

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)

ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСНОСТИ СРЕДЫ НА ПОТЕРИ ДАВЛЕНИЯ В ПНЕВМОСЕПАРАТОРЕ

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Наибольшая эффективность очистки запыленного воздуха и других газов достигается при использовании инерционных воздухоочистителей конического и цилиндроконического типов [1]. При этом эффективность очистки зависит от конструктивно-технологических параметров устройства и крупности взвешенных частиц пыли.

При определении гидравлического сопротивления воздухоочистителя и показателей его эффективности необходимо располагать информацией о физических и газодинамических параметрах двухфазной вихревой среды. К таким параметрам относятся: скорости движения фаз, диаметр, плотность и концентрация частиц пыли, динамическая вязкость и плотность газа, интенсивность турбулентности.

Анализ исследований и публикаций. Экспериментальные исследования [2, 3] показывают, что при увеличении содержания твердого в исходном продукте (в некотором диапазоне значений) наблюдается снижение гидравлического сопротивления пневмосепаратора. Данную особенность можно объяснить изменением характера межфазных взаимодействий [4], что приводит к снижению интенсивности турбулентности газообразной фазы.

Для интенсификации процессов сепарации пыли используют различные гидродинамические эффекты, приводящие к формированию определенной турбулентной структуры течения [1, 5]. Так как одним из основных показателей энергетической эффективности пневмосепаратора является его гидравлическое сопротивление, то при использовании тех или иных гидродинамических эффектов необходимо учитывать потери кинетической энергии потока двухфазной среды, а также ее физические свойства.

Постановка задачи. Целью данной работы является определение влияния дисперсности среды на потери давления в пневмосепараторе.

Изложение материала и результаты. Рассмотрим аэродисперсную систему, состоящую из воздуха (несущей среды) и частиц пыли с эквивалентным диаметром d_3 . Аэродисперсные системы делятся на следующие классы [6]: ультрадисперсные ($d_3 = 0,001 \cdot 10^{-6} - 0,01 \cdot 10^{-6}$ м), высокодисперсные ($d_3 = 0,01 \cdot 10^{-6} - 0,1 \cdot 10^{-6}$ м), среднедисперсные ($d_3 = 0,1 \cdot 10^{-6} - 10 \cdot 10^{-6}$ м) и грубодисперсные ($d_3 = 10 \cdot 10^{-6} - 100 \cdot 10^{-6}$ м). Частицы пыли с эквивалентным диаметром менее $0,1 \cdot 10^{-6}$ м практически не оседают [6] и участвуют в броуновском движении молекул газа. В связи с этим введем следующие допущения:

– сферические частицы пыли диаметром $d_p < d_3 = 0,1 \cdot 10^{-6}$ м и массовой

Гравітаційна сепарація

концентрацій c_p образують однорідну газообразну фазу, підчиняючись кінетическої теорії газів;

– міжфазні взаємодії в високодисперсній системі, що містить частинки пилу діаметром d_p , відсутні.

Тоді згідно [7] для середньої швидкості u_p і довжини вільного пробігу λ_p цих частинок можна записати:

$$u_p = [8kT_v(\pi b^{-1} \pi d_p^3 \rho_p)^{-1}]^{0.5}; \quad (1)$$

$$\lambda_p = (\sqrt{2} \pi d_p^2 n_p)^{-1}, \quad (2)$$

де $k = 1,380622 \cdot 10^{-23}$ – постійна Больцмана; T_v – температура повітря, К; ρ_p – густина частинки, кг/м³; $n_p = c_p m_p^{-1}$ – кількість частинок пилу в одиниці об'єму; $m_p = b^{-1} \pi d_p^3 \rho_p$ – маса частинки пилу, кг; $c_p = C_p \rho_p$ – масова концентрація частинок пилу, кг/м³; C_p – об'ємна концентрація частинок пилу, д.е., визначається з співвідношення

$$C_p = c_p \rho_p^{-1} = n_p b^{-1} \pi d_p. \quad (3)$$

Молярна маса M_p і динамічна в'язкість μ_p розглядаваної однорідної газообразної фази визначаються співвідношеннями [5, 8]:

$$M_p = b^{-1} \pi d_p^3 \rho_p N_a; \quad (4)$$

$$\mu_p = 3^{-1} c_p u_p \lambda_p = 3^{-1} C_p \rho_p u_p \lambda_p, \quad (5)$$

де $N_a = 6,022 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹ – кількість Авогадро.

