

С. В. Войцеховский, канд. техн. наук

**Автомобильно-дорожный институт (филиал)
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Донецкий национальный технический университет»
в г. Горловка**

ПОТЕРИ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВАНИИ ЗОЛЫ ЗАКРУЧЕННЫМ ПОТОКОМ СЖАТОГО ВОЗДУХА В ТРУБОПРОВОДЕ

Проведены исследования по определению потерь давления при пневматическом транспортировании золы закрученным потоком сжатого воздуха в зависимости от массовой концентрации материала при различных параметрах закрутки. Установлено, что закрутка потока позволяет снизить скорость воздуха без выпадения материала в осадок и возникновения завалов, а также повысить концентрацию транспортируемого материала.

Ключевые слова: пневматический транспорт, сыпучий материал, потери давления, параметр закрутки потока, массовая концентрация материала

Введение

Системы пневматического транспорта мелкодисперсных материалов широко используются в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства. Они обладают целым рядом достоинств по сравнению с другими видами транспорта: простота конструкции, невысокая стоимость и эксплуатационные расходы, возможность создания заданной конфигурации транспортной линии (включая горизонтальные и вертикальные участки), простота обслуживания, экологическая безопасность, интегрирование в другие транспортные линии и технологические процессы (сушка, сепарация) и т. д. Вместе с тем режим работы систем пневматического транспорта характеризуется сравнительно невысокой массовой концентрацией транспортируемого материала (порядка 5–20 кг/м³) при достаточно высокой скорости воздушного (несущего) потока, необходимой для устойчивого режима транспортирования. Так, в начале транспортного трубопровода скорость потока лежит в пределах 10–20 м/с, а в конце трассы (по мере снижения давления и расширения воздуха) эта скорость может достигать 60–90 м/с [1]. Что приводит к увеличению износа транспортного трубопровода, повышенному расходу воздуха и измельчению транспортируемого материала (что является проблемой для предприятий органической химии, пищевой промышленности и сельского хозяйства). Простое снижение расхода (и скорости) воздушного потока не решает данной проблемы, поскольку при низкой скорости происходит выпадение материала на дно трубопровода с образованием завалов, пробок, и, как следствие, – неустойчивому режиму транспортирования.

Одним из способов преодоления указанных недостатков является использование закрутки транспортирующего потока воздуха. Заметим, что в целом влияние закрутки потока на параметры течения в трубопроводе оценивается негативно. Но в ряде работ [2, 3] отмечается, что закрученный поток создает дополнительную подъемную силу на начальном участке трубопровода, что позволяет снизить его скорость при сохранении устойчивого режима транспортирования. По мере движения потока по транспортной магистрали закрутка затухает, но за счет снижения давления скорость увеличивается, что препятствует выпадению материала и возникновению пробок. Таким образом, исследования по определению влияния степени закрутки потока на характеристики пневмотранспортных систем является важной и актуальной задачей.

Цель работы

Целью работы является определение влияния степени закрутки транспортного потока на потери давления в трубопроводе и связанной с этими потерями энергетической эффективности транспортирования сыпучего материала.

Описание опытной установки

Исследования проводились на опытной установке пневматического транспорта, схема которой представлена на рисунке 1. Установка состояла из стального трубопровода 1 общей длиной 30 м и внутренним диаметром 50 мм. На начальном участке 2 длиной 3 м трубопровод выполнен из стекла, чтобы можно было визуально наблюдать движение материала и отслеживать режимы, при которых начинается выпадение материала на стенки трубы.

