

В.И. КРИВОЩЕКОВ, канд. техн. наук

(Украина, Днепропетровск, Национальный горный университет),

Л.А. НОВИКОВ

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

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СО СТЕНКАМИ КАНАЛА ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ ПОТОКА ГАЗОВЗВЕСИ

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. При исследовании движения газозвеси в технологических устройствах необходимо располагать достоверной информацией о характере протекания процесса массопереноса [1], ударном взаимодействии твердых частиц между собой и с неподвижными стенками устройств [2, 3], а также об аэродинамических параметрах каждой из фаз. Теоретические исследования потоков газозвеси в рамках механики сплошных гетерогенных сред не всегда позволяют получить реальную картину течения, что объясняется сложной структурой двухфазной среды, свойства которой носят строго индивидуальный характер для каждого конкретного случая движения, а также малыми размерами и многообразием форм твердых частиц. По этой причине предпочтение отдается экспериментальным исследованиям и численному моделированию двухфазных течений [2]. При решении прикладных задач динамики многофазных сред, как правило, используют феноменологические и статистические модели [4], которые учитывают межфазное взаимодействие и позволяют определять поля скоростей и концентраций. Помимо ударного взаимодействия твердых частиц в потоке газозвеси, интерес представляют отрывные и вихревые зоны, которые образуются в основном потоке и в пристеночной области каналов [5]. В частности, это относится к задачам центробежной сепарации с учетом вторичного уноса твердых частиц с неподвижной поверхности [6]. Строгого аналитического решения такого класса задач в настоящее время не существует. Кроме того, анализ закономерностей движения однофазных [7] и двухфазных [8, 9] турбулентных потоков в каналах показывает, что распределение скоростей фаз зависит от величины касательных напряжений несущей среды и обуславливается механизмом взаимодействия твердых частиц со стенками канала. Поэтому исследование взаимодействия твердых частиц со стенками канала потока газозвеси является актуальной задачей.

Анализ исследований и публикаций. Поток газозвеси в технологических устройствах, как правило, является турбулентным и описывается уравнениями осредненного движения двухфазной среды для случая локально однородной и изотропной турбулентности [10]. При численном моделировании двухфазных течений эти уравнения представляют в нестационарном виде, которые связаны между собой через источниковые члены, учитывающие межфазный обмен импульсом и энергией [4].

В работах [1, 3, 8, 11, 12] рассмотрены особенности движения двухфазных сред в горизонтальных и вертикальных каналах, а также турбулентные закрученные потоки. Общим недостатком этих работ является неучет механизма удара и отскока твердых частиц, их формы, шероховатости стенок канала, а также влияния касательных напряжений несущей среды на распределение скоростей каждой из фаз.

В работе [4] проведено численное моделирование турбулентного течения газозвеси при обтекании цилиндра. Однако здесь не рассмотрены случайные взаимодействия твердых частиц, а их форма принята сферической.

Случайные взаимодействия пылевых частиц со смещенным центром тяжести между собой и со стенками горизонтального канала рассмотрены в работе [1]. К сожалению, в работе не учтены особенности влияния шероховатости стенок канала на коэффициент восстановления результирующей скорости пылевой частицы после удара [2].

В связи со сложностью задач аэродинамики турбулентных закрученных и прямолинейных потоков газозвеси, ограниченных неподвижными стенками, предпочтение отдается экспериментальным исследованиям по определению скорости уноса (скорость взметывания) основным потоком твердых частиц с поверхности канала [6] и коэффициентов восстановления результирующей скорости твердых частиц при их ударном взаимодействии между собой и с неподвижными стенками [1, 2]. Поэтому крім учета влияния ударного взаимодействия на величину распределения концентрации и скорости твердых частиц в потоке газозвеси необходимо учитывать и влияние вихревых зон, формирующихся в основном потоке и в пристеночной области канала. Условия возникновения таких зон рассмотрены в работе [6], посвященной численному анализу двухфазных течений в горизонтальном канале, однако вопрос влияния вихревых зон на поля скоростей и концентраций в данной работе развития не получил. В работе [13], посвященной динамике многофазных сред, рассматривался вопрос поперечного обтекания пластины потоком газозвеси. Несмотря на то, что в работе учитывается ударное взаимодействие твердых частиц с пластиной, вопрос влияния отрывных течений и касательных напряжений на поля скоростей и концентраций детально не рассматривался, а основное внимание уделено сверхзвуковым и звуковым течениям газозвеси.

