

Ю.Є. Шелюх, к.т.н., Р.М. Василів, В.В. Артеменко, С.Я. Вовк (Львівський державний університет безпеки життєдіяльності)

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТРАНСПОРТУВАННЯ ТА ОСАДЖЕННЯ ПОЖЕЖОНЕБЕЗПЕЧНОГО ПИЛУ В ОЧИСНОМУ ОБЛАДНАННІ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦІЇ

В статті висвітлено сутність явищ, які перебігають в очисному обладнанні систем вентиляції. Проведений аналіз сил, які діють на частинки аерозолі, що дозволяє розкрити фізичну сутність процесу руху пилоповітряної суміші в проектуючому апараті. Визначено дію сил, які впливають на характер руху частинок пилу, що дозволяє значно знизити кількість експериментальних дослідів щодо визначення впливу конструктивних параметрів на ефективність його роботи.

У багатьох технологічних процесах беруть участь матеріали, що перебувають у дисперсному стані. Це й вихідна сировина, і напівпродукти, що утворюються, або кінцеві продукти. Всередині апаратів й у повітрі виробничих приміщень дисперсні матеріали утворюють аерозолі – системи, що складаються із твердих частинок, розподілених у газовому середовищі.

Якщо такі аерозолі горючі, то вони становлять потенційну небезпеку, і їх наявність вимагає дотримання певних засобів безпеки.

Характерна ознака аерозолів – їх нестійкість: під дією сили ваги частинки осаджуються на поверхнях, технологічного обладнання, а під дією повітряних потоків пилові відкладення можуть знову переходити у зважений стан. Пожежну небезпеку становлять як пилові хмари, так і відкладення пилу на будівельних конструкціях і технологічному устаткуванні.

Вибухи пилу почали відбуватися при створенні інтенсивних технологічних процесів переробки дисперсних матеріалів: при дробленні і помолі зерна, при видобутку кам'яного вугілля, тощо. Перші описані вибухи пилу відносяться до другої половини XVIII ст.

Розвиток промисловості супроводжується залученням у сферу виробництва й створення нових видів потенційно пожежонебезпечних речовин: пластмас, барвників, пестицидів, лікарських препаратів тощо. Існування їх у дрібнодисперсному стані створює загрозу вибуху в середині обладнання, у виробничих приміщеннях. Статистика свідчить, що число пожеж і вибухів промислового пилу продовжує залишатися значним. Це пояснюється порушенням правил пожежної безпеки при експлуатації технологічного обладнання.

Для зниження пожежовибухонебезпечних властивостей матеріалів необхідно в першу чергу – довести концентрацію пилу, що утворюється при обробці і переробці до величин, які обмежені нормами гранично-допустимих концентрацій (ГДК). З цією метою використовується цілий ряд апаратів «сухого» очищення: гравітаційні камери, жалюзійні, інерційні пиловловлювачі, циклони, фільтри тощо.

З цілого ряду конструкцій пиловловлювачів ми зупинилися на вихрових, які вважаємо найбільш ефективними. Конструювання вихрових пиловловлювачів повинно бути направлено на вирішення наступних основних задач:

- підвищення ефективності роботи;
- збільшення питомої продуктивності;
- зменшення гідравлічного опору;
- зниження металоємності;
- зменшення енергоємності.

Аналіз останніх досліджень показує, що різкого підвищення їх продуктивності і зменшення металоємності можна досягти використанням прямого руху двофазних потоків у зоні розділення, при якому не накладаються обмеження на швидкість руху потоків.

Найбільш ефективним принципом пилоочистки при прямоточному русі пилогазового потоку є відділення пилу у відцентровому полі, інтенсивність якого може в декілька сотень разів перевищувати інтенсивність гравітаційного та інерційного полів, що визначає основні конструктивні варіанти прямоточно-вихрових пиловловлювачів.

