

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПИЛООЧИСТКИ

*Приводится физическая сущность явлений, которые протекают в пылеуловителях, определён характер распределения давлений и скоростей в них, проанализированы силы, которые действуют на частички аэрозоля, что позволяет раскрыть физическую сущность процесса движения воздушного потока в проектируемом аппарате, определить влияние действующих на частички аэрозоля в радиальном направлении сил на характер их движения, значительно снизить количество экспериментальных исследований по изучению влияния параметров аппарата на эффективность его работы.*

*In clause to be resulted the physical essence of the phenomena which proceed in vortical dedusters, character distribution of pressure and speeds in them is certain, forces which act частички an aerosol that allows to open physical essence of process of movement of an air stream in the projected device are analysed, to define the influence, acting частички an aerosol in a radial direction of forces on character of their movement, considerably to lower quantity of experimental researches on studying influence of parameters of the device on efficiency of its work.*

### Постановка проблеми

Пилоочистка відноситься до класу завдань аеродинамічної класифікації. Фізичними основами аеродинамічної класифікації є принципи розділення потоків, які засто-совуються при методах механічного відділення зваженого матеріалу в апаратах для вловлення пилу, циклонах, гідроциклонах і центрифугах.

При розділенні потоків на частинку матеріалу в різних напрямках впливають дві сили: масова сила і сила потоку. Масова сила залежить від густини, прискорення і об'єму, тобто від третього ступеня характерного діаметру частинки. Сила потоку, навпаки, залежить від коефіцієнта опору, динамічного тиску, обумовленого відносною швидкістю між частинкою і середовищем, що їх несе, і площі миделевого перетину частинки. Для коефіцієнта опору найважливішим є число Рейнольдса. При цьому в разі спрощеного розділення, якщо нехтувати перехідною областю, створюються дві зони:

- при невеликих числах Рейнольдса для сили потоку дійсний закон Стокса;
- при великих — квадратичний закон опору.

Оскільки сила потоку залежить від першого або другого ступеня діаметру частинки, а сила інерції — від третього, то дрібніші частинки більше піддаватимуться дії сили потоку, а більші — масової сили. Якщо масова сила і сила потоку діють у протилежних напрямках, то для певного значення величини частинки, що позначається як межа розділення, існує рівновага між масовою силою і силою потоку. Густина частинок впливає тільки на сили інерції, а межа розділення за інших однакових умов розташована тим нижче, чим вище густина матеріалу, що піддається класифікації.

Для здійснення технічного розділення потоків з великою точністю, коли кожна частинка знаходиться в зоні розділення дуже короткий час, у цій зоні повинні переважати однорідні умови розділення, тобто параметри, що діють на межі розділення, не повинні піддаватися ніяким змінам.

Аеродинамічна класифікація частинок найчастіше здійснюється в газодисперсному потоці. Найбільш інформативною є класифікація пиловловлюючих апаратів по вигляду альтернативних сил, що призводять до розсіювання частинок по величині. В аеродинамічних класифікаторах одна з таких сил — аеродинамічний опір частинок потоку, причому, він пропорційний величині  $\delta^\alpha$ , де  $\delta$  — розмір частинки,  $\alpha$  — показник ступеня, що змінюється в залежності від режиму обтікання від 1 до 2. Очевидно, що інша сила, що діє на частинку, повинна залежати від розміру в ступенно, що знаходиться за межами цього інтервалу. Звичайно це масові сили різної природи, загальним для яких є пропорційність об'єму частинок, тобто величині  $\delta^3$ .

За взаємною орієнтації аеродинамічної і масової сил пиловловлювачі можуть бути розділені на протиточні та інерційні. У протиточних апаратах альтернативні сили спрямовані в прямо протилежні сторони, тобто утворюють кут  $180^\circ$ .

У всіх інших випадках, коли альтернативні сили складають постійний або змінний кут, відмінний від  $180^\circ$ , навіть теоретична рівновага в апараті частинок іншого розміру неможлива. Визначальну роль тут грають нестационарні ефекти, найчастіше сила інерції відносного руху. Тому подібні апарати називають інерційними.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Математичні моделі складають основу методів розрахунку і оптимізації різних пиловловлювачів, прогнозування їх регулювальних характеристик. У практиці математичного моделювання процесів аеродинамічної класифікації найбільш поширеними є так звані детерміновані і стохастичні моделі.

Основа детермінованих моделей складає представлення процесу як руху невзаємодіючих частинок у стаціонарному потоці газу.