Постановка задачи. Цель данной работы – исследование взаимодействия со стенками канала твердых частиц потока газозвеси.

Изложение материала и результаты. Рассмотрим развитое турбулентное течение газозвеси в вертикальном канале с параллельными стенками. Движение газозвеси сопровождается ударным взаимодействием твердых частиц между собой и со стенками канала. В работе [2] приведены результаты экспериментальных исследований ударного взаимодействия угольных частиц со смещенным центром тяжести с полированной поверхностью наклонно расположенной стальной плиты (рис. 1)

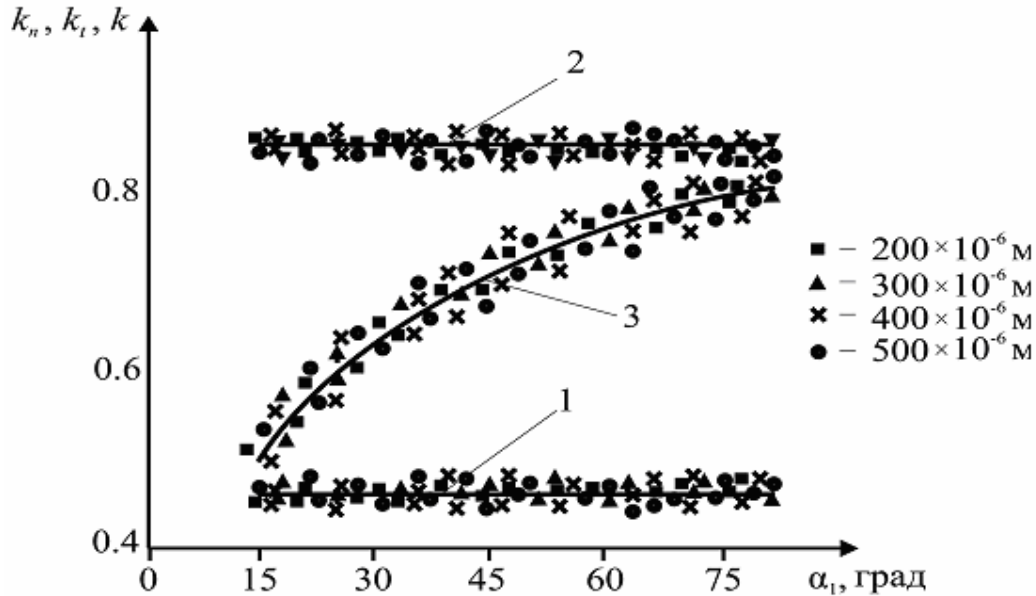


Рис. 1. Зависимости коэффициентов восстановления угольных частиц со смещенным центром тяжести от их угла удара α_1 о наклонную поверхность стальной плиты: 1 и 2 – изменение коэффициентов восстановления нормальной и касательной составляющих скорости (соответственно k_n и k_t); 3 – изменение коэффициента восстановления k результирующей скорости с учетом эффекта Магнуса

По результатам экспериментальных исследований (рис. 1) в работе [2] получена полиномиальная зависимость для коэффициента восстановления результирующей скорости угольных частиц со смещенным центром тяжести

$$k = \lambda_m \frac{v_1}{v_2} = \lambda_m (0,338 + 0,0128\alpha_1 - 0,0001\alpha_1^2), \quad (1)$$

где v_1, v_2 – результирующие скорости твердой частицы до и после удара, м/с;

$\lambda_m = \frac{F_{ma}}{F_{m0}}$ – поправочный коэффициент, учитывающий влияние силы Магнуса

на коэффициент восстановления результирующей скорости твердой частицы в зависимости от угла удара; F_{ma} и F_{m0} – силы Магнуса при косом и прямом ударах, Н; α_1 – угол удара твердой частицы о неподвижную поверхность, град.