Використання прямоточного вихрового принципу руху пилогазового потоку дозволяє створити апарати з невисокою металоємністю (0,6-0,7 кг на 1000 м³ газу, що обробляємо за добу). В той час, коли металоємність інерційних апаратів складає 3,0 кг на 1000 м³ за добу. Гідравлічний опір таких пиловловлювачів при максимальній пропускній здатності складає 1000 Па.

Вихрові пиловловлювачі характеризуються за наступними ознаками:

- за напрямком повітря в зоні відділень;
- за способом організації вихрового руху;
- за особливостями кінцевого очищення повітря від пилу;
- за компонованням вихрових елементів.

Для пиловловлювача з рухом вниз можливі будь-які теоретично обґрунтовані швидкості руху пилогазового потоку. При русі фаз вверх середньо витратна швидкість газу по перетину апарата не може бути нижчою за 10-12 м/с, тому що виникають пульсаційні швидкості.

В апаратах з рухом пило газového потоку догори збільшується ефективність пиловловлення за рахунок того, що проекції сили ваги аерозолів направлені у протилежний бік від напрямку руху газової фази, що зменшує висоту сепараційної зони і зменшує металоємність.

Діаметр вихрових апаратів не повинен перевищувати 150-300 мм. При швидкості руху газу в таких апаратах 15-40 м/с відцентрове прискорення перевищує прискорення сили ваги в 150-200 разів.

Ефективність процесу розділення у вихрових апаратах пропорційна потужності поля відцентрових сил, тому існуючі конструкції містять спеціальні конструктивні рішення, які направлені на забезпечення і збереження заданого рівня закручування газового потоку (додаткові завихрювачі потоку, які розташовані у приосьовій зоні на достатній відстані від вхідного патрубка).

Порівняно з циклонами, вихрові пиловловлювачі мають наступні переваги: більш високу ефективність очищення дрібнодисперсного пилу; відсутність зносу активних частин апарата, можливість обезпилювання газів з високою температурою за рахунок використання вторинного газу; можливість регулювання процесу сепарації за рахунок регулювання витрат вторинного газу.

Основною відмінністю вихрових пиловловлювачів від циклонів є допоміжний газовий потік, що закручується. У вихровому апараті соплового типу запилений газовий потік закручується лопатковим завихрювачем і рухається вгору, при цьому він попадає під дію потоків вторинного газу, що витікає з тангенційно розташованих патрубків. Під дією відцентрових сил зважені в потоці частинки пилу відкидаються до периферії, а звідти – у спіральний потік вторинного газу, який направляє їх вниз у кільцевий міжтрубний простір. Вторинний газ у ході спірального обтікання потоку газу, що очищуємо, поступово повністю поступає в нього. Кільцевий простір навколо вхідного патрубка оснащеного підпірною шайбою, яка забезпечує безповоротне попадання пилу в бункер.

З економічної точки зору, найгіршою являється конструкція апарату з використанням атмосферного повітря в якості вторинного газу, які використовуються з метою охолодження запилених газів. Найбільш економічним є використання для цієї мети самих запилених газів, тоді продуктивність апарату збільшується на 40-60 % без зменшення ефективності очистки.

Продуктивність вихрового пиловловлювача щодо газу може змінюватися в межах 0,5-1,5 номінальної продуктивності, що пояснюється вирішальним впливом на ефективність

апарату параметрів вторинного газу, при збереженні яких залишається незмінною колова швидкість закручування потоку запиленних газів і відповідно відцентрова сила, яка діє на частинки. Встановлено, що оптимальна витрата вторинного газу має складати 30-35% первинної.

До недоліків вихрових пиловловлювачів можна віднести: необхідність додаткового вентилятора, збільшення за рахунок вторинного газу загального об'єму газів, які проходять через апарат, складну конструкцію апарата.

Метою досліджень є вивчення процесів, що перебігають у вихрових апаратах, створення на їх основі математичної моделі балансової схеми транспортування й осадження частинок аерозолу та розробка принципово нового очисного обладнання з підвищеною ефективністю роботи.

