

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)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ И ПОТЕРЬ ДАВЛЕНИЯ ГАЗОПЫЛЕВОГО ПОТОКА В ПНЕВМОСЕПАРАТОРЕ

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Инерционные аппараты широко используются для очистки газов от дисперсных примесей. При этом эффективность очистки запыленного газа зависит от конструктивных особенностей устройства, физических свойств и газодинамических параметров двухфазной среды.

Наибольшая эффективность очистки достигается при использовании инерционных воздухоочистителей конического и цилиндроконического типов. Общим гидродинамическим эффектом, используемым в этих устройствах, является создание вихревой области течения, которая может быть как симметрична оси устройства, так и состоять из нескольких вихревых зон [1].

Теоретическое исследование и математическое моделирование вихревых течений запыленного газа базируется на уравнениях динамики гетерогенных сред [2]. При этом возникают сложности, связанные с учетом внутрифазных и межфазных взаимодействий, характер которых определяется турбулентной структурой двухфазного потока и физическими свойствами каждой из фаз. В особенности это относится к вихревым течениям в замкнутых объемах, где указанные взаимодействия наиболее выражены.

Анализ исследований и публикаций. В работах [1, 3, 4] рассмотрено влияние конструктивных особенностей циклонных аппаратов на их гидравлическое сопротивление и процессы сепарации пыли. При этом основное внимание уделяется геометрическим соотношениям площади входного патрубка к плановой площади циклона и газовыводного патрубка.

Исследованию гидродинамики вихревых течений в циклонно-вихревых камерах посвящены работы [5, 6]. Здесь рассмотрено влияние твердой фазы на газодинамические параметры и структуру двухфазной среды, а также приведены данные по коэффициентам гидравлических сопротивлений.

При решении прикладных задач динамики многофазных сред, как правило, используют феноменологические и статистические модели [7], учитывающие межфазные взаимодействия и позволяющие определять поля скоростей и концентраций каждой из фаз. В связи с этим возникает возможность использования этих моделей при исследовании вихревых процессов массопереноса в пневмосепараторах.

Влияние пылевой нагрузки на энергетические характеристики циклонов было рассмотрено в работах [3, 8, 9]. Исследования показали, что при увеличении концентрации твердых частиц (до некоторого значения) происходит замет-

ное снижение коэффициента гидравлического сопротивления циклона. В связи с этим были выдвинуты различные гипотезы, которые, к сожалению, не дают однозначного ответа.

Постановка задачи. Целью данной работы является особенности определения в пневмосепараторе плотности и потерь давления газопылевого потока с учетом гетерогенных свойств.

Изложение материала и результаты. Течение газопылевого потока в пневмосепараторе можно представить в виде отдельных турбулентных зон, размеры и характер течения в которых зависят от конструктивных особенностей устройства. При этом суммарные потери давления определяются как [1]

$$\Delta p_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \Delta p_{o,i} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{\rho_i U_{i,j}^2}{2} (\xi_{i,j} + \zeta_{i,j}), \quad (1)$$

где $i = 1 - n$ – номер турбулентной зоны; $\Delta p_{o,i}$ – суммарные потери давления для i -той турбулентной зоны; $j = 1 - m$ – номер участка поверхности; $U_{i,j}$ – средняя скорость двухфазной среды для j -того участка поверхности в i -той турбулентной зоне, м/с; $\xi_{i,j}$, $\zeta_{i,j}$ – коэффициенты сопротивления трения и местного сопротивления для j -того участка поверхности в i -той турбулентной зоне; ρ_i – средняя плотность двухфазной среды в i -той турбулентной зоне, кг/м³, определяемая по формуле [1, 10]

$$\rho_i = \rho_{\text{ч}} \sum_{k=1}^m c_{i,k} + \rho_{n,i} (\rho_{n,i} \rho_{\kappa,i}^{-1})^{1/\chi} \left(1 - \sum_{k=1}^m c_{i,k} \right), \quad (2)$$

где $\rho_{n,i}$, $\rho_{\kappa,i}$ – плотности газа на входе и выходе из i -й турбулентной зоны, кг/м³; $\rho_{\text{ч}}$ – плотность частицы пыли, кг/м³; χ – показатель адиабаты; где $c_{i,k}$ – объемная концентрация частиц k -той компоненты твердой фазы в i -й турбулентной зоне, д.е.

Динамическая вязкость газопылевого потока больше чем у чистого газа. Это связано с торможением частиц пыли и их закручиванием в результате межфазных и внутрифазных взаимодействий [11].