Згідно прийнятому допущенню високодисперсній системі, що містить частинки пилу діаметром d_p , можна розглядати як газову суміш, що складається з повітря і однорідної газообразної фази. Для визначення динамічної в'язкості цієї суміші використаємо апроксимацію Уїлкі [7]:

$$\mu_{p-v} = y_v \mu_v (y_v + y_p \psi_1)^{-1} + y_p \mu_p (y_p + y_v \psi_2)^{-1}, \quad (6)$$

де μ_v – динамічна в'язкість повітря, Па·с; y_v, y_p – мольні частки повітря і однорідної газообразної фази, д.е.; ψ_1, ψ_2 – параметри визначаються як:

$$\begin{cases} \psi_1 = \left(1 + \sqrt{\mu_v \mu_p^{-1}} \sqrt[4]{M_p M_v^{-1}}\right)^2 \left[8(1 + M_v M_p^{-1})\right]^{-0.5}; \\ \psi_2 = \psi_1 \mu_p \mu_v^{-1} M_v M_p^{-1}, \end{cases} \quad (7)$$

де M_v – молярна маса повітря, кг/моль.

Результаты расчета динамической вязкости высокодисперсной системы по формуле (6) в зависимости от массовой концентрации частиц пыли при различных значениях их плотности представлены на рис. 1.

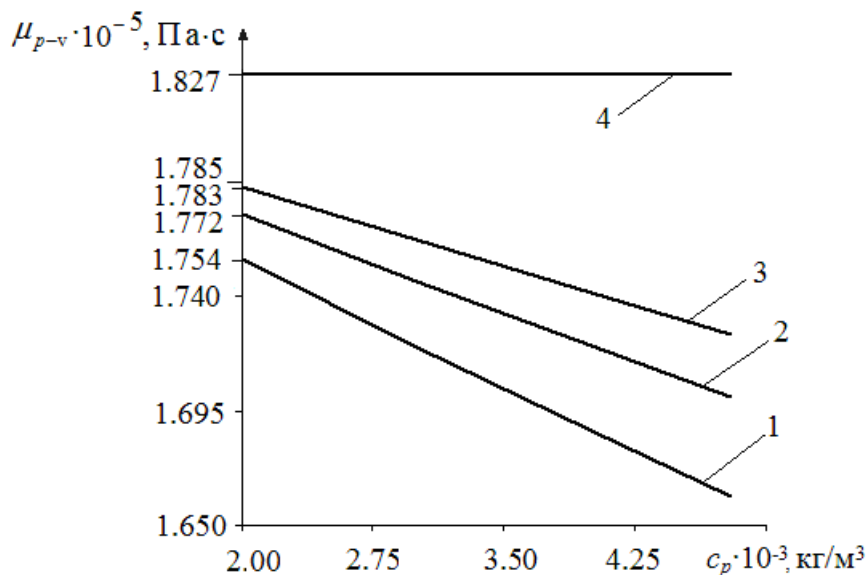


Рис. 1. Изменение динамической вязкости высокодисперсной системы в зависимости от массовой концентрации частиц пыли диаметром $d_p = 0,09 \cdot 10^{-6}$ м при различных значениях их плотности: 1 – $\rho_p = 1500$ кг/м³; 2 – $\rho_p = 2000$ кг/м³; 3 – $\rho_p = 2500$ кг/м³; 4 – $\rho_p = 0$ кг/м³ (воздух)

Из рис. 1 следует, что динамическая вязкость высокодисперсной системы ниже, чем у воздуха и обратно пропорциональна величине массовой концентрации c_p . Это связано с малой средней скоростью свободного пробега частиц пыли диаметром d_p , а также с уменьшением длины их свободного пробега при возрастании параметра c_p . При увеличении диаметра частиц (среднедисперсные и крупнодисперсные системы) начинают сказываться межфазные взаимодействия, что приводит к изменению вида функциональной зависимости $\mu_{p-v} = f(c_p)$.

Анализ кривых 1 – 3 (рис. 1) показывает, что при фиксированном значении диаметра частиц пыли с массовой концентрацией c_p величина μ_{p-v} прямо пропорциональна плотности дисперсной фазы. Такой характер изменения динамической вязкости следует из выражений (3), (5) и связан с увеличением относительной скорости твердых частиц.

Для средней плотности высокодисперсной системы можно записать

$$\rho_{p-v} = \rho_p C_p + \rho_v(1 - C_p), \tag{8}$$

где ρ_v – плотность воздуха при температуре T_v , кг/м³.