Возникновение касательных напряжений несущей среды на стенках канала, а также изменение траекторий движения твердых частиц в результате ударных взаимодействий приводит к искажению поля скоростей несущей среды.

Логарифмический профиль относительных скоростей в турбулентном потоке газа с учетом влияния касательных напряжений на стенках канала имеет вид [7]:

$$\frac{w}{w_*^r} = A_0 \lg \frac{w_*^r y}{n} + B_0, \quad (2)$$

где w и w_*^r – локальная и динамическая скорости газового потока, м/с; A_0 и B_0 – числовые константы, определяемые экспериментально [7]; y – расстояние от стенки канала, м; ν – кинематическая вязкость газа, м²/с.

Получение адекватной картины распределения скоростей несущей среды в турбулентном потоке газозвеси с использованием уравнения (2) возможно

только тогда, когда для числа Рейнольдса $Re^* = \frac{w_*^r y}{n}$, вычисляемого по величине

динамической скорости, средней скорости несущей среды w_{cp} и расходной концентрации твердой фазы μ_p выполняются неравенства: $30 \leq Re^* \leq 700$; $8 \leq w_{cp} \leq 30$ м/с; $0,1 \leq \mu_p \leq 16$ кг/час.

Рассмотрим результаты экспериментальных исследований поля скоростей несущей среды при турбулентном движении газозвеси в вертикальной трубе. На участках трубы диаметром $D = 0,050$ м с гидродинамической стабилизацией потока $L/D = 100$ (L и D – длина и диаметр рассматриваемого участка трубы, м) для определения полного давления газового потока использовался аэродинамический зонд, а для определения мгновенных скоростей газа – трубка Пито-Прандтля. В опытах использовались узкие фракции анионита АВ-17 диаметром $d = 0,00052$ м, угольные частицы со смещенным центром тяжести диаметром $d = 0,00011$ мм, стеклянные шарики диаметром $d = 0,0013$ мм (рис. 2). По полученным значениям мгновенных скоростей несущей среды $w(y)$ из уравнений неразрывности и количества движения двухфазной среды [7, 8, 10] методом конечных разностей [14] определялись соответствующие значения касательного напряжения τ_r на стенках трубы.

Анализ рис. 2 показывает, что все экспериментальные данные во внутренней области турбулентного ядра течения группируются около зависимости (2) с константами $A_0 = 5,5$ и $B_0 = 5,8$ (линия 1). По данным Никурадзе [15] значения констант A_0 и B_0 наиболее точно описывают экспериментальные точки в пристеночной области турбулентного течения сплошных сред. При расчете динамической скорости несущей среды по экспериментальным значениям потерь давления ΔP_{II} в потоке газозвеси получается семейство логарифмических линий 2-5 (рис. 2) с различными численными значениями параметров A и B , которые в свою очередь зависят от величин μ_p и w_{cp} . Разброс экспериментальных точек (рис. 2) связан с разными значениями потерь давления $\Delta P_{с}$, обусловленными весом твердых частиц.

Из результатов экспериментальных исследований, представленных на рис. 2, следует, что в вертикальной трубе формируется устойчивый дисперсно-стержневой режим движения газозвеси, при котором большинство твердых частиц перемещается в ядре потока. При этом в ударное взаимодействие со стенками трубы вступают лишь отдельные твердые частицы.