Квазістаціонарне наближення динамічних рівнянь руху є достатньо потужним інструментом теоретичного

дослідження руху частинок в газових потоках, що дозволяє, з одного боку, істотно спростити рішення, які отримуюмо, а з іншого, зберегти всі основні ефекти взаємодії частинок з потоком, особливо для умов рівноважної класифікації, коли  $\epsilon$ , щонайменше, один стійкий рівноважний стан.

Детерміновані моделі дозволяють оцінити вплив визначальних чинників та деякі характеристики розділення (розмір рівноважної частинки, у ряді випадків граничний розмір), але не дозволяють отримати розрахункові вирази кривих розділення. Побудова кривих розділення можлива тільки на основі стохастичних моделей процесів класифікації, що враховують сукупний ефект від випадкових дій з боку навколишнього середовища на кожен частинку.

Аналітичні формули для розрахунку кривих розділення є ефективним інструментом для якісного аналізу і математичного моделювання процесів класифікації. Проте проблемним в їх практичному використанні є питання про визначення стохастичних параметрів, які залежать від пульсацій повітря.

З наведеного вище матеріалу виходить, що і детерміновані моделі і стохастичні моделі процесів класифікації не враховують структуру турбулентного потоку суміші повітря і подрібненого матеріалу і специфіку руху частинок матеріалу різної гранулометрії. В даний час теоретичні основи створення машин пиловловлення розроблені з позицій взаємодії потоку повітря і окремої частинки без урахування пульсаційних складових швидкості повітря і масштабів вихрових структур в потоках транспортуючого середовища. Для забезпечення адекватності математичних моделей, що описують роботу устаткування вловлення матеріалів, необхідно враховувати вплив вихрових структур у потоках транспортуючого середовища.

Метою роботи є створення пиловловлювача, в якому за рахунок розташування ступеневого жалюзійного відокремлювача з жалюзі певної конфігурації коаксіально корпусу апарата покращуються гідродинамічні та аеродинамічні умови роботи, що в свою чергу призведе до підвищення ефективності його роботи і зменшення гідравлічного опору.

### Виклад основного матеріалу

Запропоновано конструкцію апарата, в якому пилоповітряна суміш надходить тангенціально до корпусу пиловловлювача через вхідний патрубок. Під дією відцентрових сил частинки пилу великої маси відкидаються до циліндрової частини корпусу апарата і рухаються під дією гравітаційних сил донизу спочатку позовж циліндричної, а потім конічної частини його до патрубку виходу пилу.

Частинки пилу меншої маси, які не можуть досягти поверхні циліндричної частини корпусу через опір повітря, рухаються до жалюзійного відокремлювача. Вторинне очищення повітря відбувається при проходженні його через жалюзі, де повітря огинає жалюзі, а тверді частинки пилу потрапляють на них і рухаються до пиловипускного патрубка.

Для математичного опису процесу пилоочистки необхідно розробити математичні моделі руху двофазних

дисперсних турбулентних течій в пристінній області стаціонарного турбулентного потоку як у циліндричній частині корпусу, так і в жалюзійній частини.

У в'язкому підшарі, що безпосередньо примикає до стінки, роль в'язкої напруги виявляється переважаючою в порівнянні з турбулентною напругою. Тому визначальними параметрами у в'язкому підшарі є коефіцієнт кінематичної в'язкості рідини  $\nu$  і динамічна швидкість (швидкість тертя)  $u'$ . Поза область в'язкого підшару внесок в'язкої напруги в повну напругу суцільного середовища, навпаки, незначний. Як проста апроксимація пульсаційної структури потоку, що несе, в пристінній області прийемо просту двозонну модель, що складається з в'язкого підшару з нульовою інтенсивністю пульсацій і турбулентної зони з постійною інтенсивністю пульсацій

$$(u'_i u'_j) = A_{ij} u_0^2 H(y - \delta) \quad (1)$$

де  $y$  — відстань від стінки,  $A_{ij}$  — постійні коефіцієнти.

