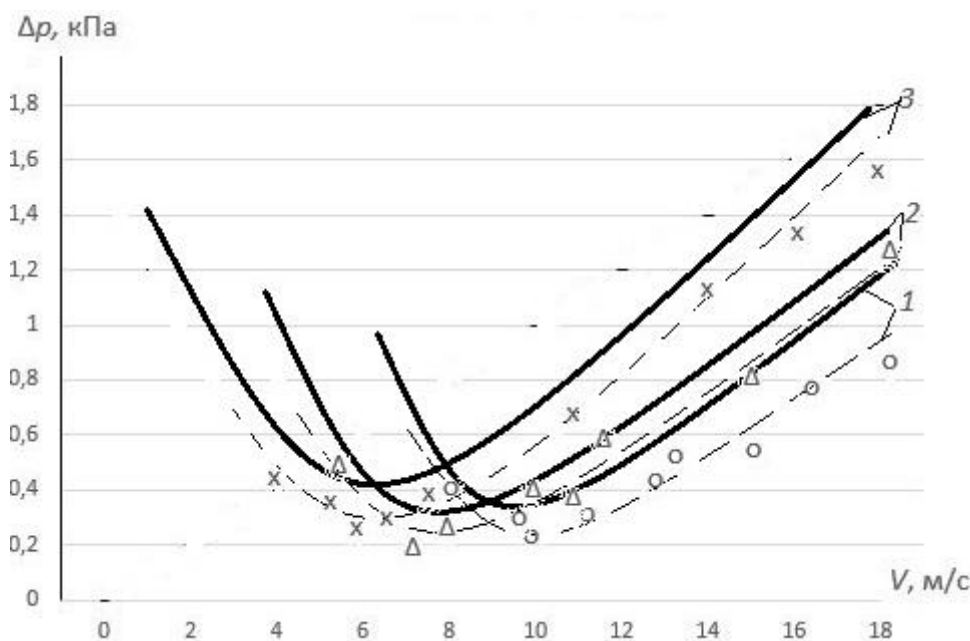


Рисунок 2 – Величина удельных потерь давления в зависимости от скорости потока

Здесь линии 1 соответствуют потерям давления без закрутки потока (сплошная линия – расчетная, пунктирная – аппроксимация экспериментальных точек, показанных маркерами \circ), линии 2 соответствуют закрученному потоку со степенью закрутки $\Lambda = 0,8$ (Δ – экспериментальные точки), и линии 3 – со степенью закрутки $\Lambda = 1,5$ (\times – экспериментальные точки). В качестве транспортируемого материала использовалась угольная пыль.

Определение коэффициента трения для закрученного потока осуществлялось посредством формулы (7) и соответствующим расчетным значением коэффициента трения для прямого потока λ_z , которое определялось по известной формуле [8]:

$$\lambda_z = 0,867 Re_t^{1,7}. \quad (8)$$

Здесь число Рейнольдса для частиц рассчитывается по формуле:

$$Re_t = \frac{d_t W}{\nu}, \quad (9)$$

где d_t – эквивалентный диаметр частиц,

W – скорость витания частиц,

ν – кинематическая вязкость воздуха.

В целом результаты, рассчитанные по формулам (1) и (7, 8, 9), удовлетворительно совпадают с натурным экспериментом. Погрешность расчетов в зоне высоких скоростей транспортирования лежит в пределах все тех же 15 %. Увеличение погрешности наблюдается в зоне критических скоростей (при которых начинается процесс выпадения частиц в осадок с последующим образованием завалов и пробок). Но даже в этом случае сама величина критической скорости, которая является одной из важнейших характеристик при проектировании систем пневматического транспорта, определяется с достаточно высокой для инженерных расчетов точностью.

Выводы

1. Получены экспериментальные зависимости коэффициента трения при пневматическом транспортировании трех типов сыпучих материалов (угольная пыль, зола и полистирол) закрученным потоком сжатого воздуха по горизонтальному трубопроводу при различных степенях закрутки.

2. Установлено, что величина коэффициента трения закрученного двухфазного потока (по отношению к прямому потоку) в основном зависит от безразмерных параметров: массовой концентрации твердой фазы и степени закрутки. И в меньшей степени зависит от характеристик транспортируемого материала (диаметра частиц, его плотности и скорости витания).

3. По результатам эксперимента получена аналитическая функция отклика для определения коэффициента потерь на трение в закрученном потоке от массовой концентрации и степени закрутки.

4. Произведена проверка расчетных удельных потерь давления при помощи аналитической функции для расчета коэффициента трения по натурным экспериментам. При этом погрешность расчетов не превышает 15 % в области средних и высоких скоростей транспортирования. Погрешность определения критической скорости транспортирования не превышает 10 %.

5. Результаты исследования могут быть учтены при составлении инженерных методик расчета систем пневматического транспорта, использующих закрутку потока для повышения эксплуатационных характеристик.