На рис. 2 представлены результаты расчета средней плотности высокодисперсной системы в зависимости от массовой концентрации частиц пыли, полученные по формуле (8)

Гравітаційна сепарація

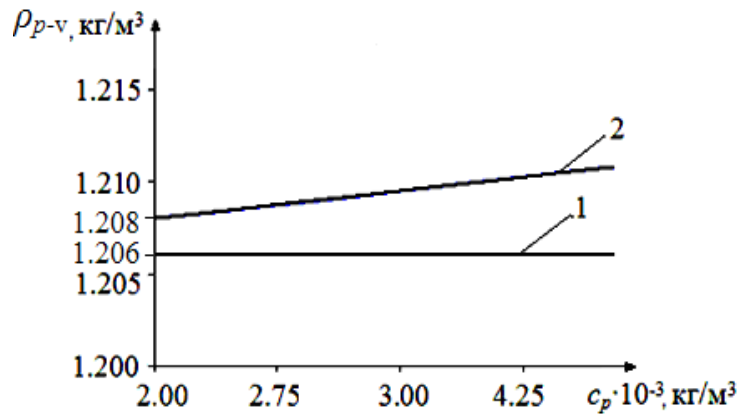


Рис. 2. Изменение средней плотности высокодисперсной системы в зависимости от массовой концентрации частиц пыли диаметром $d_p = 0,09 \cdot 10^{-6}$ м:
1 – воздух; 2 – высокодисперсная система

Анализ рис. 2 показывает, что плотность высокодисперсной системы больше чем у воздуха, прямо пропорциональна массовой концентрации частиц пыли и не зависит от плотности дисперсной фазы. Такой характер изменения плотности высокодисперсной системы при заданных значениях параметров d_p и c_p следует из соотношения (3).

Рассмотрим турбулентное течение высокодисперсной системы в пневмосепараторе (рис. 3) с осевым вводом исходного продукта [1].

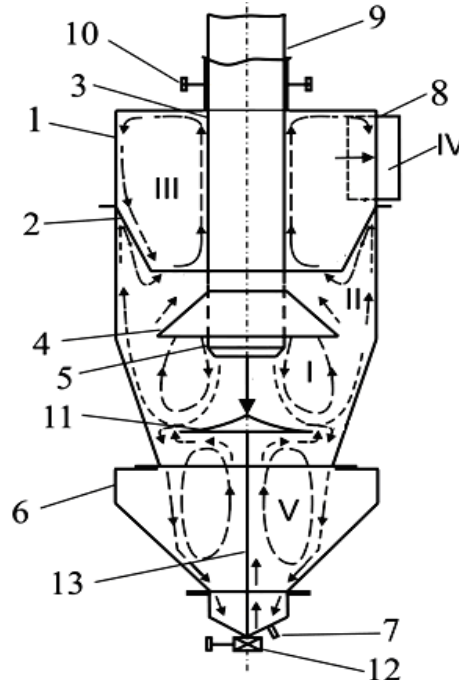


Рис. 3. Схема турбулентного течения высокодисперсной системы в пневмосепараторе с осевым вводом исходного продукта:
1 – цилиндрикоконический корпус; 2 – верхний конус; 3 – осевая труба; 4 – нижний конус;
5 – сопло; 6 – бункер; 7 – затвор; 8 – патрубок; 9 – центрирующая труба;
10 – регулировочно-фиксирующие винты; 11 – конусная направляющая; 12 – фиксатор;
13 – опорный стержень; I, II, III, IV, V – турбулентные зоны

Из рис. 3 видно, что в пневмосепараторе образуются турбулентные зоны I – V [1, 5] с различной структурой течения двухкомпонентной среды. В частности Зона V представляет собой изолированную область течения с низкой интенсивностью турбулентности [1].

Так как частицы пыли диаметром d_p повторяют поведение молекул воздуха, то их массовая концентрация в пневмосепараторе практически не изменяется, а турбулентная зона V (рис. 3) не оказывает влияния на гидравлическое сопротивление устройства. Если в потоке высокодисперсной системы присутствуют частицы пыли, участвующие в процессе разделения, то наблюдаться обратная картина.