Гравітаційна сепарація

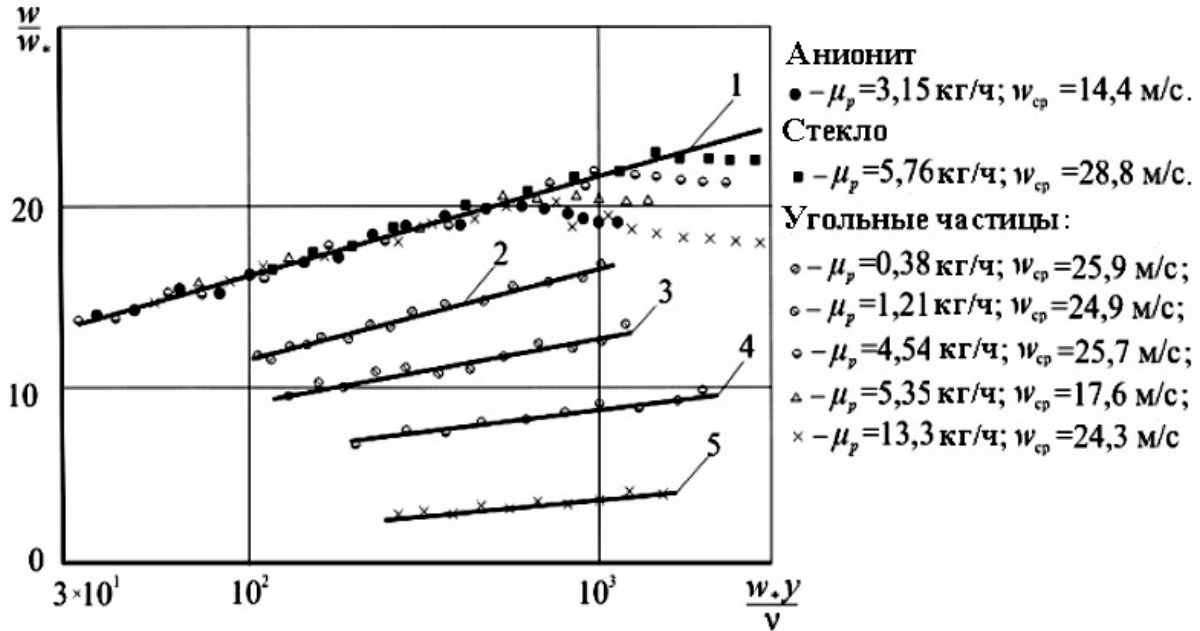


Рис. 2. Логарифмические профиль относительных скоростей несущей среды в вертикальном

потоке газозвеси: 1 – $\frac{w}{w_*^\Gamma} = \frac{w_*^\Gamma y}{n}$; 2, 3, 4, 5 – $\frac{w}{w_*^\Pi} = \frac{w_*^\Pi y}{n}$; w_*^Γ, w_*^Π – динамические скорости несущей среды, определяемые величинами касательных напряжений на стенках трубы и между слоями несущей среды потока газозвеси, м/с

При условии, что $\mu_p > \mu_p'$ (μ_p' – некоторое критическое значение расходной концентрации) и по аналогии с (2) выражение для логарифмического профиля относительных скоростей несущей среды газозвеси примет вид

$$\frac{w}{w_*^\Gamma} = A \lg \frac{w_*^\Gamma y}{n} + B, \quad (3)$$

где w_*^Γ – динамическая скорость несущей среды, вычисляемая как сумма касательных напряжений, обусловленных трением несущей среды о стенки трубы τ_T и ударным взаимодействием твердых частиц со стенками τ_s , м/с; A и B – числовые константы для данного материала твердых частиц, определяемые экспериментально [7, 15].

В уравнении (3) видно, что константы A и B не зависят от μ_p, w_{cp} и принимают фиксированные значения для данного материала. Величина отклонения каждой прямой от линии обобщенного профиля, полученной из уравнения (2), характеризует величину касательного напряжения при соответствующей динамической скорости несущей среды.

По результатам экспериментальных исследований получена зависимость касательного напряжения на стенках трубы от расходной концентрации твердых частиц и их средней скорости в потоке газозвеси (рис. 3).

