

ТРАНСПОРТ

УДК 621.867.82+621.6.057

М. Н. Чальцев, д-р техн. наук

Автомобильно-дорожный институт

ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Горловка

АНАЛИЗ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ К ИССЛЕДОВАНИЮ АЭРОДИСПЕРСНЫХ ПОТОКОВ ПНЕВМОТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Приведен анализ подходов к решению проблем усовершенствования технико-экономических характеристик пневмотранспортных систем методами классической механики, механики сплошной среды, использования эмпирических зависимостей. Опыт решения подобных проблем в родственной области – гидротранспорте сыпучих материалов, но с учетом особенностей аэродисперсного потока, позволяет создать научную базу для разработки обобщенных методов аэродинамического расчета пневмотранспортных трубопроводов и питателей. Определены перспективные направления развития математических методов расчета аэродисперсных потоков пневмотранспортных систем.

Ключевые слова: пневматический транспорт, аэродисперсный поток, аэродинамический расчет, сыпучий материал, твердая частица

Введение

Пневматическое транспортирование твердых дисперсных материалов широко применяется во многих отраслях промышленности, связанных с производством, переработкой и хранением разного рода сыпучих грузов. Пневмотранспортные системы (ПТС) просты по своей конструкции, компактны, защищают грузы от атмосферных воздействий, а окружающую среду – от запыления.

Методы аэродинамического расчета трубопроводов ПТС разрабатывали Ф. Г. Зуев, Г. М. Островский, А. И. Волошин, Г. Ф. Костюк, С. И. Криль, Я. Урбан, W. Siegel, G. E. Klinzing, R. D. Marcus, F. Rizk, D. Mills, M. Bradley, C. Ratnayake и др. [1–14]. В исследованиях этих ученых наиболее полно раскрыты закономерности процессов пневмотранспортирования, представлены результаты экспериментальных исследований, математические модели и т. д.

Цель работы

Анализ математических методов расчета аэродисперсных потоков пневмотранспортных систем.

Изложение основного материала исследования

Для реализации теоретического подхода к изучению аэродисперсных потоков могут быть использованы многие известные методы классической механики, механики сплошной среды, термо- и гидродинамики, теории подобия и т. д. Рассмотрим некоторые из них в плане возможностей их практического использования в практике проектирования пневмотранспортных систем.

Методы классической механики

Произвольное движение твердой частицы в теории классической механики рассматривается как слагаемое вращательного движения вокруг центра инерции частицы и поступа-

тельного движения (Н. Н. Бухгольц, Г. М. Финкельштейн) [15, 16]. Для задания произвольного движения рассматриваемой частицы, в качестве обобщенных координат, определяющих ее положение относительно заданной системы отсчета, выбираются три линейные координаты и три угла, называемые углами Эйлера. Все эти обобщенные координаты являются функциями времени.

Движение частицы определяется шестью динамическими уравнениями, которые связывают обобщенные координаты с внешними силами, действующими на частицу. В итоге составляется 9 дифференциальных уравнений и к ним – 12 начальных условий. Если общее количество твердых частиц в потоке равно n то для описания движения системы этих частиц понадобится $9n$ уравнений и $12n$ начальных условий. Необходимо иметь в виду, что в данном поперечном сечении трубопровода могут одновременно находиться десятки тысяч частиц. Выполнение этих условий позволяет определить в любой момент времени не только положение центра инерции каждой из этих частиц в пространстве, занятом движущейся смесью, но и их ориентацию.

Одновременно с уравнениями движения частиц необходимо составлять уравнения движения несущей среды – задача достаточно точная и трудноразрешимая. Попытки решения данной задачи в рамках теории классической механики осуществлены Н. Tachiro, X. Peng, Y. Tomita [17].

Данный метод проектирования ПТС является несовершенным.

Методы механики сплошной среды

К настоящему времени в области механики сплошных сред разработан богатый математический аппарат, успешно используемый в гидро- и аэродинамике, механике сыпучих материалов и т. д. Многофазные среды, к которым относится смесь газ – твердые частицы, не могут быть отнесены к однородным сплошным средам, поскольку они содержат границы раздела фаз как разрывную поверхность. Таким образом, ряд параметров для каждого компонента (фазы), например: плотность, скорость, давление, – не являются непрерывными функциями координат, а их производные на фазовых границах могут обращаться в бесконечность. Это обстоятельство создает определенные трудности при составлении дифференциальных уравнений движения фаз методами механики сплошной среды.