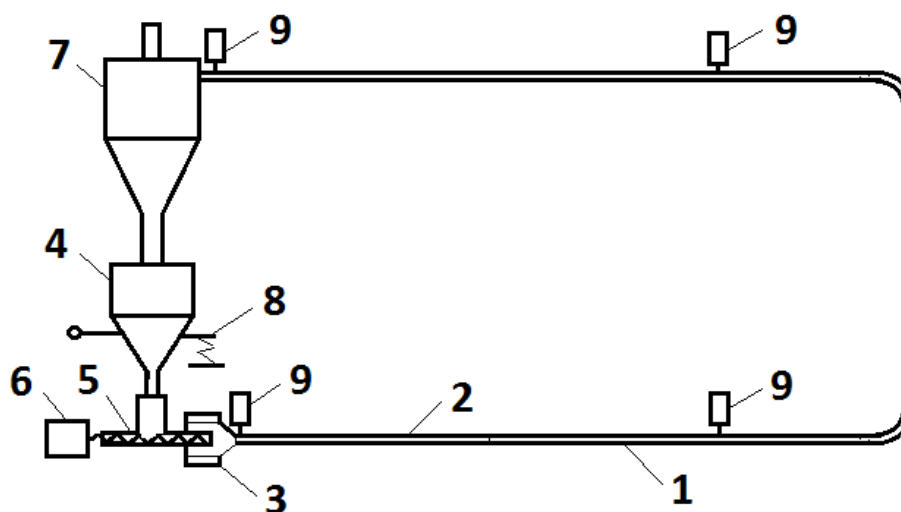


Рисунок 1 – Схема испытательного стенда

Подача воздуха в трубопровод осуществлялась от компрессора (не показан) через комбинированный щелевой завихритель 3 с изменяемой площадью тангенциальных подводов, что позволяло регулировать степень закрутки потока на входе в трубопровод от нуля (без закрутки) до максимального значения 0,5. Подача сыпучего материала осуществлялась из промежуточной камеры 4 с помощью шнекового питателя 5, приводимого во вращение электродвигателем 6 за время t . Перед каждым испытанием производилось взвешивание объема сыпучего материала, находящегося в камере, с помощью пружинных весов 8. В конце трубопровода установлен пылеуловитель циклонного типа 7. В начале и конце магистрали, а также с интервалом 10 м вдоль трубопровода установлены датчики давления 9 типа АТМ, расход воздуха определялся по перепаду давления на диафрагме (не показана). Тип транспортируемого материала: зола – диаметр частиц 40–80 мкм, взвешенная плотность 3100 кг/м³ [4].

Массовая концентрация материала рассчитывалась по соотношению измеренных средних массовых расходов материала G_m и воздуха G_g [5]:

$$m_t = \frac{G_m}{G_g}. \quad (1)$$

Средний массовый расход материала рассчитывался как отношение массы материала m , подаваемого в транспортную магистраль с помощью шнекового питателя, за время t :

$$G_m = \frac{m}{t}. \quad (2)$$

Начальная (на входе в трубопровод) интенсивность закрутки рассчитывалась из соотношения тангенциального G_s^t и осевого G_s^a массовых расходов воздуха [6]:

$$\Lambda = \frac{G_s^t}{G_s^a}. \quad (3)$$

Таким образом суммарный массовый расход воздуха в трубопроводе:

$$G_s = G_s^t + G_s^a. \quad (4)$$

Результаты экспериментальных исследований

На рисунке 2 представлена зависимость потерь давления вдоль трубопровода от массовой концентрации материала при различных параметрах закрутки потока. Для наглядности потери давления приведены в безразмерный вид:

$$\Delta \bar{p} = \frac{\Delta p_m}{\Delta p_a}. \quad (5)$$

В данном выражении потери давления в трубопроводе при движении закрученного двухфазного потока Δp_m отнесены к потерям давления для чистого воздуха Δp_a и при отсутствии закрутки ($\Lambda = 0$), полученным при таких же значениях скорости чистого воздуха V_a . Это имеет смысл, поскольку потери давления при пневматическом транспортировании принято рассчитывать по известной формуле Дарси, как и для однофазного потока, с той разницей, что вводится поправка на коэффициент потерь давления на трение от составляющей твердой фазы [7, 8]:

$$\Delta p_m = \lambda_m \frac{L}{d} \frac{\rho V_a^2}{2}, \quad (6)$$

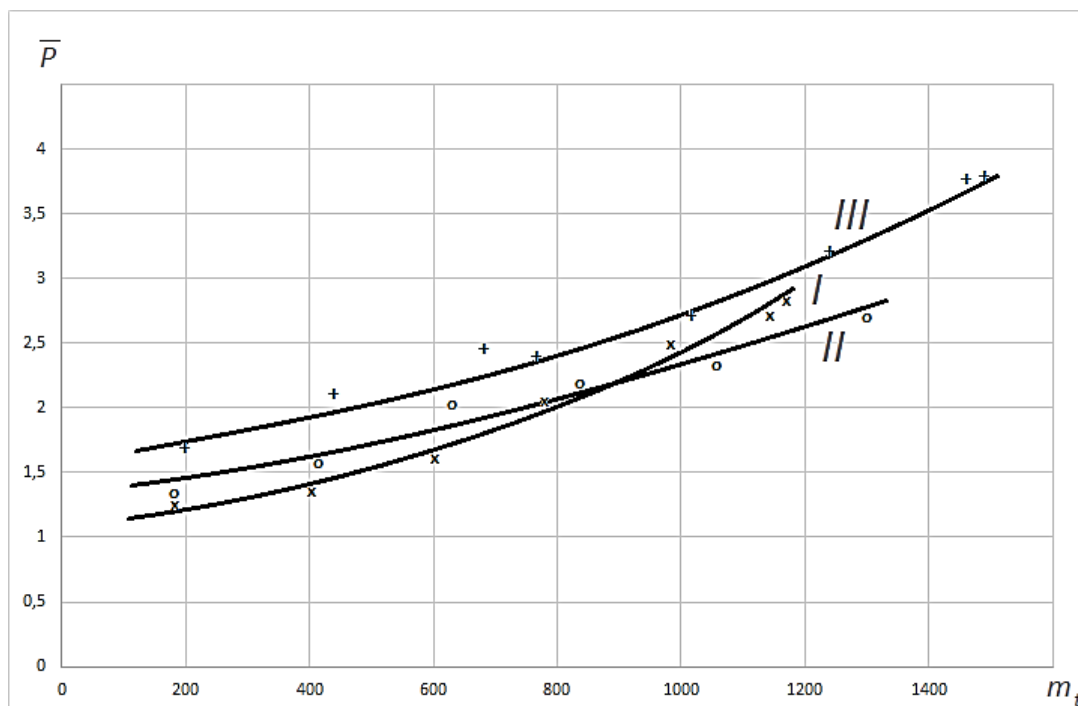
где λ_m – коэффициент потерь давления на трение двухфазного потока,