Товщина в'язкого підшару дорівнює

$$\delta = \delta + \frac{\nu}{u_0}, \quad \delta_+ = const. \quad (2)$$

Передбачається також, що лагранжев часовий масштаб турбулентності поблизу стінки має постійне значення

$$T_L = T + \frac{\nu}{u_0^2}, \quad T_+ = const. \quad (3)$$

Далі прийемо, що усереднене ковзання частинок щодо потоку, що несе, є відносно невеликим, відтак впливом ефекту перетину траєкторій на час взаємодії частинок з турбулентними вихорами можна нехтувати. Тоді, оскільки ми також не враховуємо зворотний вплив на потік, що несе, і зіткнення частинок, система рівнянь, до якої входять рівняння збереження маси, балансу кількості руху, для інших моментів пульсацій швидкості частинок (турбулентної напруги дисперсної фази), тензор турбулентної дифузії частинок, розщеплюється: концентрація  $\Phi$  і інтенсивність поперечних пульсацій  $(v_y'^2)$  можуть бути знайдені незалежно від інших гідродинамічних характеристик дисперсної фази. Для гідродинамічно розвиненої течії, властивості якої змінюються тільки у нормальному до стінки напрямку, за відсутності осадження частинок отримуються наступні рівняння для визначення  $\Phi$  і  $(v_y'^2)$ :

$$\Phi \frac{d(v_y'^2)}{dy} + ((v_y')^2 + g_u A_{yy} u_0^2 H(y - \delta)) \frac{d\Phi}{dy} = 0, \quad (4)$$

$$\tau_p^2 \frac{d}{dy} \left[ \Phi \left( (v_y'^2) + g_u A_{yy} u_0^2 H(y - \delta) \right) + \frac{d(v_y'^2)}{dy} \right] + 2\Phi \left( f_0 A_{yy} u_0^2 H(y - \delta) - (v_y'^2) \right) = 0 \quad (5)$$

Відповідно до експериментальних даних прийемо  $A_{yy} = 1$  і перейдемо до безрозмірних змінних

$$(v_{y+}'^2) = \frac{(v_y'^2)}{u_0^2}, \quad \lambda = \frac{y}{\delta} = \frac{y_+}{\delta_+}, \quad y_+ = \frac{y u_0}{\nu}.$$

$$\tau_0 = \frac{\tau_p u_0}{\delta} = \frac{\tau_+}{\delta_+}, \quad \tau_+ = \frac{\tau_p u_0^2}{\nu}.$$

Рівняння (4) і (5) в нових змінних наберуть вигляду

$$\Phi \frac{d(v'_{y+})^2}{d\lambda} + ((v'_{y+})^2 + g_u H(\lambda - 1)) \frac{d\Phi}{d\lambda} = 0, \quad (6)$$

$$\tau_p^2 \frac{d}{d\lambda} \left[ \Phi \left( (v'_{y+})^2 + g_u H(\lambda - 1) \right) + \frac{d(v'_{y+})}{d\lambda} \right] + 2\Phi \left( f_0 H(\lambda - 1) - (v'_{y+})^2 \right) = 0 \quad (7)$$

Граничні умови для (6) і (7) за відсутності осадження частинок на стінці, задаються у вигляді

$$\tau_0 \frac{d(v'_{y+})}{d\lambda} = 2 \frac{1 - e_y^2}{1 + e_y^2} \left( \frac{2(v'_{y+})}{\pi} \right)^{1/2} \quad \text{при } \lambda = 0;$$

$$\frac{d(v'_{y+})}{d\lambda} = 0, \quad \Phi = 1 \quad \text{при } \lambda = \infty; \quad (8)$$

Нехтуючи впливом інерційності частинок на час їх взаємодії з турбулентними вихорами, покладемо  $T_{lp}$  таким, що дорівнює лагранжеву масштабу (3). Тоді коефіцієнти залучення дорівнюють

$$f_u = \frac{1}{1 + \tau_0}, \quad g_u = \frac{1}{\tau_0(1 + \tau_0)}.$$

Зважаючи на (6), рівняння (7) може бути перетворено до вигляду

$$\tau_0^2 \left( (v'_{y+})^2 + g_u H(\lambda - 1) \right) \frac{d^2(v'_{y+})}{d\lambda^2} + 2 \left( f_u H(\lambda - 1) - (v'_{y+})^2 \right) = 0, \quad (9)$$

що дозволяє знайти  $(v'_{y+})^2$  незалежно від  $\Phi$ . Побудуємо рішення рівняння (9) в областях  $0 < \lambda < 1$  і  $1 < \lambda = \infty$ , а потім "зшиємо" ці рішення.

