

УДК 622.831.325.3:621.643:532.576; 622.7

В.И. КРИВОЩЕКОВ, канд. техн. наук

(Украина, Днепр, Государственное ВУЗ "Национальный горный университет"),

Л.А. НОВИКОВ

(Украина, Днепр, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины)

АСПЕКТЫ ГАЗОДИНАМИКИ ДВУХФАЗНЫХ СРЕД В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ И ТРУБОПРОВОДНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. При исследовании закономерностей движения многофазных сред необходимо учитывать физические свойства фаз, особенности их взаимодействия, а также влияние внешних факторов на режимы течения. Для повышения эффективности транспортировки газовых смесей по системам наземных и подземных трубопроводов, систем вентиляции в условиях обогатительных фабрик, а также устройств для очистки воздуха (пневмосепараторы, циклоны и др.) необходимо располагать информацией о закономерностях движения многофазных сред в каналах (трубах) с различной формой поперечного сечения. В частности сепарационные устройства можно рассматривать как местное гидравлическое сопротивление трубопровода. Это позволяет осуществлять выбор оптимальных параметров и режимов работы технологических устройств и систем.

Анализ исследований и публикаций. При исследовании течений двухфазных сред в различных технологических процессах, помимо полуэмпирических теорий используются методы газовой динамики. Практические результаты получены с использованием модели, основанной на идее взаимопроникающих континуумов [1, 2].

В работе [3] рассмотрены особенности перемешивания при гидроциклонировании и современное направление совершенствования гидроциклонов на основе изменения гидродинамической структуры потоков посредством подачи воздуха в аэрирующие приспособления для турбулентно-аэрационной перемешивания минеральных зерен.

В работе [4] показано, что увеличение содержания пыли с фиксированным диаметром при заданной массовой концентрации приводит к снижению динамической вязкости высокодисперсной системы и потерь давления в пневмосепараторе. При этом изменение динамической вязкости, плотности и потерь давления двухфазной среды в пневмосепараторе зависят от интенсивности межфазных взаимодействий, которые определяются значениями энергии турбулентных пульсаций скорости газообразной среды, а также размера и массовой концентрации частиц пыли.

В работе [5] был проведен анализ структуры двухфазных потоков в трубах и предложены различные математические модели. В частности следует выделить

Збагачення корисних копалин, 2017. – Вип. 66(107)

Усреднения та транспортування

лить модель двухфазного течения с переменным распределением параметров.

При решении задач механики многофазных систем используется одномерная гомогенная модель [1, 6], в которой двухфазная среда условно заменяется однофазной с осредненными параметрами течения. Использование данной модели упрощает расчет газодинамических параметров течения, однако не позволяет проводить детальный анализ поведения каждой из фаз в отдельности. Применительно газопылевым потокам рассматриваемую модель можно использовать в случае малой концентрации твердых частиц и их диаметре. При этом необходимо прибегать к определенным допущениям, в частности на сферичность твердых частиц, их одинаковые размеры и отсутствие межфазных взаимодействий.

Постановка задачи. Целью данной работы является исследование основных аспектов аэрогазодинамики двухфазных сред в трубах переменного сечения.

Изложение материала и результаты. Скорость движения твердых частиц, а также характер межфазных взаимодействий зависят от плотности твердых частиц, их формы, гидравлического диаметра канала и скорости газового потока (несущей среды). Так, при скорости газового потока $1 \div 2$ м/с, во взвешенном состоянии, могут находиться твердые частицы диаметром $d_z \approx 1 \div 10$ мкм с плотностью $\rho_z = 2650$ кг/м³ и более. При этом влияние силы тяжести на распределение объемных концентраций частиц в сечениях канала будет не существенным [1]. Последнее связано с совпадением пульсационных составляющих каждой из фаз. В случае, когда в газовом потоке присутствуют твердые частицы с меньшей плотностью, то их диаметр характеризуется более широким диапазоном значений.