Для вивчення фізичного змісту процесів, які відбуваються у вихровому апараті та для обґрунтування вибору параметрів для експериментальних досліджень ми побудували 3-х мірну кінцево-елементну модель вихрового пиловловлювача, для якої методом кінцевих елементів (МКЕ) вирішена система рівнянь Нав'є-Стокса для турбулентної течії повітря. З цією метою побудована геометрична модель з урахуванням тих геометричних параметрів вихрового апарата, зовнішній вигляд якої показаний на рисунку 1.

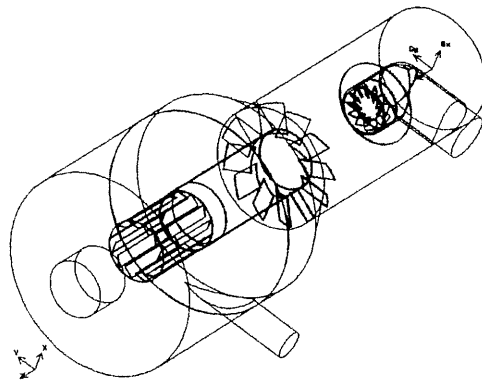


Рис. 1. Геометрична модель циклона

У результаті побудови математичної моделі з використанням ПК ми отримали поля швидкостей і тиску повітря у вихровому пиловловлювачі без урахування вмісту пилу в корпусі апарата. Лінії руху потоку повітря в проектуваному циклоні показані на рисунку 2 при швидкості подачі повітря у верхній і нижній входні патрубки апарата – 30 м/с.

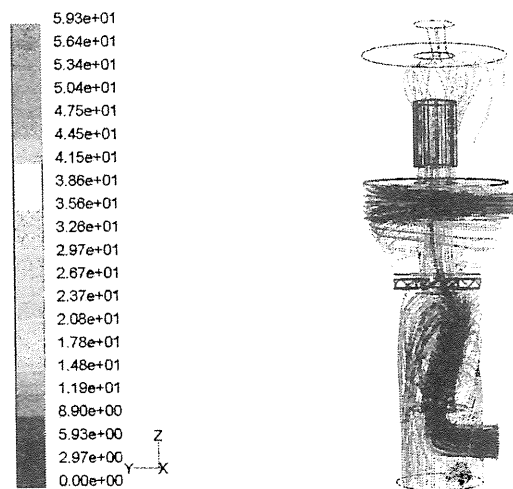


Рис. 2. Лінії руху повітря в проектуваному пристрої

З рисунка 2 видно, що повітря, яке подається через нижній вхідний патрубок набуває обертовий рух завдяки завихрювачу, в результаті чого частина повітря надходить до стінок корпусу нижньої частини апарата й рухається до нижнього вихідного патрубку. Інша частина потоку рухається до осі апарату і далі попадає у верхню частину корпусу. Допоміжне повітря, яке подається тангенціально, через верхній вхідний патрубок рухається по спіралі до нижньої циліндричної частини і, проходячи через завихрювач, набуває додаткових обертів, що збільшує інтенсивність обертання повітря, яке подається через нижній вхідний патрубок. У результаті внутрішній потік повітря рухається вздовж осі апарату вверх до жалюзійного відокремлювача і, пройшовши крізь нього, виводиться у верхній патрубок очищеного повітря. Вихровий рух повітря в центральній частині апарата можна побачити, якщо розсікти його корпус площиною перпендикулярною до його осі, що і показано на рис. 3.

