

А.А. Кувшинов

РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»

г. Минск, Республика Беларусь

E-mail: kur@ro.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ПНЕВМАТИЧЕСКОМ ТРАНСПОРТИРОВАНИИ МАТЕРИАЛОВ ПО ГОРИЗОНТАЛЬНОМУ ПНЕВМОПРОВОДУ

Аннотация. Установлены зависимости определения потерь давления при транспортировании материалов по горизонтальному пневмопроводу. Разработан метод, позволяющий определять величину потерь давления с использованием только таких свойств материала, как его конечная скорость и коэффициент кинетического трения.

Ключевые слова: зависимость, потери давления, пневмопровод, кинетическая энергия, частица, материал, аэросмесь.

A.A. Kuvshinov

RUE "NPC NAS of Belarus on Agriculture Mechanization"

Minsk, Republic of Belarus

E-mail: kur@ro.ru

DETERMINATION OF PRESSURE LOSSES DURING PNEUMATIC TRANSPORTATION OF MATERIALS THROUGH A HORIZONTAL PNEUMATIC PIPELINE

Abstract. Dependencies for determining the loss of pressure during transportation of materials on horizontal pneumatic pipeline. A method has been developed that allows you to determine the value of pressure loss using only such material properties as its final speed and coefficient of kinetic friction.

Keywords: dependence, pressure loss, pneumatic pipeline, kinetic energy, particle, material, air mixture.

Введение

В настоящее время существует несколько теоретических методов определения потерь давления при транспортировании материалов в пневмопроводах. Большинство методов основано на ряде допущений и упрощений, которые ограничивают их использование при проектировании систем пневматического транспорта [1]. Например, предполагают, что материал состоит из частиц сферической формы, однородных по размерам. При расчетах также используется предположение, что материал представляет собой слабо сконцентрированную массу, в которой частицы находятся в незначительном взаимодействии друг с другом [2].

Методы определения потерь давления при пневматическом транспортировании вследствие трения частиц, рассчитанные с применением таких допущений, оказываются непригодными для проектирования установок, применяющихся для перемещения неоднородных материалов в реальных условиях [3].

Основная часть

При движении аэросмеси по пневмопроводу кинетическая энергия транспортируемых частиц уменьшается вследствие сопротивления воздушного потока и трения частиц между собой и о стенки пневмопровода [4]. Потери давления в транспортном пневмопроводе можно разделить на две составляющие: потери давления от перемещения воздушного потока dp_b и потери давления от перемещения транспортируемых частиц dp_m , т.е.:

$$dp = dp_B + dp_M, \quad (1)$$

Для рассмотрения потерь давления в горизонтальном пневмопроводе выделим элемент длиной dx . Результирующая сила давления на элемент будет

$$dP = -dpF, \quad (2)$$

где F – площадь пневмопровода.

Сила трения воздушного потока о стенки пневмопровода:

$$dT_B = \tau_B \pi D dx, \quad (3)$$

где τ_B – касательное напряжение между стенками пневмопровода и воздушным потоком; D – диаметр пневмопровода.

Подставив значение касательного напряжения из (3), получим:

$$dT_B = \frac{\lambda_B \rho V_B^2}{4} \frac{\pi D dx}{2}, \quad (4)$$

где λ_B – коэффициент трения воздуха о стенки пневмопровода; V_B – скорость воздушного потока; ρ – плотность воздуха.

Против направления транспортирования действует также сила сопротивления движению частиц материала dQ_M . Применив для нашего случая закон Ньютона, получим:

$$dP - dT_B - dQ_M = dG_B a_B. \quad (5)$$

Подставив значения составляющих из выражений (2), (3) и (4) в уравнение (5), получим:

$$-dpF - \frac{\lambda_B \rho V_B^2}{4} \frac{\pi D dx}{2} - dQ_M = dG_B a_B, \quad (6)$$

где dG_B – масса воздуха; a_B – ускорение воздушного потока на участке dx , которое можно выразить следующим образом:

$$a_B = \frac{V_B dV_B}{dx}, \quad (7)$$

С учетом (7) и проведя несложные преобразования, получим потери давления:

$$dp = -\lambda_B \frac{dx \rho V_B^2}{D} - \rho V_B dV_B - \frac{dQ_M}{F}, \quad (8)$$

Знак минуса показывает, что с увеличением x давление падает. Первые два члена правой части уравнения представляют собой потери давления воздушного потока, а третий – потери давления от присутствия частиц материала в воздухе. Потери давления воздушного потока состоят из потерь на трение воздуха в пневмопроводе и потерь на ускорение транспортирующего воздуха.