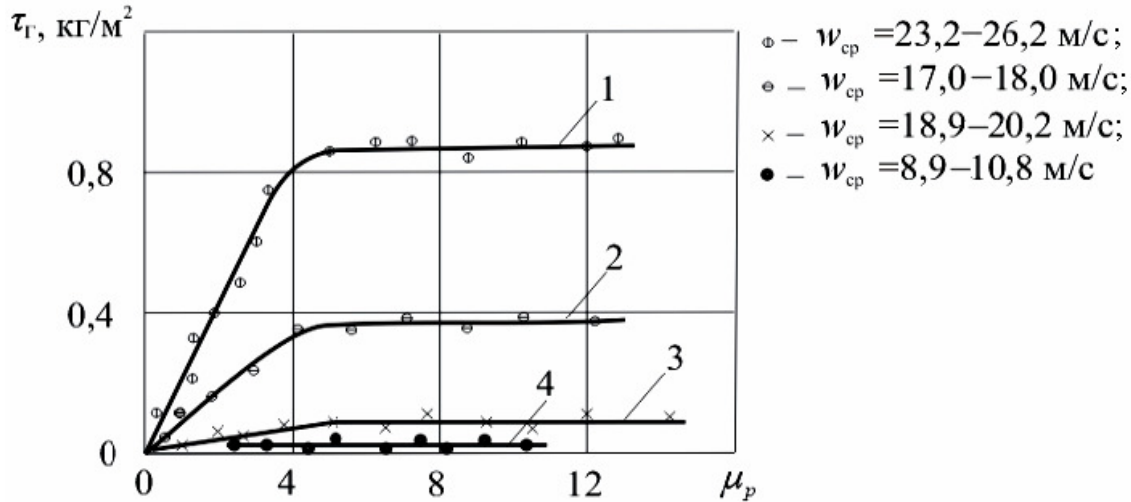


Рис. 3. Зависимость касательного напряжения в потоке газозвеси от расходной концентрации твердых частиц:
 1, 2 – угольные частицы; 3 – стекло; 4 – анионит

Из рис. 3 следует, что при увеличении расходной концентрации твердых частиц до ее критического значения, находящегося в диапазоне от 3 до 4 кг/ч, касательные напряжения на стенках трубы возрастают, а потом остаются постоянными. Это совпадает с результатами экспериментов [9], касающихся измерения числа ударов твердых частиц со стенками трубы в зависимости от расходной концентрации твердой фазы и средней скорости потока газозвеси. Полученные результаты показывают, что больше всего ударных взаимодействий твердых частиц со стенками трубы приходится на частицы малой массы, так как они наиболее подвержены влиянию поперечной составляющей скорости турбулентных пульсаций несущей среды, и поэтому склонны к радиальным перемещениям. Твердые частицы большей массы под действием сил инерции движутся по прямолинейной траектории.

Анализ рис. 3 показывает, что наибольшие значения касательных напряжений наблюдаются в случае, когда газозвесь состоит из угольных частиц. Это связано с тем, что по сравнению с твердыми частицами, состоящими из стекла и анионита, угольные частицы рассматриваемого диаметра имеют меньшую массу и, следовательно, более всего подвержены радиальным перемещениям и ударным взаимодействиям со стенками трубы. Попадая в пристеночную область течения газозвеси, они способствуют увеличению касательных напряжений на стенках трубы.

Поэтому на основании известных закономерностей турбулентного и ламинарного обтекания сферических тел [4, 7, 15] можно сказать, что число Рейнольдса, отвечающее максимуму касательных напряжений, соответствует условиям перехода к турбулентному режиму обтекания твердых частиц потоком несущей среды.

Гравітаційна сепарація

Выводы и направления дальнейших исследований:

– при повышении расходной концентрации твердых частиц происходит вырождение дисперсно-стержневого режима движения газозвеси в вертикальном канале;

– в случае, когда касательные напряжения на стенках канала достигают своего максимального значения, происходит переход от ламинарного к турбулентному режиму обтекания твердых частиц;

– касательные напряжения зависят от концентрации, скорости и интенсивности взаимодействия твердых частиц потока газозвеси со стенками канала;

– наибольшие значения касательных напряжений на стенках трубы характерны при движении газозвеси, состоящей из угольных частиц неправильной формы.