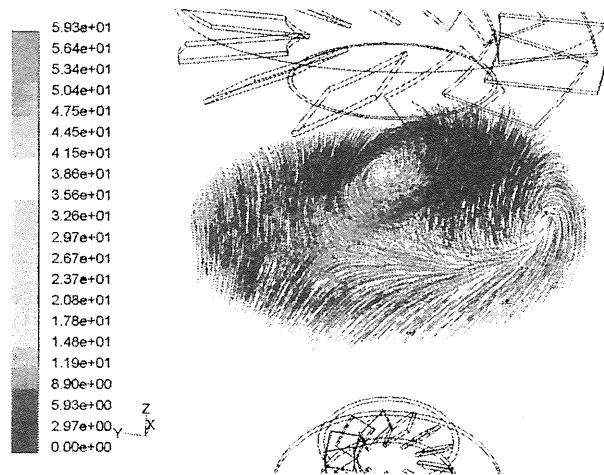


Рис. 3 Лінії руху повітря в поперечному перерізі апарата в нижній його частині пристрою

Такий рух повітря пояснюється перепадом статичного тиску між стінками апарата та його центральною частиною.

Припустимо, що при подачі повітря з механічними домішками через нижній вхідний патрубок, важкі частинки будуть відкидатися до стінок корпусу пиловловлювача і рухатимуться вниз до нижнього патрубку виходу пилу. Більш легкі частинки разом з повітрям у внутрішньому висхідному потоці будуть рухатися до жалюзійного відокремлювача і далі до верхнього патрубку виходу очищеного повітря, залишаючи очищену частину повітря у малому бункері апарата. Якщо розсікти корпус апарата площинами з певним кроком, як показано на рис. 4, то можна побудувати картину розподілу тиску в апараті для різних його перетинів.

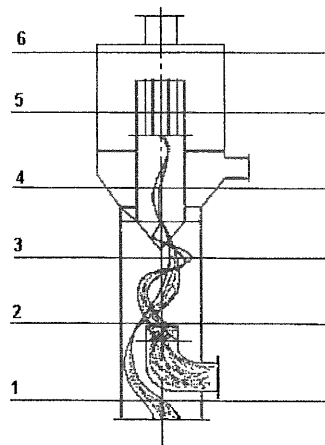


Рис. 4. Розташування поперечних площин у пристрої

На рисунку 4 показаний розподіл статичного тиску в проектованому апараті для різних поперечних перерізів його в площинах XZ і XY . Аналіз даних залежностей підтверджує припущення про падіння статичного тиску від периферії до осі апарата, що зумовлюють можливість підвищення очищення забрудненого повітря від механічних частинок пилу. З рисунку 5 також видно, що найбільш ефективно очищення повітря від пилу можливе в нижній циліндричній частині апарата при виході забрудненого повітря із вхідного патрубка через завихрювач, тому що перепад тисків у поперечних перерізах 2 і 3 найбільший. У верхній частині очищення інтенсифікується завдяки використанню жалюзійного відокремлювача.