У зоні в'язкого підшару ( $0 \leq 1$ ) рівняння (9) зводиться до

$$(v'_{y+})^2 \left( \frac{d^2(v'_{y+})}{d\lambda^2} - \frac{2}{\tau_0^2} \right) = 0. \quad (10)$$

Рішення (10), з урахуванням (8) набуває вигляду

$$(v'_{y+})^2 = 0 \quad \text{при } 0 < \lambda < \lambda_0,$$

$$(v'_{y+})^2 = \frac{(\lambda - \lambda_0)^2}{\tau_*^2} \quad \text{при } \lambda_0 < \lambda < 1, \text{ або} \quad (11)$$

$$(v'_{y+})^2 = (v'_{y+}(0))^2 + \frac{2(1 - e_y^2)}{\tau_*(1 + e_y^2)} \left( \frac{2(v'_{y+}(0))}{\pi} \right)^{1/2} \lambda + \frac{\lambda^2}{\tau_*^2}$$

при  $0 < 1 < 1$  (12)

Рішення (11) має місце при  $\tau_* < \tau_{cr}$ , а (12) реалізується при  $\tau_* > \tau_{cr}$ . Критичне значення  $\tau_{cr}$  параметра інерційності  $\tau_*$

є точкою біфуркації і відповідає умові  $\lambda_0 = 0$ .

У турбулентній зоні ( $1 \leq U$ ) рівняння (9) записується як

$$\tau_*^2 \frac{d^2(v'_{y+})}{d\lambda^2} + \frac{2(f_u - (v'_{y+})^2)}{(v'_{y+})^2 + g_u} = 0. \quad (13)$$

Для побудови аналітичного рішення лінеаризуємо (13), вважаючи, що в знаменнику другого члена  $(v'_{y+})^2 = (v'_{y+}(1))^2$ . В результаті отримаємо наближене рішення

$$(v'_{y+})^2 = (v'_{y+}(1))^2 - f_u \times \exp \left[ \frac{2^{1/2}(\lambda - 1)}{\tau_* \left( (v'_{y+}(1))^2 + g_u \right)^{1/2}} \right] + f_u$$

при  $1 < \lambda = \infty$ . (14)

Умови зшивання рішень у в'язкій і турбулентній зонах мають вигляд

$$(v'_{y+}(1 - 0))^2 = (v'_{y+}(1 + 0))^2,$$

$$(v'_{y+}(1)) \left( \frac{d(v'_{y+})}{d\lambda} \right)_{1-0} = (v'_{y+}(1) + g_u) \left( \frac{d(v'_{y+})}{d\lambda} \right)_{1+0} \quad (15)$$

З (11), (14) і (15) випливають наступні співвідношення для визначення  $(v'_{y+}(1))$  і  $\lambda_0$  при  $\lambda \tau_* < \tau_{cr}$ :

$$(f_u - (v'_{y+}(1))^2) \left( (v'_{y+}(1) + g_u) \right)^{1/2} = (2(v'_{y+}(1))^3)^{1/2},$$

$$\lambda_0 = 1 - \tau_* \left( (v'_{y+}(1)) \right)^{1/2}. \quad (16)$$

З (12), (14) і (15) отримаємо співвідношення для знаходження  $(v'_{y+}(1))$  і

$$(f_u - (v'_{y+}(1))^2) \left( (v'_{y+}(1) + g_u) \right)^{1/2} =$$

$$(v'_{y+}(1)) \left[ \frac{2^{1/2}}{\tau_*} + \frac{2(1 - e_y^2)}{\pi^{1/2}(1 + e_y^2)} (v'_{y+}(0))^{1/2} \right], \quad (17)$$

Критичний параметр інерційності визначається із співвідношення  $\tau_{cr}^2 (v'_{y+}(0)) = 1$ , не залежить від коефіцієнта відновлення імпульсу  $e_y$  і дорівнює 2,81.

Розподіл концентрації частинок, що задовольняє умові  $\Phi(v) = 1$ , визначається інтегралом рівняння (6) і описується виразом

$$\Phi = \left\{ \frac{(v'_{y+}(1)) \left[ \tau_* \left( (v'_{y+}(1) + g_u) \right) \left( (v'_{y+}(1))^2 \right) \right]^{-1}}{\left[ \tau_* \left( (v'_{y+}(1) + g_u) \right) \right]^{-1}} \right\}^{-1}$$

при  $1 < 1$  (18)

В міру збільшення інерційності частинок інтенсивність пульсацій їх швидкості все більше відхиляється від інтенсивності пульсацій у суцільному середовищі (1) і прагне до однорідного розподілу. Концентрація частинок поблизу стінки різко зростає, тобто спостерігається акумуляція частинок у зоні в'язкого підшару. Явище акумуляції частинок у неоднорідних турбулентних потоках пояснюється їх турбулентною міграцією (турбофорезом) з області з

високою інтенсивністю турбулентних пульсацій швидкості до зони з низьким ступенем турбулентності (зокрема, у в'язкий підшар на обтічній поверхні).