ρ – плотность воздуха,

L и d – длина и внутренний диаметр трубопровода.

Как можно заметить из приведенных на рисунке 2 зависимостей, при невысоких концентрациях сыпучего материала ($m_t \leq 100$) потери давления при наличии закрутки превышают аналогичные значения для незакрученного потока. Это объясняется дополнительными затратами энергии на создание закрутки, при том, что при такой концентрации материала его выпадения в осадок не наблюдалось и при отсутствии закрутки. При повышении концентрации (до $m_t = 500$ – 800) эта тенденция по-прежнему сохраняется, хотя уже не так выражена. Но с дальнейшим повышением концентрации влияние закрутки уже начинает положительно сказываться на общих потерях давления, и при m_t свыше 1200 эти потери становятся ниже почти на 15 % (при $\Lambda = 0,2$). В то же время при более высоком параметре закрутки ($\Lambda = 0,5$) потери давления все еще превышают таковые для незакрученного потока.

Следует отметить, что при такой концентрации для незакрученного потока уже начинает проявляться выпадение материала в осадок и его накапливание на стенках трубопровода в виде завалов. И дальнейшее повышение концентрации нежелательно в виду возникновения нестабильного режима транспортирования. В то же время для потока с высокой степенью закрутки ($\Lambda = 0,5$) выпадения в осадок не наблюдалось и режим транспортирования оставался стабильным (без пульсаций давления) вплоть до концентраций $m_t = 1500$ (т. е. выше на 20 %, чем при $\Lambda = 0,2$). Поэтому на рисунке линии, соответствующие закрученному потоку, более пологие по сравнению с незакрученным потоком.



(линия I – при $\Lambda = 0$; линия II – при $\Lambda = 0,2$; линия III – при $\Lambda = 0,5$)

Рисунок 2 – Зависимость потерь давления от массовой концентрации материала

Выводы

1. Получены экспериментальные зависимости потерь давления от массовой концентрации материала при пневматическом транспортировании золы в сравнении с незакрученным потоком и потоком с различной степенью закрутки ($\Lambda = 0-0,5$).

2. Установлено, что закрутка потока при невысоких и средних значениях массовой концентрации сыпучего материала ($500 \leq m_t \leq 800$) не приводит к снижению потерь давления по сравнению с прямоточным потоком без закрутки.

3. При повышении массовой концентрации вплоть до $m_t = 1200$ и выше при умеренной степени закрутки ($\Lambda = 0,2$) потери давления ниже на 15 %, чем у незакрученного потока. Более высокая степень закрутки ($\Lambda = 0,5$) позволяет производить транспортирование материала с более высокой концентрацией материала (до $m_t = 1500$, т. е. на 20 % выше) без его выпадения в осадок и образования пробок и завалов.

4. Результаты исследования могут быть учтены при проектировании систем пневматического транспорта сыпучих материалов, использующих закрутку потока для повышения эксплуатационных характеристик данных систем.

Список литературы

1. Вишня, Б. Л. Пневмотранспорт. Расчеты, схемы, оборудование / Б. Л. Вишня, Б. С. Дроздов, В. Т. Стефаненко. – Екатеринбург : Сократ, 2010. – 98 с.
2. Experimental study high-density gas-solids flow in a new coupled circulating fluidized bed / Z. Q. Li, C. N. Wu, F. Wei, Y. Jin // Powder Technology. – 2004. – № 139. – P. 214–220.
3. Чальцев, М. Н. Моделирование двухфазного закрученного потока / М. Н. Чальцев, С. В. Войцеховский // Научные труды Донецкого национального технического университета. Серия горно-электромеханическая. – 2002. – № 51. – С. 194–199.
4. Прошунин, Ю. Е. Теория и расчет процесса истечения углеродсодержащих сыпучих материалов из аппаратов / Ю. Е. Прошунин. – Новокузнецк : Сибирский государственный индустриальный университет, 2001. – 202 с. – ISBN 5-7806-0010-4.