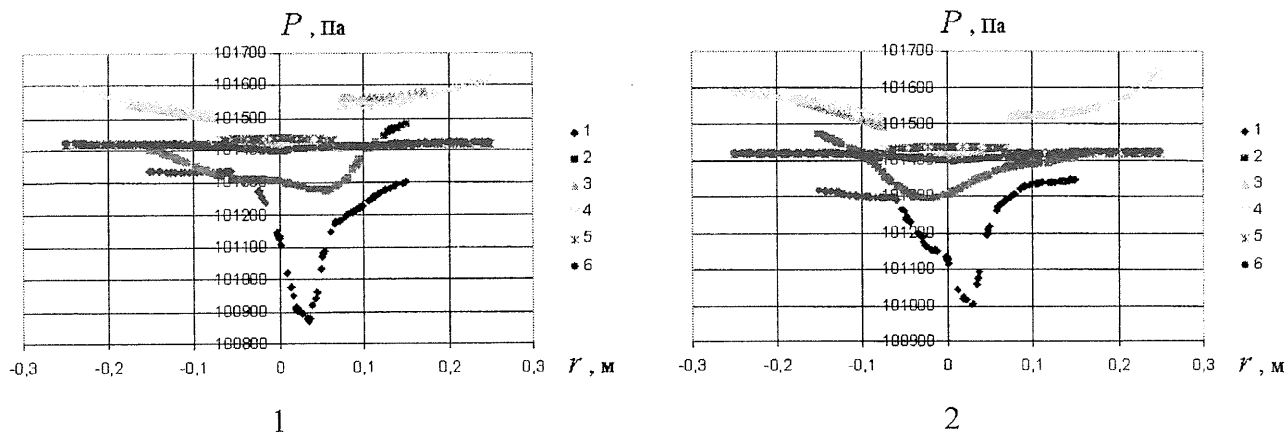


Рис. 5. Розподіл статичного тиску в апараті при швидкості подачі повітря 30 м/с:
1 – у площині XZ ; 2 – у площині YZ

Якщо побудувати епюри абсолютних швидкостей, то можна побачити, що рух повітря відбувається в описаних вище напрямках б і видно, що всередині апарата виникає потік повітря, який рухається уздовж осі до верхнього патрубку виходу очищеного повітря.

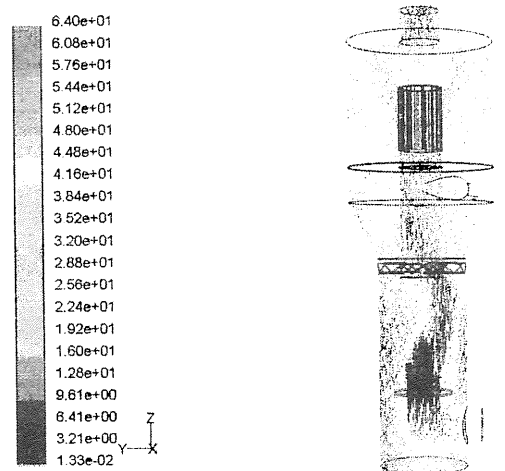


Рис. 6. Розподіл абсолютних швидкостей руху пилоповітряного потоку в апараті, м/с

Якщо побудувати епюри осьових швидкостей для різних поперечних перерізів проектованого апарата, то можна побачити, що в його пристінних зонах осьові швидкості потоку спрямовані до нижнього пиловивідного патрубку, а у центральній частині потік рухається нагору до верхнього патрубку виходу чистого повітря (рис. 7). Особливо це чітко видно для перетинів 1, 2, 3, в яких відбувається найбільш інтенсивне очищення від великодисперсних частинок аерозолію.

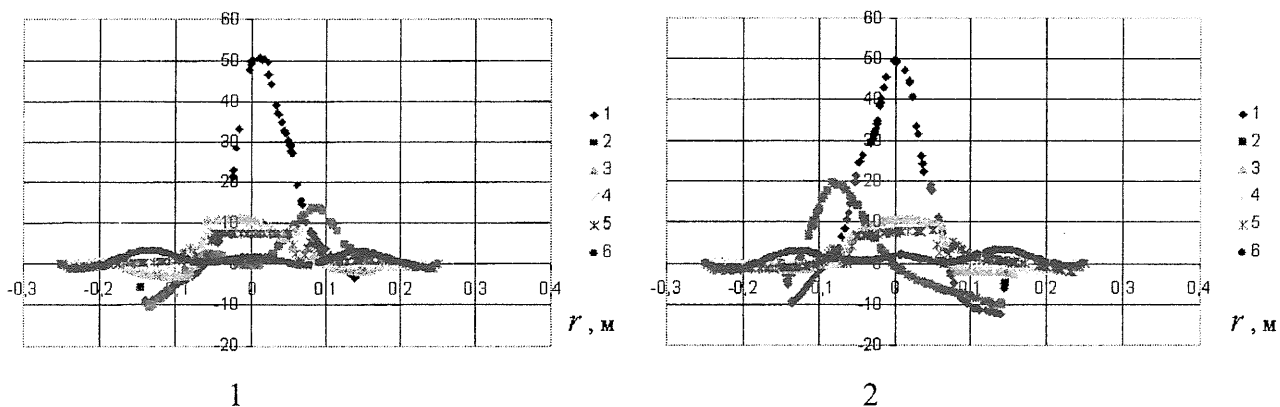


Рис. 7. Розподіл осевих швидкостей в апараті:
1 – у площині XZ; 2 – у площині YZ

Необхідно наголосити, що ефективність очищення значно залежить від радіальної складової швидкості повітряного потоку. Розподіл радіальних швидкостей показано на рис.8.