В дальнейших исследованиях авторами предполагается рассмотреть математическую модель сепарации газозвеси в циклоне с центральной загрузкой исходного продукта и особенности его конструкции.

Список литературы

1. **Володин Ю.Г.** Расчет нестационарного движения пылевоздушного потока в осесимметричных каналах технологического оборудования [Текст] / Ю.Г. Володин, А.Н. Богданов // Горн. журн. Изв. вузов. – 2007. – № 2. – С. 17-19.

2. **Кривощек В.И.** Ударное взаимодействие твердой частицы с шероховатой поверхностью стенки [Текст] / В.И. Кривощек, Л.А. Новиков // Збагачення корисних копалин: Наук. – техн. зб. – 2009. – Вип. 38 (79). – С. 78-86.

3. Двухфазные моно- и полидисперсные течения газа с частицами [Текст] / **Л.Е. Тернил, Б.Н. Маслов, А.А. Шрайбер, А.М. Подвысоцкий.** – М.: Машиностроение, 1980. – 172 с.

4. **Приходько А.А.** Компьютерные технологии в аэрогидродинамике и тепломассообмене [Текст] / **А.А. Приходько.** – К. : Наук. думка, 2003. – 379 с.

5. Очистка промышленных газов от газообразных примесей [Текст] / **Е.В. Сугак, Н.А. Войнов, Р.А. Степень, Н.Ю. Житкова** // Химия растительного сырья. – 1998. – №3. – С. 21-34.

6. Численный анализ двухфазного течения в газодинамическом фильтре [Текст] / **У.Г. Пирумов, В.Ю. Гидаспов, А.А. Даниелян и др.** // Матем. моделирование. – 1998. – Вып. 10. – С. 19-28.

7. **Лойцянский Л.Г.** Механика жидкостей и газа [Текст] / Л.Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1970. – 906 с.

8. Математическое моделирование трения и теплоотдачи в одно- и двухфазном газовом потоке [Текст] / **Володин Ю.Г., Марфина О.П., Богданов А.Н., Галиев Р.Н.** // Материалы и технологии XXI века. Сб. статей III междунар. науч. – техн. конф. – Пенза. – 2005. – С. 154-155.

9. **Бабуха Г.Л.** Механика и теплообмен потоков полидисперсной газозвеси [Текст] / **Г.Л. Бабуха, М.И. Рабинович.** – К.: Наук. думка, 1969. – 218 с.

10. **Кривощек В.И.** Кинетический подход к выводу уравнений движения двухфазной среды в сепарационных аппаратах [Текст] / **В.И. Кривощек** // Обогащение руд. – 2001. – №6. – С. 23-26.

11. **Вышенский В.В.** О влиянии вращения частиц на их движение в циклонной камере [Текст] / **В.В. Вышенский, О.П. Кочетков, Ю.В. Троянкин** // Проблемы теплоэнергетики и прикладной теплофизики. – 1976. – Вып. 11. – С. 50-54.

12. **Буров А.И.** Кинетика центробежного разделения аэрозолей [Текст] / **А.И. Буров,**

Гравітаційна сепарація

Ю.В. Земков, Е.А. Непомнящий // тр. Алтайск. политехн. ин-та им. И.М. Ползунова. – 1975. – Вып. 49. – С. 7-11.

13. **Нигматулин Р.И.** Динамика многофазных сред [Текст] / **Р.И. Нигматулин.** – М.: Наука, 1987. – Ч.1. – 464 с.

14. **Пирумов У.Г.** Численные методы газовой динамики [Текст] / **У.Г. Пирумов, Г.С. осялков.** – М.: Высш. шк., 1987. – 232 с.

15. **Фабрикант Н.Я.** Аэродинамика [Текст] / **Н.Я. Фабрикант.** – М.: Наука, 1964. – 814 с.

© Кривошеков В.И., Новиков Л.А., 2010

*Надійшла до редколегії 17.02.2010 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. Л.Ж. Горобець*