Для преодоления этих трудностей разработаны и используются в практике фундаментальных исследований различные методы осреднения, в рамках которых каждая фаза в отдельности рассматривается как некоторая однородная сплошная среда, заполняющая весь объем, занятый смесью и характеризующаяся приведенной плотностью, полями скоростей, напряжений и другими осредненными параметрами. Использование этих методов считается необходимым, особенно в теории турбулентных взвесенесущих потоков, где они позволяют перейти путем осреднения от резко переменных к более плавным, удобным для анализа характеристикам потока.

На основе механики гетерогенных сред А. И. Волошиным и Б. А. Пономаревым разработана математическая модель двухфазных потоков газ – твердые частицы в пневмотранспортном трубопроводе [3]. Разработанная математическая модель пневмотранспортирования позволяет изучить все возможные режимы движения смеси воздуха и частиц сыпучего материала в трубопроводе, указать пути увеличения производительности и дальности транспортирования материалов с различными физико-механическими свойствами, а также провести оптимизацию параметров для элементов комплекса трубопроводного пневмотранспорта сыпучих материалов крупностью более 5 мм и кускового материала. Однако для материалов с меньшей крупностью частиц эта теория неприемлема.

В механике многофазных сред, благодаря своей наглядности, получили применение методы пространственного, временного и вероятностного осреднения.

Систему дифференциальных уравнений взвесенесущего потока для несжимаемой не-

сущей среды методом вероятностного осреднения получил Г. И. Нигматуллин [18]. Эти уравнения достаточно полно описывают происходящие во взвесенесущем потоке гидродинамические процессы, позволяют выявить особенности переноса твердых частиц турбулентным потоком жидкости. Они являются основой теории потоков рассматриваемого класса.

Недостатком разработанной теории является то, что система осредненных гидродинамических уравнений не замкнута. Она состоит из восьми уравнений и содержит 34 неизвестные величины, в результате чего не может иметь определенного решения.

Фундаментальные исследования, выполненные с применением методов механики сплошной среды, не дали практических результатов.

Эмпирические зависимости

Практически все известные на данный момент методики расчета ПТС построены на базе полного или частичного использования эмпирических зависимостей.

Еще в 20-х годах прошлого столетия И. Гастерштадтом [19], на основании экспериментальных исследований зерновых материалов, впервые было предложено эмпирическое уравнение гидравлического сопротивления для прямолинейного участка трубопровода с установившимся режимом транспортирования:

$$\Delta P_{см} = \Delta P (1 + K \cdot \mu), \quad (1)$$

где ΔP и $\Delta P_{см}$ – потери давления при движении воздуха и его смеси с частицами;

μ – массовый расход твердого материала;

K – опытный коэффициент.

Многочисленными экспериментами было установлено, что в определенных условиях отклонение зависимости (1) от прямой линии невелико и может быть достигнута достаточная точность расчетов при относительно высоких скоростях потока. Формула Гастерштадта в свое время нашла широкое применение в практике расчета ПТС. Этому способствовало техническое состояние пневмотранспортных установок, которые были оборудованы воздухо-двумными машинами низкого давления, с большим расходом воздуха и высокими скоростями движения материала в трубах. В дальнейшем, с освоением выпуска новых компрессоров и воздуходувок повышенного давления, рабочая скорость движения воздуха в материалопроводе стала снижаться, а концентрация материала в смеси стала увеличиваться. В этих условиях формула Гастерштадта уже не давала необходимой точности расчетов. Кроме того, несмотря на проведение экспериментальных исследований в широком диапазоне скоростей движения воздуха и концентраций материала, были получены лишь частные взаимосвязанные значения K , физическая сущность этого коэффициента не была раскрыта.

Дальнейшие поиски более обоснованных зависимостей привели к использованию теоретической формулы Дарси-Вейсбаха, которая была разработана еще в XIX в. для однофазных сред. В 1937 г. Г. Зеглером в соавторстве с П. Шредером были опубликованы результаты широких экспериментальных исследований, на основании которых выведена формула [20]:

$$\Delta P_{см} = \lambda_{см} \frac{L}{D} \frac{u^2}{2} \rho_{см},$$

где $\Delta P_{см}$ – перепад давления;

$\lambda_{см}$ – коэффициент гидравлического трения потока аэросмеси;

$\rho_{см}$ – плотность транспортируемой смеси;

u – средняя по сечению скорость;

D – внутренний диаметр трубы;

L – длина рассматриваемого участка потока.

Эта формула в различных модификациях и в настоящее время является основой для

расчета многих пневмотранспортных систем.