Створення системи підбору обладнання для вловлення пилу, здатної підібрати тип апарата пиловловлення в кожному конкретному випадку технологічного процесу звівши при цьому на нуль можливість пожежі та вибуху.

База даних Model.mdb містить дані, що стосуються пиловловлювачів та засоби їх обробки. В базі даних реалізовано зручний інтерфейс користувача, який дозволяє розрахувати параметри пиловловлювачів та їх ефективність на основі даних, що містяться в базі даних та введених користувачем змінних величин: витрат повітря в апараті ( $m^3/год$ ) та розміру частинок пилу ( $10-6 \mu$ ). Поняття "розмір частинок пилу" включає наступні параметри: дисперсний і хімічний склад, морфометричні характеристики і густину. Назви пиловловлювачів, їх конструктивних параметрів і формули для їх розрахунку є наперед заданими, користувач не зможе безпосередньо змінювати їх.

Для використання даної бази даних необхідний IBM-сумісний комп'ютер з встановленими на ньому операційною системою Windows 95 або вище і офісним застосуванням Microsoft Access 97. Одразу після завантаження бази даних на екрані з'являється вікно. В ньому користувачу пропонується вибрати, що саме треба розрахувати: математичну модель відцентрово-інерційних апаратів, статистичну модель акустичних апаратів та конструктивні параметри пиловловлювачів.

У нижній частині форми знаходяться поля для вводу параметрів пилогазового потоку: витрати повітря в апараті ( $m^3/год$ ) та медіанний діаметр частинок пилу ( $10^{-6} \mu$ ). В термін "медіанний діаметр частинок пилу" входять такі характеристики пилу, як дисперсний та хімічний склад, морфометричні показники пилу, густина. У цих полях користувач задає свої значення параметрів, після чого в полі результату отримується значення ефективності роботи пиловловлювача. При зміні значень цих полів перерахунок ефективності здійснюється автоматично.

Таким чином, увівши вищезазначені параметри, ми зможемо автоматично отримати тип апарата високоефективного вловлення пилу для даного типу виробництва, а потім, увівши його тип у наступну програму, автоматично отримати порядок його підбору, розрахунку та конструкцію. Банк даних типів пиловловлювачів, які приймають участь у цій системі, може постійно оновлюватися та замінятися.

## Висновки

Проведений теоретичний аналіз і запропонована нами модель дозволяє: розкрити фізичну суть процесів руху повітря в проєктованих пиловловлювачах, визначити вплив сил, що діють на частинки, на характер їх руху; значно знизити кількість експериментальних досліджень з вивчення впливу параметрів апарата на ефективність очищення повітря і провести їх цілеспрямовано; створити принципово нові конструкції відцентрово-інерційних пиловловлювачів.

## Література

1. Батлук, В.А. Рівень забруднення атмосферного повітря та його вплив на стан здоров'я населення України / В.А. Батлук, Н.М. Параняк, В.Г. Макаруч // Збірник наукових праць "Строительство, материаловедение, машиностроение" № 52, Серія "Безопасность жизнедеятельности". — Днепропетровск, 2010. — С. 205—210.
2. Батлук, В.А. Основи безпеки життя та діяльності людини / В.А. Батлук, Є.В. Романцов, В.Г. Макаруч // Тези доповідей XI міжнародної науково-методичної конференції "Безпека життя і діяльності людини-освіта, наука, практика". — Львів, 2010. — С. 246 — 247.
3. Гордон, М.В. Єдина методика порівняльних випробувань пиловловлювачів // Під редакцією М.В. Гордона, Г.М. Зайцева, П.А. Коузова. — Л., 1967.
2. Батлук, В.А., Василів, Р.М. Математичне моделювання процесів пиловловлення в процесах виготовлення машин та обладнання / Тези доповідей VIII Міжнародної конференції "Прогресивна техніка і технологія 2007". — Київ-Севастополь, 2007.
3. Батлук, В.А. Принципово новий метод для очистки повітря від пилу / В.А. Батлук., Р.Ю. Сукач, Р.М. Василів, М.В. Басов // Матеріали доповідей на 7 міжнародній науково-методичній конференції "Безпека життєдіяльності людини — освіта, наука, практика". — Миколаїв: НУК, 2008. — С. 179 — 182.
4. Харлоу, Ф.Х. Чисельний метод частинок в комірках для задач гідродинаміки // Обчислювальні методи в гідродинаміці. — М.: Мир, 1967.

Надійшла 14.03.2012