Потери давления, вызываемые присутствием частиц материала в воздушном потоке, определяются по уравнению:

$$dp_M = -\frac{dQ_M}{F}, \quad (9)$$

Для элементарной длины пневмопровода можно применить уравнение движения:

$$dQ_M - dT_M = dG_M a_M, \quad (10)$$

где dQ_M – сила сопротивления движению частиц материала; dT_M – сила трения частиц материала; dG_M – масса частиц материала; a_M – ускорение частиц материала.

Подставив в уравнение (9) значение dQ_M из выражения (10) и проведя преобразования, получим:

$$\frac{dQ_M}{F} - \frac{dT_M}{F} = \frac{dG_M a_M}{F}, \quad (11)$$

или

$$\frac{dQ_M}{F} = \frac{dG_M}{F} \left(\frac{dT_M}{dG_M} + a_M \right). \quad (12)$$

Учтем действующую против направления движения силу трения, определяемую по данным [3] из выражения:

$$dT_M = dG_M \frac{K_M V_M^2}{2D}, \quad (13)$$

где K_M – коэффициент трения материала о стенки пневмопровода; V_M – мгновенная скорость движения частиц материала.

Масса материала, приходящаяся на единицу объема пневмопровода:

$$\frac{dG_M}{F dx} = \frac{\mu V_B \rho}{V_M} dx, \quad (14)$$

Подставив выражения (13) и (14) в уравнение (12), получим:

$$\frac{dQ_M}{F} = \frac{\mu V_B \rho}{V_M} dx \left(\frac{K_M V_M^2}{2D} + a_M \right), \quad (15)$$

Отсюда потери давления, вызванные наличием материала в воздушном потоке:

$$dp_M = -\frac{\mu V_B \rho K_M V_M}{2D} dx - \mu V_B \rho dV_M, \quad (16)$$

так как

$$a_M = \frac{V_M dV_M}{dx}.$$

Первая составляющая выражения (16) представляет потери давления от трения движущихся частиц о стенки пневмопровода:

$$dp_{MT} = -\mu \frac{K_M}{D} \frac{V_M}{V_B} \frac{\rho V_B^2}{2} dx. \quad (17)$$

Приведенную зависимость перепишем в виде:

$$dp_{MT} = -\mu \frac{K_M}{D} \frac{V_K}{V_B} \frac{\rho V_B^2}{2} \frac{V_M}{V_K} dx, \quad (18)$$

где V_K – конечная скорость движения частицы материала.

Это уравнение справедливо при разгоне, т.е. когда изменяется скорость частиц материала V_M .

При установившемся движении отношение $V_M/V_K = 1$, тогда выражение (18) имеет вид:

$$dp_{MT} = -\mu \frac{\lambda_M}{D} \frac{\rho V_B^2}{2} dx, \quad (19)$$

где λ_M – коэффициент трения частиц материала в пневмопроводе при установившемся движении,

$$\lambda_M = K_M \frac{V_K}{V_B}. \quad (20)$$

Из приведенных уравнений видно, что коэффициент трения материала λ_m при установившемся движении зависит от постоянной K_m , которая зависит от рода транспортируемого материала, степени шероховатости стенок пневмопровода и наклона пневмопровода.

Второй составляющей выражения (16) являются потери давления на ускорение материала:

$$dp_{\text{мy}} = -\mu \rho V_m dV_m = -\mu \frac{\rho V_B^2}{2} \frac{2dV_m}{V_B}. \quad (21)$$

Эти потери давления встречаются лишь при ускоренном движении материала, например, за питателем или отводом. Встречаются эти потери и в прямолинейном пневмопроводе высоконапорных установок, если воздушный поток движется ускоренно вследствие расширения.