Общепризнанным в настоящее время и широко используемым в практике проектирования систем промышленного пневмотранспорта является принцип расчета полных потерь напора в прямой горизонтальной трубе, основанный на линейной суперпозиции потерь давления при движении чистого воздуха и твердых частиц:

$$\Delta P = \Delta P_g + \Delta P_T, \quad (2)$$

где ΔP – потери давления;

$$\Delta P_g = \lambda \frac{L}{D} \frac{\rho u^2}{2};$$

$$\Delta P_T = \lambda_T \frac{L}{D} \frac{\rho u_T^2}{2}.$$

Если предположить, что $u = u_T$, то выражение (2) можно представить в виде:

$$\Delta P = (\lambda + \lambda_T) \frac{L}{D} \frac{\rho u^2}{2}.$$

Величина λ подробно исследована, ее значение принято определять по формуле Блазиуса (область гидравлически гладких труб):

$$\lambda = 0,316 (\text{Re})^{-0,25},$$

или по формуле Альтшуля (переходная область от гидравлически гладких до гидравлически шероховатых труб):

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{68}{\text{Re}} + \frac{K}{D} \right)^{0,25}.$$

В отличие от λ величина λ_T является весьма сложной функцией и зависит от исходных параметров и режимных факторов пневмотранспортирования, в частности от концентрации материала μ . Поэтому для определения давления ΔP была предложена формула [8]:

$$\Delta P = (\lambda + \mu \lambda_z) \frac{L}{D} \frac{\rho u^2}{2}, \quad (3)$$

которая в настоящее время считается классической и является наиболее употребляемой. В формуле (3) дополнительный коэффициент сопротивления λ_z , обусловленный наличием материала в потоке, рассматривается чаще всего как функция числа Фруда:

$$\lambda_z = f(Fr).$$

Например, в работе М. Weber [2] предлагается зависимость для цемента:

$$\lambda_z = 0,0478 Fr^{-1,45},$$

где Fr – критерий Фруда;

$$Fr = \frac{u_T}{\sqrt{Dg}}.$$

Скорость потока в конце транспортного трубопровода определяется по формуле [2]:

$$u_k = \alpha \sqrt{\rho_T} + \beta L_{np},$$

где α – коэффициент, учитывающий крупность частиц материала;

β – коэффициент, учитывающий характеристики материала;

L_{np} – приведенная длина материалопровода.

Необходимо отметить сравнительно низкую степень точности эмпирических формул.

Погрешность расчетов в отдельных случаях достигает 40 % и более. Повышение точности расчетов, в том числе и в широком диапазоне изменения режимных параметров, может быть достигнуто путем проведения дальнейших широкомасштабных экспериментов. Однако такой путь экономически не эффективен и не всегда позволяет обобщить результаты расчетов при иных условиях эксперимента.

Один из наиболее широкомасштабных проектов экспериментальных исследований был выполнен в Великобритании в 80-х годах XX в. В проекте участвовали 30 ведущих промышленных фирм Великобритании. На специально построенном полигоне были выполнены эксперименты по транспортированию восьми видов сыпучих материалов по трубопроводам диаметром 50, 80 и 100 мм, длиной от 50 до 160 м с количеством колен вдоль трассы – от 8 до 17. Максимальная производительность системы – 40 т/час для цемента. Результаты исследований изложены в [12] в виде руководства к проектированию ПТС. Однако, несмотря на обилие экспериментальных данных, оформленных в виде диаграмм Миллза, практическое использование этого руководства является затруднительным, т. к. эти данные не были обобщены единой методикой расчета, а их использование для экстраполяции характеристик на другие условия транспортирования (например, для трубопроводов диаметром более 100 мм или длиной более 160 м) не обеспечивает необходимой точности расчетов.

Более эффективными являются такие теоретические основы расчета ПТС, у которых недостаток аналитических связей восполняется ограниченным числом выверенных эмпирических констант. Такие модели называют полуэмпирическими.

Полуэмпирические модели

Примерами построения полуэмпирических моделей пневмотранспортных потоков могут служить работы, выполненные М. Weber, R. Pan и O. Molerus [24–26]. Рассмотрим суть этих моделей.

Weber M. [24] рассматривает аэродисперсный поток как некую однородную среду и в связи с этим с целью уточнения расчетов предлагает заменить в формуле (3) комплексный коэффициент трения $(\lambda + \mu\lambda_z)$ на коэффициент трения всей смеси $\lambda_{см}$ и определять этот коэффициент на основании экспериментальных данных по формуле

$$\lambda_{см} = \frac{2\Delta PD}{\rho u^2 L}.$$

Weber M. [24] считает эмпирический коэффициент $\lambda_{см}$ неизменным для данного сыпучего материала и независимым от геометрических параметров трубопровода. Этот метод пригоден для расчетов взвешенных аэродисперсных потоков.