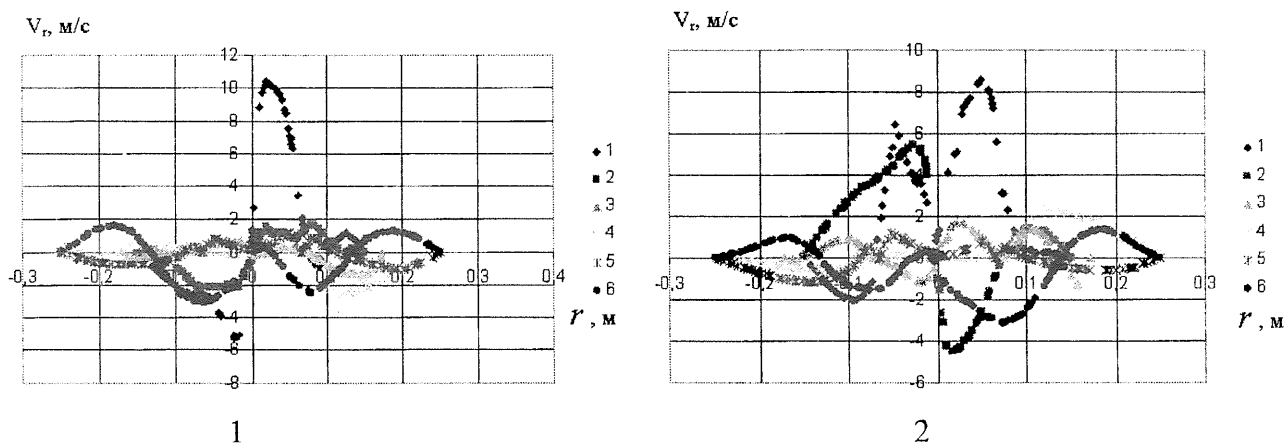


Рис. 8. Розподіл радіальних швидкостей у поперечних перерізах апарату:
1 – у площині XZ; 2 – у площині YZ

Аналогічні залежності можна побудувати для тангенціальних складових швидкості в апараті, що показано на рис. 9.