Подставив значение выражения (2), (4) и (13) в уравнение (5) и интегрируя в пределах от $x = 0$ до $x = L$, получим общие потери давления в горизонтальном пневмопроводе:

$$dp = -\lambda_B \frac{L}{D} \frac{\rho V_B^2}{2} - \frac{\rho V_B^2}{2} - \mu \lambda_m = \frac{L}{D} \frac{\rho V_B^2}{2} - \mu \frac{2V_m}{V_B} \frac{\rho V_B^2}{2}. \quad (22)$$

Из уравнения (22) видно, что потери давления в пневмопроводе зависят от скорости и ускорения воздуха и частиц материала, плотности воздуха, геометрических параметров системы, коэффициента трения воздуха и частиц материала о стенки транспортного пневмопровода и массовой концентрации аэросмеси. При использовании уравнения (22) основная трудность заключается в определении значения коэффициента трения частиц материала в пневмопроводе λ_m , зависящего от многих факторов. Этот коэффициент входит в составляющую потерь давления, вызванных наличием материала в воздушном потоке.

Преобразуем уравнение (19) для расчета dp_m в случае разгона и установившегося движения частиц материала. Используем для этих целей уравнение Невье-Стокса:

$$-\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} + \nu \left(\frac{d^2 V_B}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dV_B}{dr} \right) + R = 0, \quad (23)$$

где p – статическое давление; ν – кинематическая вязкость воздуха; R – силы, действующие на единицу длины потока.

Так как второй член левой части уравнения (23) выражает потери давления от перемещения воздушного потока, то в соответствии с выражением (1) можно записать:

$$\frac{dp_m}{dx} = \rho R. \quad (24)$$

Обозначив время пребывания в пневмопроводе одной частицы τ , а число частиц, поступающих в пневмопровод в единицу времени, n , получим, что общее количество частиц, содержащееся в пневмопроводе длиной L , будет равно $n \cdot \tau$. Количество частиц, находящихся в единице потока движущейся аэросмеси, пропорционально скорости частиц и поэтому равно R/V_m , где R – постоянная. Поэтому:

$$n\tau = \frac{\pi D^2}{4} \rho k \int_0^L \frac{dx}{V_m} = \frac{\pi D^2}{4} \rho k \int_0^\tau dt = \frac{\pi D^2}{4} \rho k \tau. \quad (25)$$

Продольная аэродинамическая сила, действующая на массу частиц, находящихся в потоке, состоит из сил лобового сопротивления, движущихся в потоке аэросмеси частиц.

Силу лобового сопротивления отдельной частицы можно определить по формуле Ньютона:

$$N = CS\rho \frac{(V_B - V_m)^2}{2}, \quad (26)$$

где C – коэффициент сопротивления отдельной частицы, зависящий от формы тела и состояния ее поверхности; S – миделево сечение тела; N – сила лобового сопротивления.

Для случаев ускоренного движения из формулы (26) определим коэффициент, учитывающий ускорение частицы материала:

$$\Psi = \frac{CS\rho}{2m},$$

где m – масса частицы материала.

С учетом этого сила, действующая на единицу длины потока аэросмеси:

$$R = N \frac{k}{V_M} = m\Psi(V_B - V_M)^2 \frac{k}{V_M}. \quad (27)$$

Подставляя выражения (25) и (27) в (24), получим:

$$\frac{dp_M}{dp} = \frac{4mn\Psi(V_B - V_M)^2}{\pi D^2 V_M}.$$

Следовательно, потери давления от перемещения частиц материала для случаев ускорения и установившегося движения:

$$dp_M = \frac{4mn\Psi}{\pi D^2} \int_0^L \frac{(V_B - V_M)^2}{V_M} dx = \frac{4mn\Psi}{\pi D^2} \int_0^\tau (V_B - V_M)^2 dt. \quad (28)$$

Предположив, что в горизонтальном пневмопроводе перемещается одна частица материала, представим ее уравнение движения в виде:

$$a_M = \Psi(V_B - V_M)^2 - fq, \quad (29)$$

где f – коэффициент кинетического трения между частицей материала и стенкой пневмопровода.

Считаем, что коэффициент кинетического трения соответствует суммарному трению скольжения и столкновений частиц одна о другую и о стенки пневмопровода. Интегрируя уравнение (29) при начальных условиях, получим:

$$V_M = V_B - V_0 \left[\frac{\exp(C_1\tau) + C_2}{\exp(C_1\tau) - C_2} \right], \quad (30)$$

где $V_0 = \sqrt{\frac{fq}{\Psi}}$, $C_1 = 2\Psi V_0$, $C_2 = \frac{V_B - V_M - V_0}{V_B - V_M + V_0}$.