Наоборот, R. Pan и P. Wurch [25] рассматривают аэродисперсный поток как комбинацию двух отличающихся друг от друга компонентов (газ и твердые частицы), где совместное движение каждого из них проходит по своим законам. Они предлагают следующие эмпирические формулы для определения потерь давления для каждой фазы и дальнейшего суммирования этих составляющих:

– на прямолинейных участках

$$\Delta P_{\Pi} = \Delta P_{\Pi B} + \Delta P_{\Pi T} = (\lambda + \mu \lambda_T) \frac{\rho u^2}{2D} \Delta L,$$

где ΔP_{Π} – суммарные потери давления на прямолинейных участках трубопровода;

$\Delta P_{\Pi B}$ – потери давления от движения воздуха на прямолинейных участках;

$\Delta P_{\Pi T}$ – потери давления от движения твердых частиц на прямолинейных участках;

λ_T – коэффициент трения для твердых частиц на прямолинейных участках трубопровода;

– в коленах трубопровода

$$\Delta P_K = \Delta P_{KB} + \Delta P_{KT} = (\zeta + \mu \zeta_T) \frac{\rho_0 u_0^2}{2},$$

где ΔP_K – суммарные потери давления из-за изгиба (колена) трубопровода;

ΔP_{KB} – потери давления от движения воздуха в колене;

ΔP_{KT} – потери давления из-за наличия в потоке твердых частиц;

ζ – коэффициент трения воздуха в колене;

ζ_T – коэффициент трения твердых частиц о стенки колена.

$$\lambda_T = x_1 \mu^{x_2} Fr_{cp}^{x_3} \rho_{cp}^{x_4},$$

где x_1, x_2, x_3, x_4 – эмпирические коэффициенты;

Fr_{cp} – среднее значение числа Фруда, соответствующего среднему значению плотности воздуха ρ_{cp} на прямолинейном участке трубопровода.

$$\zeta_T = y_1 \mu^{y_2} Fr_0^{y_3} \rho_0^{y_4},$$

где y_1, y_2, y_3, y_4 – эмпирические коэффициенты;

$Fr_0 = \frac{u_0}{\sqrt{gD}}$ – значение числа Фруда на выходе из колена, соответствующее плотности

воздуха ρ_0 .

Эмпирические коэффициенты x_i и y_i определяются экспериментально для данного сыпучего материала. Значения этих коэффициентов могут быть применены для расчета пневмотранспортных трасс любой конфигурации различных диаметров и количества колен.

Molerus O. [26] предложил использовать для расчета аэродисперсных потоков два безразмерных параметра:

$$\lambda_p = \frac{2(\Delta P_T / L) D}{\mu \rho u^2};$$

$$Fr = \frac{u}{\sqrt{gD}},$$

где λ_p – безразмерное значение падения давления для твердых частиц;

ΔP_T – падение давления для твердых частиц (Па).

В данном случае комбинация параметров λ_p и Fr полностью определяет взвешенный аэродисперсный поток в трубе. Основываясь на этом предположении, он предлагает провести экспериментальный тест, чтобы получить необходимые данные для расчета требуемых параметров в координатах $\lambda_p - Fr$ и использовать полученную кривую для расчета потерь давления в любом трубопроводе для условий тестируемого материала.

Практика показывает, что полуэмпирические модели не решают проблему уточнения гидравлического расчета аэродисперсных потоков и при том требуют наличия сложных экспериментальных установок.

Метод расчета интегральных параметров

Дальнейшее расширение сферы использования пневмотранспорта требует современных и надежных инженерных методов аэродинамического (гидравлического) расчета ПТС.

Научно обоснованные методы расчета интегральных параметров пневмотранспортирования, базирующиеся на аэродинамических уравнениях неразрывности, энергетического баланса, гидравлических сопротивлений, а также на уравнениях состояния газа предложены автором для установившегося потока аэроземеси, как сжатой среды [27–30].