Список литературы

1. Hui, Li. Particle Velocity and Concentration Characteristics in a Horizontal Dilute Swirling Flow Pneumatic Conveying // Li Hui, Tomita Yuji // Powder Technology. – 2000. – № 107. – P. 144–152.
2. Li, Z. Q. Experimental Study High-Density Gas-Solids Flow in a New Coupled Circulating Fluidized Bed / Z. Q. Li, C. N. Wu // Powder Technology. – 2004. – № 139. – P. 214–220.
3. Mills, D. Pneumatic Conveying Design Guide / D. Mills. – Glasgow : UK, 1990. – 424 с.

4. Халатов, А. А. Теория и практика закрученных потоков / А. А. Халатов. – Киев : Наукова думка, 1989. – 190 с.
5. Гольдштик, М. А. Вихревые потоки / М. А. Гольдштик. – Новосибирск : Наука, 1981. – 368 с.
6. Чальцев, М. Н. Математическая модель вихревого эжектора / М. Н. Чальцев, С. В. Войцеховский // Наукові праці ДонНТУ. Серія : Гірничо-електромеханічна. – 2001. – Вип. 35. – С. 204–209.
7. Чальцев, М. Н. Определение потерь давления при движении закрученного потока в горизонтальном трубопроводе / М. Н. Чальцев, С. В. Войцеховский // Вісник СХУ ім. Даля. – 2007. – № 3. – С. 196–203.
8. Klinzing, G. E. Pneumatic Conveying of Solids / G. E. Klinzing. – Pittsburg, USA, 1997. – 482 с.

С. В. Войцеховский

Автомобильно-дорожный институт

ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Горловка

**Влияние закрутки потока на коэффициент трения по длине при пневматическом
транспортировании сыпучих материалов**

Применение закрутки потока в системах пневматического транспорта сыпучих материалов позволяет снижать скорость транспортирования ниже критических значений, доступных при прямом потоке. Либо при той же скорости повысить концентрацию материала и производительность пневмотранспортной системы. Наряду с экономией энергии это также позволяет снизить износ трубопровода и деградацию транспортируемых частиц. В то же время методики расчета пневмотранспортных систем с закруткой потока требуют дополнительных исследований.

С этой целью были экспериментально получены зависимости коэффициента трения для закрученного двухфазного потока для трех типов материалов (угольной пыли, золы и полистирола). Установлено, что относительный коэффициент трения в основном зависит от двух безразмерных параметров: массовой концентрации твердой фазы и степени закрутки потока. В результате была выведена зависимость коэффициента трения от этих двух безразмерных параметров и произведен расчет удельных потерь давления на транспортирование в зависимости от скорости потока. Сравнение расчетных величин потерь давления с натурным экспериментом показало достаточное для инженерных расчетов совпадение в области повышенных скоростей транспортирования, а также может использоваться при определении критической скорости.

**КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ, ПНЕВМАТИЧЕСКИЙ ТРАНСПОРТ, СЫПУЧИЕ МАТЕРИАЛЫ, УДЕЛЬНЫЕ
ПОТЕРИ ДАВЛЕНИЯ, КРИТИЧЕСКАЯ СКОРОСТЬ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ**

S. V. Voitsekhovskii

Automobile and Road Institute of Donetsk National Technical University, Gorlovka

**Influence of the Flow Swirling on the Friction Coefficient Along the Length for Pneumatic
Transportation of Bulk Materials**

The use of flow swirling in systems of the pneumatic transport of bulk materials allows to reduce the speed of transportation below the critical values available with a direct-flow. Or, at the same speed, increase the concentration of the material and the performance of the pneumatic transportation system. Along with energy savings, this also reduces the pipeline wear and the degradation of transported particles. At the same time, the methods for calculating pneumatic transport systems with flow swirling require additional research.

For this purpose, the dependences of the friction coefficient for a swirling two-phase flow were experimentally obtained for three types of materials (coal dust, ash, and polystyrene). It is established that the relative friction coefficient mainly depends on two dimensionless parameters: the mass concentration of the solid phase and the degree of the flow swirling. As a result, the dependence of the friction coefficient on these two dimensionless parameters was derived and the calculation of specific pressure losses for transportation depending on the flow rate was made. The comparison of the calculated values of pressure losses with natural experiment showed sufficient for engineering calculations coincide in the area of increased transportation speeds, and can also be used in determining the critical speed.

**FRICION COEFFICIENT, PNEUMATIC TRANSPORT, BULK MATERIALS, SPECIFIC PRESSURE LOSS,
CRITICAL TRANSPORTATION SPEED**

Сведения об авторе:

С. В. Войцеховский

Телефон: +38 (071) 427-26-33

Эл. почта: svoytsekhovsky@gmail.com

Статья поступила 13.09.2022

© С. В. Войцеховский, 2022

Рецензент: Н. И. Мищенко, д-р техн. наук, проф., АДИ ГОУВПО «ДОННТУ»