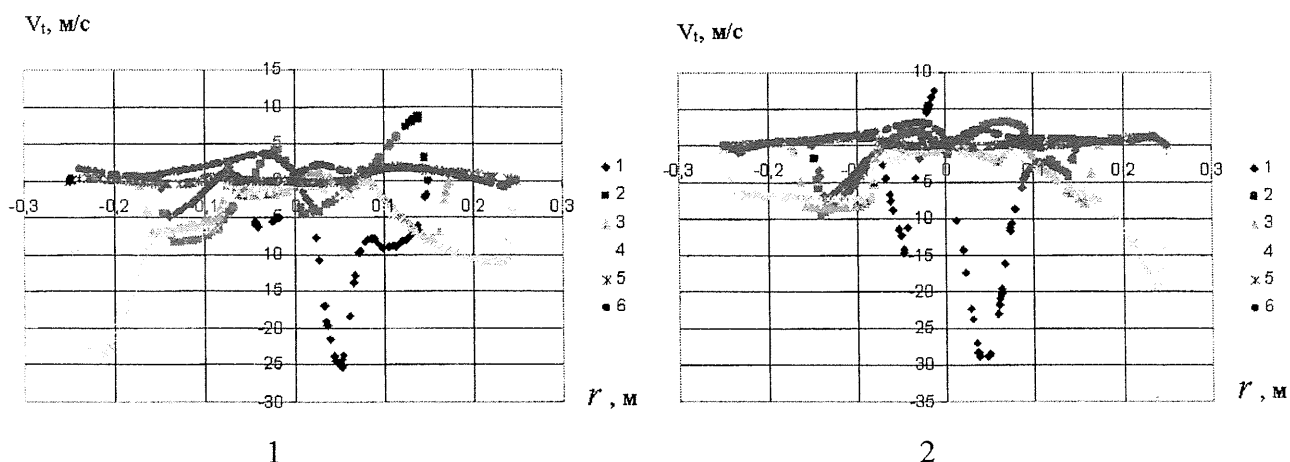


Рис. 9. Розподіл тангенціальних швидкостей у поперечних перерізах апарату:
1 – у площині XZ; 2 – у площині YZ

Аналіз залежностей, наведених на рис. 8, показує, що в центральній частині значення радіальних швидкостей вище, особливо в зоні площин 1 і 2, у якій відбувається інтенсивне очищення повітря. Із залежностей, показаних на рис. 9, видно, що тангенціальна швидкість біля стінок апарата вища, ніж біля осі. Особливо це чітко видно в зоні інтенсивного очищення повітря в нижній циліндричній частині, що відповідає перетинам 1, 2, 3 і 4.

Необхідно сказати, що, при розгляді руху частинок аерозолі у радіальному напрямку, на них діють наступні сили: сила тяжіння P , спрямована вертикально вниз; відцентрова сила $F_{Ц}$, що діє в радіальному напрямку й орієнтована від осі апарата до його стінок; сила опору руху середовища $F_{Оп}$, яка діє на частинку при її русі в радіальному напрямку і сила гідравлічного опору середовища $F_{ГІДР}$, зумовлена перепадом тисків біля стінок і осі апарата й направлена до його осі, як показано на рис. 10

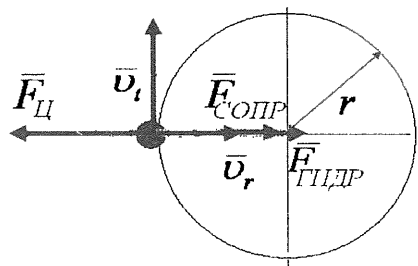


Рис. 10. Сили, що діють на частинку у відцентровому полі в радіальному напрямку

У цьому випадку можна запропонувати три варіанти характеру руху частинок.

1. Якщо відцентрова сила більша за модулем суми сил опору середовища й гідравлічного опору, то частинка рухається до стінок апарата і через нижній патрубок виходу пилу видаляється з нього.
2. Якщо сума сил опору середовища й гідравлічного опору більша за модулем відцентрової сили, то частинка рухатиметься до осі апарата і далі, разом з висхідним потоком повітря до жалюзійного відокремлювача й випускного патрубку очищеного повітря.
3. Якщо відцентрова сила дорівнює за модулем сумі сил опору середовища й гідравлічного опору, то частинка рухається в рівноважному стані на певній орбіті випадає в малий бункер, і її розмір визначає граничний діаметр частинок, які вловлюються в апараті.

При русі частинки в радіальному напрямку, її абсолютна швидкість складається із двох складових: першої – тангенціальної v_t , спрямованої по дотичній до траєкторії руху частинки, як показано на рисунку 3.29, і другої – радіальної v_r , спрямованої до осі.

Відцентрову силу можна визначити за формулою:

$$F_{Ц} = m \frac{v_t^2}{r_1}, \quad (1)$$

де m – маса частинки, кг;

v_t – тангенціальна швидкість руху частинки, м/с;

r – радіус обертання частинки, м.

Прийемо, що частинка має кулеподібну форму, тоді визначимо її масу за формулою :

$$m = \rho_T \frac{\pi d_q^3}{6}, \quad (2)$$

де ρ_T – щільність механічних домішок, кг/м³;

d_q – діаметр частинки, м.