В рамках механики сплошной двухфазной среды построено обобщенное уравнение Бернулли для неизотермического постоянного движения газозвеси для случая адиабатического процесса изменения состояния газа. Это уравнение вдоль потока имеет вид:

$$\left(c_{pm} \frac{(1-c_p)}{(1-c)^2} \beta + c_{pm.T} \frac{c_p^2}{c^2} \beta_T\right) \frac{u_{cm}^2}{2g} + \frac{P}{\rho_p g} + \frac{c_{pm} RT}{(K-1)g} + z + h_n = \text{const}, \quad (4)$$

где c_{pm} , $c_{pm.T}$ – расходная массовая концентрация газа и твердого материала;

c_p , c – расходная и истинная объемные концентрации твердых частиц;

β , β_T – коэффициент Кориолиса для потока газовой и твердой фаз газозвеси;

u_{cm} – средняя по сечению трубы скорость потока газозвеси;

P – статическое давление;

ρ_p , T – расходная плотность и температура (К) газозвеси;

R – универсальная газовая постоянная;

K – показатель адиабаты;

z – положение центра масс газозвеси относительно плоскости сравнения;

h_n – потери напора;

g – ускорение силы тяжести.

Уравнение (4) учитывает кроме скоростного и пьезометрического напоров температурный напор

$$\frac{c_{pm} RT}{(K-1)g},$$

который физически выражает тепловую энергию единицы веса газовой фазы газозвеси.

В случае низконапорного изотермического движения газозвеси при относительно малых перепадах давления на концах трубы, когда сжимаемостью газа можно пренебречь, уравнение (4) преобразуется:

$$\rho_f \frac{u_{cm}^2}{2} + P + \rho_p gz + \Delta E_M = \text{const} \quad (\text{вдоль потока}); \quad (5)$$

$$\rho_f = \left[\rho \frac{(1-c_p)^3}{(1-c)^2} + \rho_T \frac{c_p^3}{c^2} \right] \beta_{cp};$$

$$\rho_p = \rho_T c_p + \rho(1-c_p);$$

$$\beta_{cp} = \frac{1}{2}(\beta + \beta_T);$$

$$\Delta E_M = \rho_p g h_n,$$

где ρ_f – эффективная плотность газозвеси;

ρ_p – расходная плотность газозвеси;

ρ , ρ_T – плотность газа и твердых частиц;

ΔE_M – потеря удельной (в единицах объема) полной механической энергии.

Уравнение (4) дополняется гидравлическим уравнением неразрывности:

$$\rho_p u_{cm} S = \text{const}, \quad (6)$$

где S – площадь поперечного сечения трубы.

В отдельном случае равномерного движения газозвесей в трубах общее выражение для потери удельной потенциальной энергии давления на трение имеет вид:

$$\Delta E_M = \lambda_{cm} \frac{L}{D} \rho_f \frac{u_{cm}^2}{2}, \quad (7)$$

где λ_{cm} – гидравлический коэффициент трения для потока газозвеси;

L , D – длина и диаметр трубы.

Здесь важно отметить, что в выражении (7) учитывается удельная кинетическая энергия потока, которая входит в уравнение Бернулли (5) и выражается через эффективную плотность газозвеси (ρ_f).

Уравнения (5), (6) и (7) являются базовыми для разработки научно обоснованных методов гидравлического расчета основных параметров пневмотранспортирования. При разработке этих методов расчетов выявлено, что, учитывая характер влияния твердой фазы газозвеси на величину удельного перепада давления и критической скорости потока, сыпучие материалы, которые перекачиваются потоком воздуха, целесообразно условно разделить на две категории: мелкодисперсные и крупнодисперсные. К мелкодисперсным относятся измельченные порошковые материалы, средняя крупность которых не превышает 100 мкм, а число Рейнольдса $Re_r = \frac{d_T w}{\nu} \leq 6$. Все другие сыпучие материалы относятся к крупнодисперсным.

Ниже приведены полученные расчетные формулы для определения удельного перепада давления $\frac{\Delta P_{TP}}{L}$ и критической скорости пневмотранспортирования $u_{кр}$ при равномерном движении газозвеси в прямых горизонтальных трубах.

Удельный перепад давления:

а) для крупнодисперсных твердых материалов:

$$\frac{\Delta P_{TP}}{L} = \bar{\lambda}_f \bar{\rho}_f (1 + \mu_v)^2 \lambda \frac{\rho u^2}{2D};$$

$$\bar{\rho}_f = \frac{(1-c_p)^3}{(1-c)^2} + \Delta_T c_p \left(\frac{c_p}{c} \right)^2;$$

$$\bar{\lambda}_f = \bar{\lambda}_{f,кп} \left(1 - A \cdot th \left[1,276 \left(1 - \frac{u_{кп}}{u} \right) \cdot \lg Re_T \right] \right), \quad (8)$$

$$\lambda_{f,кп} = 1 + 0,667 \left(\lg \frac{Re_T}{6} \right)^{1,94} \cdot th(0,93\mu_v^{0,8}),$$

$$\bar{A} = th \left[b (\bar{\lambda}_{f,кп} - 1)^{0,7074} \right],$$

$$b = 1,875 - 0,474 \lg Re_T;$$

$$\bar{\lambda}_f = \frac{\lambda_{см} \cdot \beta_{ср}}{\lambda}; \quad \bar{\rho}_f = \frac{\rho_f}{\rho}; \quad \Delta_T = \frac{\rho_T}{\rho},$$