Приближенную оценку диаметра переносимых частиц в зависимости от их плотности можно сделать по следующей формуле [1]

$$d_2 = d_1 \frac{\rho_1}{\rho_2}, \quad (1)$$

где d_1, d_2 – диаметры твердых частиц ($d_2 > d_1$) соответственно с плотностями ρ_1 и ρ_2 ($\rho_1 > \rho_2$), м кг/м³.

Рассмотрим процесс движения двухфазной среды (газ – твердые частицы) в цилиндрическом канале переменного сечения.

Введем следующие допущения: твердые частицы имеют шарообразную форму и одинаковый диаметр; массовая концентрация твердых частиц в газовом потоке не изменяется; температура и скорости фаз совпадают.

Одномерное нестационарное течение газа в трубе описывается следующей системой уравнений [7]:

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho S)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u S)}{\partial x} = 0; \\ \frac{\partial(\rho u S)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [(p + \rho u^2) S] = -\rho S \frac{\lambda u |u|}{2D}; \\ \frac{\partial}{\partial t} \left[\rho S \left(\varepsilon + \frac{u^2}{2} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho u S \left(\varepsilon + \frac{u^2}{2} + \frac{p}{\rho} \right) \right] = \pi(D + \delta_s) q_t, \end{cases} \quad (2)$$

где t – время, с; $0 \leq x \leq L$ – текущая координата, отсчитываемая от начального сечения трубы вдоль ее оси, м; L – длина трубы, м; ρ – плотность газа, кг/м³; u – средняя скорость газа, м/с; S – текущая площадь проходного сечения трубы, м²; D – гидравлический диаметр трубы, м; δ_s – толщина стенки трубы, м; λ – коэффициент Дарси, м; p – давление газа, Па; $g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения; ε – внутренняя энергия единицы массы газа, Дж/кг; q_t – удельный тепловой поток через стенки трубы, Вт/м².

Первое уравнение системы (2) представляет собой уравнение неразрывности, второе – уравнение количества движения, а третье – уравнение сохранения энергии.

Считая процесс течения газа стационарным, а сечение трубы постоянным, перепишем систему уравнений (2) в следующем виде:

$$\begin{cases} \frac{d}{dx}(\rho u) = 0; \\ \frac{d}{dx}(p + \rho u^2) = -\rho \frac{\lambda u |u|}{2D}; \\ \frac{d}{dx} \left[\rho u \left(h + \frac{u^2}{2} \right) \right] = \frac{\pi(D + \delta_s) q_t}{S}, \end{cases} \quad (3)$$

где $h = \varepsilon + p/\rho$ – удельная энтальпия газа, Дж/кг.

Согласно [6] для стационарного движения твердых частиц можно записать:

$$\begin{cases} \frac{d}{dx}(\rho_z u_z) = 0; \\ u_z \frac{du_z}{dx} = \frac{3 C_D \rho_z}{4 d_z \rho} (u - u_z) |u - u_z|; \\ u_z \frac{dh_z}{dx} = \frac{6h}{\rho_z d} (T - T_z), \end{cases} \quad (4)$$

где ρ_z – плотность твердых частиц, кг/м³; u_z – средняя скорость твердых частиц в рассматриваемом сечении трубы, м/с; C_D – коэффициент сопротивления; d_z – диаметр твердых частиц, м; T_z , T – температуры твердой и газообразной

Усреднения та транспортування

фазы, соответственно (в большинстве случаев можно принять $T = T_z$), K ; h_z – удельная энтальпия твердой дисперсной фазы, Дж/кг.

Первое уравнение системы (4) представляет собой уравнение неразрывности, второе – уравнение движения твердой частицы, а третье – уравнение теплового баланса.

При определении газодинамических параметров двухфазной среды, состоящей из газа и твердых взвешенных частиц, используется допущение, согласно которому двухфазная среда является гомогенной с определенными физическими свойствами [6]. В этом случае для описания движения этой среды можно использовать уравнения (2) и (3).

Плотность двухфазной среды зависит от содержания твердой фазы и может быть определена по приближенной формуле [1]

$$\rho_s = \rho_z c_z + \rho(1 - c_z),$$

где c_z – концентрация твердых частиц, кг/м³.