В газопылевом потоке пневмосепаратора содержатся ультрамикроскопические частицы пыли, размеры которых соизмеримы с размерами молекул газа. Эти частицы имеют незначительную скорость оседания, и участвуют в обмене импульсами между соседними слоями среды. По этой причине частицы данной крупности вместе с газообразной фазой играют роль несущей среды.

Примем допущение, согласно которому газ с ультрамикроскопическими частицами пыли диаметром d^* можно представить в виде "ультрадисперсной среды", подчиняющейся кинетической теории газов [12].

Рассматриваемые частицы пыли, как правило, не участвуют в процессе разделения твердой дисперсной фазы. В связи с этим их объемная концентрация c^* остается постоянной во всех турбулентных зонах пневмосепаратора. То-

Гравітаційна сепарація

где в соответствии с выражением (2) для плотности "ультрадисперсной среды" в i -й турбулентной зоне получим

$$\rho_i^* = \rho_{n,i}^* \left(\frac{\rho_{n,i}^*}{\rho_{\kappa,i}^*} \right)^{\frac{1}{\chi}} = [\rho_q c^* + \rho_{n,i} (1 - c^*)] \left[\frac{\rho_q c^* + \rho_{n,i} (1 - c^*)}{\rho_q c^* + \rho_{\kappa,i} (1 - c^*)} \right]^{\frac{1}{\chi}}, \quad (3)$$

где $\rho_{n,i}^*$, $\rho_{\kappa,i}^*$ – плотности "ультрадисперсной среды" на входе и выходе из i -й турбулентной зоны, кг/м³.

Согласно работе [13, 14]

$$\rho_i^* = \frac{p_i^*}{Z_i^* R^* T^*} = \frac{8,3143 m^* p_i^*}{Z_i^* T^*} = \frac{8,3143 M^* N_A p_i^*}{Z_i^* T^*}, \quad (4)$$

где Z_i^* – коэффициент сжимаемости "ультрадисперсной среды" в i -той турбулентной зоне; p_i^* – среднее давление "ультрадисперсной среды" в i -той турбулентной зоне, Па; T^* – температура "ультрадисперсной среды" в пневмосепараторе, К; R^* – газовая постоянная "ультрадисперсной среды", Дж/(моль·К); m^* – молекулярная масса "ультрадисперсной среды", кг/моль; M^* – масса частицы пыли, кг; N_A – число Авогадро.

Приравнявая выражения (3) и (4) получим уравнение

$$\frac{8,3143 M^* N_A p_i^*}{Z_i^* T^*} = [\rho_q c^* + \rho_{n,i} (1 - c^*)] \left[\frac{\rho_q c^* + \rho_{n,i} (1 - c^*)}{\rho_q c^* + \rho_{\kappa,i} (1 - c^*)} \right]^{\frac{1}{\chi}},$$

В соответствии с кинетической теории газов [13] динамическая вязкость "ультрадисперсной среды" в i -той турбулентной зоне

$$\mu_i^* = \frac{1}{3} \bar{\lambda} \nu \rho_i^*,$$

где $\bar{\lambda}$ – средняя длина свободного пробега частиц пыли, м; ν – средняя скорость теплового движения частиц пыли, м/с.

Согласно выражению (1) суммарные потери давления "ультрадисперсной среды" в i -той турбулентной зоне определяются как

$$\Delta p_{\Sigma}^* = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{\rho_i^* U_{i,j}^{*2}}{2} (\xi_{i,j}^* + \zeta_{i,j}^*), \quad (5)$$

где U_{ij}^* – средняя скорость "ультрадисперсной среды" для j -того участка поверхности в i -той турбулентной зоне, м/с; ξ_{ij}^* , ζ_{ij}^* – коэффициенты сопротивления трения и местного сопротивления при взаимодействии "ультрадисперсной среды" с j -тым участком поверхности в i -той турбулентной зоне.

Согласно принятому допущению "ультрадисперсную среду" в пневмосепараторе можно рассматривать как некоторый газ с определенными физическими свойствами. Так как его плотность ρ_i^* будет выше чем у чистого газа, то соответственно будут больше и коэффициенты сопротивления ξ_{ij}^* , ζ_{ij}^* .