где $\frac{\Delta P_{TP}}{L}$ – удельные потери давления на участке трубопровода длиной L;

$\bar{\lambda}_f, \bar{\rho}_f$ – относительные значения коэффициента трения и эффективной плотности газозвеси;

$u_{кп}$ – критическая скорость движения воздуха в транспортном трубопроводе;

λ – гидравлический коэффициент трения в соответствующем потоке чистого (без твердых частиц) воздуха;

u – средняя скорость воздуха;

μ_v – соотношение объемных расходов твердого материала и воздуха;

б) для мелкодисперсных твердых материалов:

$$\frac{\Delta P_{TP}}{L} = \bar{\lambda} \bar{\rho} (1 + \mu_v)^2 \lambda \frac{\rho u^2}{2D};$$

$$\bar{\lambda} = \bar{\lambda}_{кп} \left[1 + (0,43 + 0,19 Re_T) \left(1 - \frac{u_{кп}}{u} \right)^2 \right]; \quad (9)$$

$$\bar{\rho} = 1 + (\Delta_T - 1) \frac{\mu_v}{1 + \mu_v};$$

$$\bar{\lambda}_{кп} = \left[1 - (1 - \varphi) th(47,16 \cdot \sqrt{\mu_{v,кп}}) \right] (1 + \mu_{v,кп})^{-2};$$

$$\varphi = 0,127 + (1 + 1,016 Re_T) 0,22 Re_T;$$

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda_{см} \cdot \beta_{ср}}{\lambda}; \quad \bar{\rho} = \frac{\rho_{см}}{\rho}.$$

Зависимости (8) и (9) носят эмпирический характер. Область их применения ограничена значениями $0,0002 \leq \mu \leq 0,1$; $Re_T < 3000$; $u \geq u_{кп}$. При определении величины $\bar{\lambda}$ установлено, что в случае пневмотранспортирования мелкодисперсных твердых материалов величина $\bar{\lambda} < 1$ при $Re_T < 6$. То есть гидравлический коэффициент трения в запыленных пото-

как воздуха меньше аналогичного коэффициента трения в соответствующем потоке чистого воздуха. Это может быть косвенным подтверждением известного эффекта погашения турбулентности в запыленных газовых потоках. В случае пневмотранспортирования крупнодисперсных твердых материалов при $Re_T \geq 6$, $d_T > 100$ мкм величина $\bar{\lambda}_f > 1$, т. е. коэффициент $\lambda_{см} > \lambda$, он свидетельствует о повышенной турбулизации потока газа при наличии в нем крупнодисперсных твердых частиц. В предельном случае, когда число Рейнольдса $Re_T \rightarrow 6$, значение относительных коэффициентов гидравлического трения $\bar{\lambda}$ и $\bar{\lambda}_f$ приближаются к единице.

Разработанная методика характеризуется достаточно удовлетворительной точностью и пригодна для практического использования в широком диапазоне изменения условий пневмотранспортирования.

Заключение

Анализ методов описания и анализа аэродисперсных потоков показал, что отсутствие достаточно обоснованных физических моделей движения смесей воздуха и твердых дисперсных материалов (газовзвесей) по трубам привело к тому, что в практике проектирования и создания пневмотранспортных систем используется множество различных и в большинстве своем эмпирических расчетных формул. Общим недостатком их является ограниченность условиями эксперимента, на основе которых они получены, а иногда и недопустимо низкая степень точности, что вызывает определенные трудности в выборе расчетных формул для данного объекта проектирования.

Одним из путей решения задач, которые связаны с разработкой обоснованных методов аэродинамического расчета ПТС, является использование опыта решения подобных проблем в родственной области – гидротранспорте сыпучих материалов, но с учетом особенностей аэродисперсного потока. Это позволяет создать научную базу для разработки обобщенных методов аэродинамического расчета пневмотранспортных трубопроводов и питателей.