Взаимодействие высокодисперсной системы с твердыми поверхностями (рис. 3) приводит к искривлению линий тока среды. По этой причине всю турбулентную область течения в пневмосепараторе можно условно разбить на отдельные участки, характеризующиеся определенной величиной и направлением вектора скорости. Тогда в соответствии с работами [1, 9] для потерь давления высокодисперсной системы в турбулентных зонах I – IV применимы следующие соотношения:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta p_{\zeta} = 0,5\rho u^2 \zeta|_{\theta}; \Delta p_{\zeta} = 0,5\rho u^2 \zeta_o; \\ \Delta p_{\zeta} = 0,5\rho u^2 3,2tg^{1,25}(0,5\alpha)(1-\bar{F}^2)^2; \Delta p_{\zeta} = 0,5\rho u^2 (\bar{F}^{-2} + 2 - 2,66\bar{F}^{-1})^2; \\ \Delta p_{\zeta} = 0,5\rho u^2 (1-\bar{F}^2)^2; \Delta p_{\zeta} = 0,5k_s\rho u^2 (1-\bar{F}^2); \\ \Delta p_{\zeta} = 0,5\rho u^2 \left[\sum_{j=0}^4 A_{j+1} \bar{F}^{4-j} \left((0,01745\alpha)^3 - 2\pi(0,01745\alpha)^2 - 0,1745\alpha \right) \right]; \\ \Delta p_{\xi} = 0,5\rho u^2 \xi|_{\theta}; \Delta p_{\xi} = 16^{-1}\rho u^2 \lambda \sin^{-1}(0,5\alpha)(1-\bar{F}^2); \\ \Delta p_{\xi} = 0,5\rho u^2 Lb^{-1}(0,02\bar{D} + 0,98)(\lambda^{-1} - 0,27\bar{D} + 0,1), \end{array} \right. \quad (9)$$

где Δp_{ζ} , Δp_{ξ} – потери давления местные и на трение, Па; ρ – плотность среды, кг/м³; u – скорость среды, м/с; $\xi|_{\theta}$, $\zeta|_{\theta}$ – коэффициенты сопротивления трения и местного сопротивления при повороте потока; θ – угол поворота потока, град; ζ_o – местный коэффициент сопротивления при боковом выходе потока через внешний насадок; α – угол конусности, град; \bar{F} – относительная площадь проходного сечения; A_j – числовые коэффициенты [8]; k_s – коэффициент сглаживания [8]; λ – коэффициент сопротивления трения [8]; L – длина кольцевой трубы, м; \bar{D} – относительный диаметр кольцевой трубы; b – ширина кольцевого зазора, м.

С учетом (9) суммарные потери давления высокодисперсной системы в пневмосепараторе определяются по формуле

$$\Delta p_{\Sigma} = \sum \Delta p_{\zeta} + \sum \Delta p_{\xi}, \quad (10)$$

Гравітаційна сепарація

где $\sum \Delta p_\zeta$, $\sum \Delta p_\xi$ – суммарные местные потери давления и суммарные потери на трение, Па.

Обозначим индексами $i-1$ и i значения газодинамических параметров в начальном и конечном сечениях рассматриваемого участка течения высокодисперсной системы. Тогда ее средняя плотность и статическое давление будут определяться как [9, 10]:

$$\rho_i = \rho_{i-1} (P_i P_{i-1}^{-1})^{1/k_v}; \quad (11)$$

$$P_i = P_{i-1} + 0,5(\rho_{i-1} u_{i-1}^2 - \rho_i u_i^2) - (\Delta p_\zeta)_{i-1,i} - (\Delta p_\xi)_{i-1,i}, \quad (12)$$

где k_v – коэффициент адиабаты высокодисперсной системы.

На рис. 4 представлены результаты расчета суммарных потерь давления высокодисперсной системы в пневмосепараторе с осевым вводом исходного продукта (рис. 3), полученные по формуле (10).

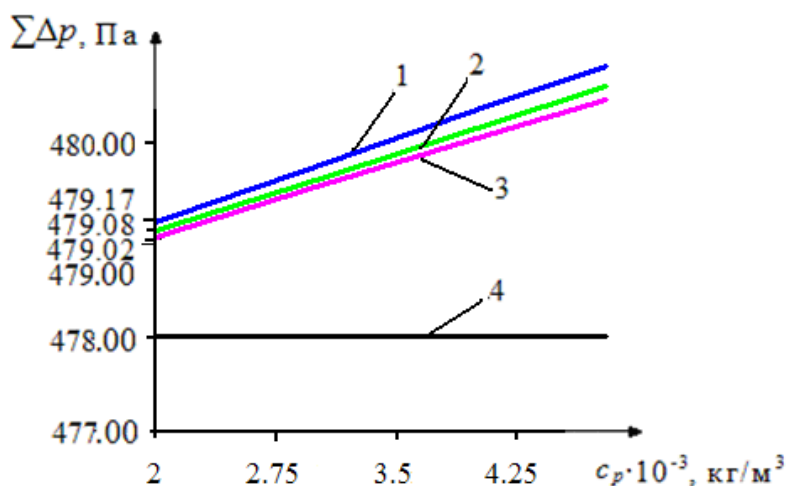


Рис. 4. Изменение суммарных потерь давления высокодисперсной системы в пневмосепараторе с осевым вводом исходного продукта со скоростью 12 м/с в зависимости от массовой концентрации частиц пыли диаметром $d_p = 0,09 \cdot 10^{-6}$ м при различных значениях их плотности:

$$1 - \rho_p = 1500 \text{ кг/м}^3; \quad 2 - \rho_p = 2000 \text{ кг/м}^3; \quad 3 - \rho_p = 2500 \text{ кг/м}^3; \\ 4 - \rho_p = 0 \text{ кг/м}^3 \text{ (плотность воздуха)}$$

Характер изменения суммарных потерь давления (рис. 4) показывает, что при турбулентном движении высокодисперсной системы эти потери будут больше, чем у воздуха. Причем, так как массовая концентрация частиц пыли мала, то указанное отличие будет незначительным. Кроме того из рис. 4 следует, что при увеличении плотности дисперсной фазы происходит снижение потерь давления, что связано с соответствующим возрастанием динамической вязкости высокодисперсной системы (рис. 1) и обратно пропорциональным изменением объемной концентрации частиц пыли согласно соотношению (3).

По аналогии с (рис. 1) изменение суммарных потерь давления высокодис-

першої системи происходит по линейному закону (рис. 4). Однако при увеличении массовой концентрации и диаметра частиц пыли характер функциональной зависимости $\sum \Delta p_{\zeta} = f(c_p)$ изменится. Это связано с возрастанием интенсивности межфазных взаимодействий.

Выводы и направления дальнейших исследований:

- для более точного расчета гидравлического сопротивления и энергетической эффективности пневмосепаратора, в качестве несущей среды можно рассматривать высокодисперсную систему;
- так как в турбулентных зонах пневмосепаратора частицы пыли высокодисперсной системы не участвуют в процессе разделения, имеют одинаковую массовую концентрацию и представляют собой однородную газообразную фазу, то потери давления в указанных зонах определяются как для сплошной среды;
- увеличение плотности частиц пыли с фиксированным диаметром при заданной массовой концентрации приводит к повышению динамической вязкости высокодисперсной системы и снижению ее потерь давления в пневмосепараторе;
- особенности изменения динамической вязкости, плотности и потерь давления двухфазной среды в пневмосепараторе зависят от интенсивности межфазных взаимодействий, которые определяются по известным значениям энергии турбулентных пульсаций скорости газообразной фазы, а также размера и массовой концентрации частиц пыли.

Дальнейшие исследования авторов будут направлены на исследование влияния межфазных взаимодействий на эффективность разделения пыли и гидравлическое сопротивление пневмосепаратора.

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.
2. Идельчик И.Е. Некоторые интересные эффекты и парадоксы в аэродинамике и гидравлике [Текст] / И.Е. Идельчик. – М.: Машиностроение, 1982. – 97 с.
3. Карпухович Д.Т. Влияние диаметра циклона на эффективность улавливания пыли [Текст] / Д.Т. Карпухович // Электрические станции. – 1973. – №11. – С. 29-32.
4. Нигматулин Р.И. Основы механики гетерогенных сред [Текст] / Р.И. Нигматулин. – М.: Наука, 1978. – 336 с.
5. Кривошеков, В.И. Определение плотности и потерь давления газопылевого потока в пневмосепараторе [Текст] / В.И. Кривошеков, Л.А. Новиков // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2012. – Вип. 48(89). – С. 69-72.
6. Береснев С.А. Физика атмосферных аэрозолей: Курс лекций [Текст] / С.А. Береснев, В.И. Грязин. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2008. – 227 с.
7. Бретшнайдер С. Свойства газов и жидкостей. Инженерные методы расчета [Текст] / С. Бретшнайдер. – Л.: Химия, 1966. – 536 с.
8. Матвеев А.Н. Молекулярная физика: Учеб. пособие для вузов [Текст] / А.Н. Матвеев. – М.: Высшая школа, 1981. – 400 с.

Гравітаційна сепарація

9. Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям [Текст] / И.Е. Идельчик. – М.: Машиностроение, 1975. – 559 с.

10. Справочник по расчетам гидравлических и вентиляционных систем [Текст]. – С.Пб: АНО НПО "Мир и семья", 2001. – 1154 с.

© Кривошеков В.И., Новиков Л.А., 2013

*Надійшла до редколегії 24.11.2012 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. Л.Ж. Горбець*