В качестве потерь давления двухфазной среды в канале рассматривают: потери на трение и местные потери. Последние возникают в местах изменения проходного сечения (внезапное или плавное) и при изменении направления движения потока. Коэффициенты местных гидравлических сопротивлений при движении двухфазных сред представляют собой сложные функции газодинамических параметров среды и превосходят свои значения ζ при движении жидкостей или газов. Это связано с перераспределением фаз в сечении потока двухфазной среды и изменением его структуры.

Потери давления по длине канала определяются по формуле Дарси-Вейсбаха [8, 9]

$$\Delta p_s = 0,5 \rho_s u_s^2 \lambda_s l D^{-1},$$

где u_s – средняя скорость двухфазной среды, м/с; λ_s – коэффициент потерь на трение по длине канала; l – длина канала, м.

Местные потери давления в местах сужения (расширения) проходного сечения канала определяются как [8]

$$\Delta p_s = 0,5 \rho_s u_s^2 \zeta_{cr},$$

где ζ_{cr} – коэффициент местного гидравлического сопротивления в месте сужения (расширения) проходного сечения.

В частности при плавном изменении проходного сечения рассматривают конфузорный или диффузорный участки.

В местах, где происходит поворот потока для определения потерь давления двухфазной среды можно воспользоваться соотношением [8]

$$\Delta p_s \approx \Delta p \{1 + (\bar{u} - 1)[M(1 - M)E_\alpha + M^2]\},$$

где Δp – местные потери давления газообразной фазы, Па; \bar{u} – относительная скорость фаз; M – массовое расходное содержание твердой фазы, д.е.; E_α – числовой коэффициент, учитывающий восстановление давления после поворота потока на угол α .

Вывод и направление дальнейших исследований

Установившееся движение двухфазной среды в канале может быть приближенно описано уравнениями стационарного движения эквивалентной однофазной среды с определенными физическими свойствами.

Дальнейшие исследования авторов будут направлены на исследование влияния гидродинамики межфазных взаимодействий.

Список литературы

1. Новиков, Л.А. Математическая модель движения турбулентного потока газозвеси в дегазационном трубопроводе / Л.А. Новиков // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / Ин-т геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины. – Днепропетровск, 2008. – Вып. 76. – С. 126-131.
2. Кривошеков, В.И. Концепция исследований двухфазных сред в сепарационных аппаратах / В.И. Кривошеков // Збагачення корисних копалин: Наук. – техн. зб. – 2014. – Вип. 56(97). – С. 127-128.
3. Кривошеков, В.И. Аэрогидродинамические условия перемещения в гидроциклоне / В.И. Кривошеков // Збагачення корисних копалин: Наук. – техн. зб. – 2002. – Вип. 14(55). – С. 53-58.
4. Кривошеков, В.И. Влияние дисперсности среды на потери давления в пневмосепараторе / В.И. Кривошеков, Л.А. Новиков // Збагачення корисних копалин: Наук. – техн. зб. – 2013. – Вип. 52(93). – С. 63-70.
5. Чисхолм, Д. Двухфазные течения в трубопроводах и теплообменниках / Д. Чисхолм. – М.: Недра, 1986. – 204 с.
6. Уоллис, Г. Одномерные двухфазные течения / Г. Уоллис. – М.: Мир, 1972. – 436 с.
7. Сухарев, А.М. Технологический расчет и обеспечение надежности газо- и нефтепроводов / А.М. Сухарев, А.М. Красевич. – М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2000. – 271 с.
8. Новиков, Л.А. Влияние дисперсной фазы на гидравлическое сопротивление участковых дегазационных трубопроводов / Л.А. Новиков // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / Ин-т геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины. – Днепропетровск, 2014. – Вып. 114. – С. 154-161.
9. Кривошеков, В.И. Закономерности изменения потерь давления в трубопроводе низкого давления / В.И. Кривошеков, Л.А. Новиков // Збагачення корисних копалин: Наук. – техн. зб. – 2016. – Вип. 64(105). – С. 26-29.

© Кривошеков В.И., Новиков Л.А., 2017

*Надійшла до редколегії 20.05.2017 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. Л.Ж. Горобець*