Список литературы

1. Зуев, Ф. Г. Пневматическое транспортирование на зерноперерабатывающих предприятиях / Ф. Г. Зуев. – М.: Колос, 1976. – 344 с.
2. Островский, Г. М. Анализ работы камерного питателя пневмотранспортной установки с подачей газа в пространство над материалом / Г. М. Островский, В. Н. Соколов, А. М. Мельников // Журнал прикладной химии. – 1977. – №4. – С. 826–829.
3. Волошин, А. И. Механика пневмотранспортирования сыпучих материалов / А. И. Волошин, Б. В. Пономарев. – К.: Наукова думка, 2001. – 520 с.
4. Костюк, Г. Ф. Исследование гидродинамики взвесенесущих потоков различной концентрации: дис. доктора техн. наук / Г. Ф. Костюк. – Одесса, 1974. – 380 с.
5. Криль, С. И. Напорные взвесенесущие потоки / С. И. Криль. – К.: Наукова думка, 1990. – 160 с.
6. Урбан, Я. Пневматический транспорт / Я. Урбан. – М.: Машиностроение, 1967. – 253 с.
7. Siegel, W. Experimentelle Untersuchungen zur pneumatischen Förderung Körniger stoffe in waagerechten Rohren und Überprüfung der Ähnlich Keitsgesetze / W. Siegel. – Düsseldorf, 1970.
8. Klinzing, G. E. Pneumatic transport – a review (Generalized phase diagram approach to pneumatic transport) / G.E. Klinzing // Powder technology. – 1987. – №51. – P. 135–149.
9. Klinzing, G.E. Silids flow behavioz in bends: assessing fine solids buildup / G. E. Klinzing // Powder technology. – 2000. №113, P. 124–131.
10. Marcus, R. D. Pneumatic conveying of bulk solids. Notes of short courses of pneumatic conveying / R. D. Marcus // The univ. of Newcastle, NSW, Australia, 1983.
11. Rizk, F. Pneumatic conveying at optimal operation conditions and a solution of Barth's equation / F. Rizk // Pneumotransport 3, Third International Conference on the Pneumatic Transport of Solids in Pipes, 1976, Cranfield, Bedford, England.
12. Mills, D. Pneumatic conveying design guide / D. Mills. – London: Butterworths, 1990. – 526 с.
13. Bradley, M. Pressure losses caused by bends in pneumatic conveying pipelines / M. Bradley // Powder handling

and processing. – 1990. – V2. – № 4. – P. 315–321.

14. Ratnayake, C. A comprehensive scaling up technique for pneumatic transport systems. Thesis. – Porsgrunn, Norway: Telemark University College, 2005. – 299 p.
15. Бухгольц, Н. Н. Основной курс теоретической механики / Н. Н. Бухгольц. – М.: Наука, 1972. – 332 с.
16. Финкельштейн Г. М. Курс теоретической механики / Г. М. Финкельштейн. – М.: Гос. учеб.-пед. изд-во М-ва просвещения РСФСР, 1959. – 443 с.
17. Tachiro, H. Numerical prediction of saltation velocity for gas-solid two-phase flow in a horizontal pipe / H. Tachiro, X. Peng, Y. Tomita // Powder technology. – 1997. – № 91. – С. 141 – 146.
18. Нигматуллин, Г. И. Динамика многофазных сред / Г. И. Нигматуллин. – М.: Наука, 1987. – Ч.1. – 464с.
19. Гастерштадт, И. Пневматический транспорт / И. Гастерштадт. – Л.: Изд. Сев.-Зап. обл. Промбюро ВСНЗ, 1927. – 119 с.
20. Зеглер, Г. Транспортирование зерна пневматическим способом / Г. Зеглер, П. Шредер. – Х.: Госнаучтехиздат Украины, 1937. – 150 с.
21. Смолдырев, А. Е. Трубопроводный транспорт (основы расчета) / А. Е. Смолдырев. – М.: Недра, 1980. – 293 с.
22. Серяков, В. С. Пневматические транспортирующие установки / В. С. Серяков. – М.: Машиностроение, 1977. – С. 224–259.
23. Хрусталева, Б. М. Пневматический транспорт (теория, проектирование, реализация): дис. доктора техн. наук / Б.М. Хрусталева. – М., 1998. – 51 с.
24. Weber, M. Friction of the air and air / solid mixture in pneumatic conveying /M. Weber // Bulk solids handling. – 1999. – V 11. – P. 99 – 102.
25. Pan, R. Scale-up procedures for pneumatic conveying design / R. Pan, P. W. Wypych // Powder handling and processing. – 1992. – V4. – P.167 – 172.
26. Molerus, O. Principles of flow in dispers systems / O. Molerus. – London: Chapman and Hall, 1993. – P. 273.
27. Чальцев, М. Н. О моделировании пневмотранспортных потоков методами теории подобия / М. Н. Чальцев // Горная электромеханика и автоматика. Т. 2. – Донецк: ДонНТУ, 2004. – С. 290 – 295.
28. Чальцев, М. М. Про аналогію деяких закономірностей гідромеханіки пневмо- і гідротранспортних систем / М. М. Чальцев // Вісник (Збірник наукових праць НТУ і ТАУ). – К.: РВВ НТУ, 2000. – Вип. 4. – С. 292 – 295.
29. Чальцев, М. Н. Аналитический метод гидравлического расчета пневмотранспортных трубопроводов / М. Н. Чальцев // Сборник научных трудов Национального горного университета. – Днепропетровск: НГУ, 2004. – № 19. – С. 140–144.
30. Чальцев, М. Н. К вопросу о методиках расчета основных параметров пневмотранспорта сыпучих материалов по горизонтальным трубам / М. Н. Чальцев, С. И. Криль // Прикладна гідромеханіка. – К., 2010. – № 4 (84), Т.12. – С. 36 – 44.