Подставив (30) в (28) и проинтегрировав, получим выражение для определения потерь давления, вызванных наличием частиц материала в воздушном потоке:

$$dp_M = \frac{4mn\Psi V_0^2}{\pi D^2 C_1} \left[C_1\tau - \frac{4C_2}{\exp(C_1\tau) - C_2} + \frac{4C_2}{1 - C_2} \right]. \quad (31)$$

Интегрируя уравнение (30), получаем выражение, которое можно использовать для нахождения времени пребывания в пневмопроводе частицы материала:

$$L = (V_B - V_0)\tau - \frac{1}{\Psi} \lg \left[\frac{\exp(C_1\tau) - C_2}{1 - C_2} \right]. \quad (32)$$

Коэффициент трения частиц материала в пневмопроводе λ_M определим, приравняв правые части уравнений (19) и (31) и подставив значение массовой концентрации аэросмеси:

$$\mu = \frac{dG_M}{dG_B} = \frac{4mn}{V_B \pi D^3 \rho}. \quad (33)$$

Тогда:

$$\lambda_M = \frac{V_0 D}{L V_B} \left[C_1\tau - \frac{4C_2}{\exp(C_1\tau) - C_2} + \frac{4C_2}{1 - C_2} \right]. \quad (34)$$

При определении коэффициента λ_m необходимо учитывать влияние взаимодействия частиц между собой в процессе движения. Из уравнения (26) при $V_0 = 0$ и $V_m = V_k$, используя закон Ньютона, определим коэффициент ускорения частиц при установившемся движении ψ_0 :

$$\psi_0 = \frac{q}{V_k^2}. \quad (35)$$

В уравнении (35) используется величина средней конечной скорости массы частиц, так как она отражает режим движения скоплений материала в воздушном потоке. Конечную скорость частиц массы необходимо определять с учетом изменения плотности воздуха по длине пневмопровода. Для учета взаимодействия частиц между собой в процессе движения введем в уравнение для расчета λ_m в случае разгона показатель уменьшения коэффициента ускорения:

$$\varphi = \frac{\psi V_k^2}{q}. \quad (36)$$

Показатель уменьшения коэффициента ускорения по предварительным данным зависит главным образом от массовой концентрации аэроаэрозоля и определяется экспериментальным путем.

Заключение

В результате проведенных теоретических исследований установлены зависимости, которые можно использовать при практическом определении потерь давления при транспортировании материалов по горизонтальному пневмопроводу. Разработанный метод позволяет определять величину потерь давления с использованием только таких свойств материала, как его конечная скорость и коэффициент кинетического трения.

Список использованных источников

1. Хрусталева, Б.М. Пневматический транспорт / Б.М. Хрусталева, Н.В. Кислов. – Минск : ООО «Информационная служба недвижимости», 1998. – 452 с.
2. Малис, А. Я. Пневматический транспорт для сыпучих материалов / А.Я. Малис, М.Г. Касторных. – М.: Агропромиздат, 1985. – 344 с.
3. Чальцев, М. Н. Теория и разработка пневмотранспортных систем //Вестник Донецкого национального технического университета. – 2016. – № 1. – С. 40–43.
4. Пневматический транспорт : пат. 2344983 Российской Федерации, МПК В65G 51/00 / А.Е. Падалко : заявитель Падалко А.Е. – № 2006134922/11 ; заявл. 02.10.2006 ; опубл. 27.01.2009.
5. Селезнев, В.Е. Основы численного моделирования магистральных трубопроводов / В.Е. Селезнев, В.В. Алешин, С.Н. Прялов – М.-Берлин: Директ-Медиа, 2014. – 436 с.

УДК 631.3.072

Поступила в редакцию 02.09.2022

Received 02.09.2022

А. А. Жешко, А. В. Ленский

*РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: azeshko@gmail.com*

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ И ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ РАЦИОНАЛЬНОГО КОМПЛЕКТОВАНИЯ МАШИННО-ТРАКТОРНЫХ АГРЕГАТОВ

Аннотация. Рассмотрены особенности построения функциональной и информационной моделей автоматизированной системы рационального комплектования машинно-тракторных агрегатов для основной обработки почвы.

Ключевые слова: тяговое сопротивление, комплектование машинно-тракторных агрегатов, автоматизированная система, функциональная и информационная модель.