В реальных условиях сепарации большинство взвешенных частиц пыли значительно крупнее, чем ультрамикроскопические частицы. В этом случае газопылевую среду в пневмосепараторе можно рассматривать как двухкомпонентную систему, состоящую из "ультрадисперсной среды" и частиц пыли диаметром $d_v > d^*$. С учетом выражения (3) плотность и потери давления рассматриваемой двухфазной системы в i -той турбулентной зоне будут определяться так:

$$\rho_i'' = \rho_v \sum_{k=1}^m c_{i,k} + \rho_i^* \left(1 - \sum_{k=1}^m c_{i,k} \right);$$
$$\Delta p_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{\rho_i'' U_{i,j}''^2}{2} \left(\xi_{i,j}'' + \zeta_{i,j}'' \right), \quad (6)$$

где U_{ij}'' – средняя скорость двухфазной системы для j -того участка поверхности в i -той турбулентной зоне, м/с; ξ_{ij}'' , ζ_{ij}'' – коэффициенты сопротивления трения и местного сопротивления для j – того участка поверхности в i -той турбулентной зоне.

Выводы и направления дальнейших исследований:

- газопылевой поток в пневмосепараторе можно рассматривать как двухкомпонентную систему, состоящую из несущей "ультрадисперсной среды" и сепарируемой твердой фазы. При этом первая подчиняется кинетической теории газов;

- при определении плотности и потерь давления газопылевого потока в пневмосепараторе необходимо учитывать особенности изменения его гидравлического сопротивления с увеличением пылевой нагрузки.

Дальнейшие исследования авторов будут направлены на изучение влияния конструктивно-технологических параметров пневмосепаратора на эффективность его работы.

Список литературы

1. Кривошеков, В.И. Потери давления газопылевого потока в турбулентных зонах пневмосепаратора [Текст] / В.И. Кривошеков, Л.А. Новиков // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2011. – Вип. 46(87). – С. 86-93.

Збагачення корисних копалин, 2012. – Вип. 48(89)

Гравітаційна сепарація

2. Нигматулин Р.И. Основы механики гетерогенных сред [Текст] / Р.И. Нигматулин. – М.: Наука, 1978. – 336 с.
3. Василевский М.В. Обеспыливание газов инерционными аппаратами [Текст] / М.В. Василевский. – Томск: Томский политехнический университет, 2008 – 258 с.
4. Справочник по пыле- и золоулавливанию [Текст] / М.И. Биргер, А.Ю. Вальдберг, Б.И. Мягков [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 312 с.
5. Штым А.Н. Аэродинамика циклонно-вихревых камер [Текст] / А.Н. Штым. – Владивосток: Дальневосточный ун-т, 1985. – 200 с.
6. Расчет гидравлического сопротивления вихревого аппарата [Текст] / Л.А. Тарасова, М.А. Терехов, О.А. Трошкин // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2004. – № 2. – С. 11-12.
7. Приходько А.А. Компьютерные технологии в аэрогидродинамике и тепломассообмене [Текст] / А.А. Приходько. – К.: Наук. думка, 2003. – 379 с.
8. Страус В. Промышленная очистка газов [Текст] / В. Страус. – М.: Химия, 1981. – 616 с.
9. Карпухович Д.Т. Влияние диаметра циклона на эффективность улавливания пыли [Текст] / Д.Т. Карпухович // Электрические станции. – 1973. – №11. – С. 29-32.
10. Фортъе А. Механика суспензий [Текст] / А. Фортъе – М.: Мир, 1971. – 264 с.
11. Гольдин Ш.Л. Теоретическое обоснование метода моделирования запыленных потоков [Текст] / Ш.Л. Гольдин, И.А. Рожанская // Сб. научн. тр. ВНИПИЧЕРМЕТЭНЕРГООЧИСТКА. – М.: Металлургия, 1986. – Вып. 11-12. – С. 46-51.
12. Рид Р. Свойства газов и жидкостей [Текст] / Р. Рид, Дж. Праусниц, Т. Шервуд. – Л.: Химия, 1982. – 592 с.
13. Жуховицкий Д.Л. Сборник задач по технической термодинамике: учебное пособие [Текст] / Д.Л. Жуховицкий. – Ульяновск: Улиту, 2004. – 98 с.
14. Евдокимов И.Н. Молекулярные механизмы вязкости жидкости и газа. Основные понятия [Текст] / И.Н. Евдокимов, Н.Ю. Елисеев. – М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2005. – Ч.1. – 59 с.

© Кривошеков В.И., Новиков Л.А., 2012

*Надійшла до редколегії 11.01.2012 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. Л.Ж. Горобець*