М. Н. Чальцев

Автомобильно-дорожный институт

ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Горловка

**Анализ теоретических подходов к исследованию аэродисперсных потоков
пневмотранспортных систем**

Пневматическое транспортирование твердых дисперсных материалов широко применяется во многих отраслях промышленности, связанных с производством, переработкой и хранением разного рода сыпучих грузов. Пневмотранспортные системы просты по своей конструкции, компактны, защищают грузы от атмосферных воздействий, а окружающую среду – от запыления. Однако дальнейшее расширение сферы использования пневмотранспорта часто сдерживается отсутствием научно обоснованных надежных инженерных методов аэродинамического (гидравлического) расчета пневмотранспортных систем.

Анализ методов описания и анализа аэродисперсных потоков показал, что отсутствие достаточно обоснованных физических моделей движения смесей воздуха и твердых дисперсных материалов (аэросмесей) по трубам привело к тому, что в практике проектирования и создания пневмотранспортных систем используется множество различных и в большинстве своем эмпирических расчетных формул. Общим недостатком их является ограниченность условиями эксперимента, на основе которых они получены, а иногда и недопустимо низкая степень точности, что вызывает определенные трудности в выборе расчетных формул для данного объекта проектирования.

Одним из путей решения задач, связанных с разработкой обоснованных методик аэродинамического расчета ПТС является использование опыта решения подобных проблем в родственной области – гидротранспорте сыпучих материалов, но с учетом особенностей аэродисперсного потока. Это позволяет создать научную базу для разработки обобщенных методов аэродинамического расчета пневмотранспортных трубопроводов и питателей.

ПНЕВМАТИЧЕСКИЙ ТРАНСПОРТ, АЭРОДИСПЕРСНЫЙ ПОТОК, АЭРОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ, СЫПУЧИЙ МАТЕРИАЛ, ТВЕРДАЯ ЧАСТИЦА

M. N. Chaltsev
Automobile and Highway Institute of Donetsk National Technical University, Gorlovka
The Analysis of Theoretical Approaches to the Study of Aerodisperse Flows of the Pneumatic Transport Systems

Pneumatic transportation of hard disperse materials is widely used in many fields of industry connected with production, handling and storage of various kinds of bulk cargo. Pneumatic transport systems are simple in construction, compact and protect cargoes from weather impact and environment from dustiness. However, the further expansion of the pneumatic transport application sphere is often restrained by the lack of scientifically grounded and reliable engineering methods of the aerodynamic (hydraulic) calculation of pneumatic transport systems.

The analysis of the description and analysis technique of aerodisperse flows has shown that lack of sufficiently valid physical models of air mixture and hard disperse materials (aeromixtures) pipe motion led to the fact that in the practice of designing and creation of pneumatic transport systems a lot of various and empirical calculation formula are used. Their common drawback is limited experimental conditions on the basis of which they are obtained and sometimes an unacceptably low degree of accuracy that causes certain difficulties in the choice of calculation formula for this designing object.

One of the ways to solve problems related to the development of valid aerodynamic calculation techniques of pneumatic transport systems is to use the experience of solving such problems in the related field – hydrotransport of bulk solids but taking into account peculiarities of the aerodisperse flow. It will allow to create a scientific basis for the development of generalized techniques for the aerodynamic calculation of pneumatic transport pipelines and feeders.

PNEUMATIC TRANSPORT, AERODISPERSE FLOW, AERODYNAMIC CALCULATION, BULK SOLID, HARD PARTICLE

Сведения об авторе:

М. Н. Чальцев

SPIN-код: 2978-2764

Телефон: +38 (071) 331-45-58

Эл. почта: druknf@rambler.ru

Статья поступила 09.09.2018

© М. Н. Чальцев, 2018

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