5. Афанасьев, А. И. Основы расчета пневматических устройств (ПУ) для транспортирования сыпучих смесей / А. И. Афанасьев, В. Я. Потапов, П. А. Костюк // *Фундаментальные исследования*. – 2015. – № 10. – С. 9–11.
6. Азаров, В. Н. Применение закрутки потока в системах аспирации на предприятиях строительной индустрии / В. Н. Азаров, Д. П. Боровков // *Строительные материалы*. – 2012. – № 5 (689). – С. 64–67.
7. *Pneumatic Conveying of Solids: A Theoretical and Practical Approach* / G. E. Klinzing, F. Rizk, R. Marcus, L. S. Leung. – 3-rd ed. – Dordrecht ; Heidelberg ; London ; New York : Springer, 2010. – 599 p. – ISBN 978-90-481-3608-7. – URL: [https://dl.libcats.org/genesis/481000/ccb329233ee366eee8543e4a54398c73/_as/\[F._Rizk,_R._Marcus,_L.S._Leung,_G.E._Klinzing\]_Pn\(libcats.org\).pdf](https://dl.libcats.org/genesis/481000/ccb329233ee366eee8543e4a54398c73/_as/[F._Rizk,_R._Marcus,_L.S._Leung,_G.E._Klinzing]_Pn(libcats.org).pdf). – Текст : электронный.
8. Войцеховский, С. В. Влияние закрутки потока на коэффициент трения по длине при пневматическом транспортировании сыпучих материалов / С. В. Войцеховский // *Вести Автомобильно-дорожного института = Bulletin of the Automobile and Highway Institute*. – 2022. – № 3(42). – С. 7–12.

С. В. Войцеховский

Автомобильно-дорожный институт (филиал)

*федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Донецкий национальный технический университет» в г. Горловка*

**Потери давления при транспортировании золы закрученным потоком сжатого воздуха
в трубопроводе**

Применение закрутки потока в системах пневматического транспорта сыпучих материалов позволяет снизить скорость транспортирования ниже критических значений, доступных при прямооточном потоке. Либо при той же скорости повысить концентрацию материала и производительность пневмотранспортной системы. Наряду с экономией энергии это позволяет снизить износ трубопровода и деградацию транспортируемых частиц.

Проведены исследования на опытной установке пневматического транспорта с целью определения влияния массовой концентрации материала на потери давления (и энергетическую эффективность) при транспортировке золы закрученным потоком сжатого воздуха с различной степенью закрутки. Установлено, что умеренная степень закрутки позволяет снизить потери давления в транспортном трубопроводе на 15 %, а более высокая степень закрутки позволяет повысить массовую концентрацию материала на 20 % без выпадения материала в осадок и возникновения завалов и пробок. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании систем пневматического транспорта с использованием закрутки потока.

ПНЕВМАТИЧЕСКИЙ ТРАНСПОРТ, СЫПУЧИЙ МАТЕРИАЛ, ПОТЕРИ ДАВЛЕНИЯ, ПАРАМЕТР ЗАКРУТКИ ПОТОКА, МАССОВАЯ КОНЦЕНТРАЦИЯ МАТЕРИАЛА

S. V. Voytsekhovskii

*Automobile and Road Institute (Branch) of the Federal State Budget Educational Institution
of Higher Education «Donetsk National Technical University» in Gorlovka*

**Pressure Losses During Pneumatic Ash Transportation
by Swirling Compressed Air Flow in the Pipeline**

The use of flow swirl in pneumatic transport systems for bulk materials allows for the reduction of the transport speed below critical values available with direct flow, or, at the same speed, for increasing the concentration of the material and the productivity of the pneumatic transport system. Along with energy savings, this reduces pipeline wear and degradation of transported particles.

In order to determine the influence of the material mass concentration on pressure losses (and energy efficiency) during ash transportation by a swirling flow of compressed air with varying degrees of swirling, studies are conducted on a pilot plant for pneumatic transport. It is established that a moderate degree of swirl allows to reduce pressure losses in the transport pipeline by 15 %, and a higher degree of swirl allows to increase the mass concentration of the material by 20 % without the material settling out and the occurrence of blockages and jams. The results of the study can be used in the design of pneumatic transport systems using flow swirl.

PNEUMATIC TRANSPORT, BULK MATERIAL, PRESSURE LOSS, FLOW SWIRLING PARAMETER, MATERIAL MASS CONCENTRATION

Сведения об авторе:

С. В. Войцеховский

Телефон: +7 949 427-26-33

Эл. почта: svoytsekhovsky@gmail.com

Статья поступила 26.12.2024

© С. В. Войцеховский, 2024

*Рецензент: Н. И. Мищенко, д-р техн. наук, проф.,
Автомобильно-дорожный институт
(филиал) ДонНТУ в г. Горловка*