Тангенціальну швидкість можна представити як добуток квадрата кутової швидкості обертання частинки ω на її радіус r :

$$v_t = \omega^2 r, \quad (3)$$

де ω – кутова швидкість обертання частинки, с^{-1} .

Тоді після нескладних перетворень із урахуванням виразів (1) і (2) формула для визначення відцентрової сили прийме наступний вигляд:

$$F_{Ц} = \rho_T \frac{\pi d_c^3}{6} \omega^2 r. \quad (4)$$

Силу опору середовища визначаємо за формулою:

$$F_{ОП} = 6\pi\eta r_c v_r, \quad (5)$$

де η – динамічна в'язкість середовища, Па·с;

r_c – радіус кулястої частинки, м;

v_r – радіальна швидкість руху частинки в потоці, м/с.

Динамічна в'язкість середовища пов'язана з кінематичною в'язкістю наступним виразом:

$$\eta = \rho_0 \nu, \quad (6)$$

де ρ_0 – щільність середовища, $\text{кг}/\text{м}^3$;

ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості, $\text{м}^2/\text{с}$.

Якщо врахувати, що радіус частинки r_c дорівнює половині її діаметра d_c , то сила опору середовища визначиться за формулою:

$$F_{ОП} = 3\pi\rho_0\nu d_c v_r. \quad (7)$$

Сила гідравлічного опору середовища визначається за формулою:

$$F_{ГДР} = C_1 S_c \frac{\rho_0}{2} v_r^2, \quad (8)$$

де C_1 – коефіцієнт, що залежить від форми тіла, для кулі $C_1 = 0,1 - 0,4$;

S_c – площа найбільшого перетину частинки в площині, перпендикулярній напрямку руху потоку, м^2 ;

ρ_0 – щільність середовища, $\text{кг}/\text{м}^3$;

v_r – радіальна швидкість руху частинки в, м/с.

З урахуванням прийнятого нами допущення про те, що частинка має кулеподібну форму, площа найбільшого перерізу частинки в площині, перпендикулярній напрямку руху, визначиться як площа кола за формулою:

$$S_c = \frac{\pi d_c^2}{4}, \quad (9)$$

де d_c – діаметр частинки, м.

Силу гідравлічного опору середовища з використанням формули (9) можна знайти за формулою:

$$F_{ГДР} = C_1 \pi \frac{\rho_0 d_c^2}{8} v_r^2. \quad (10)$$

На основі врахування сил, що діють на частинку в апараті можна скласти рівняння її руху в радіальному напрямку у векторній формі:

$$\overline{F}_P = \overline{F}_Ц + \overline{F}_{ОП} + \overline{F}_{ГДР}, \quad (11)$$

де \overline{F}_P – сила руху, що діє на частинку в апараті в радіальному напрямку і визначає рух частинки до стінки або осі, Н.

Припустимо, що частинка рухається від осі до його стінки, тоді з урахуванням напрямків сил рівняння (11) у скалярних величинах прийме вигляд:

$$F_P = F_Ц - F_{ОП} - F_{ГДР}. \quad (12)$$

Силу руху \overline{F}_P можна представити в наступному виді:

$$F_д = ma_r, \quad (13)$$

де m – маса частинки, кг;

a_r – повне прискорення частинки в радіальному напрямку, м/с².

Повне прискорення частинки в радіальному напрямку a_r визначимо:

$$a_r = \frac{d^2r(t)}{dt^2}. \quad (14)$$

З урахуванням формул (2) і (14) силу руху визначимо:

$$F_P = \rho_T \frac{\pi d_u^3}{6} \frac{d^2r(t)}{dt^2}. \quad (15)$$

Швидкість частинки в радіальному напрямку можна визначити як першу похідну від переміщення в радіальному напрямку:

$$v_r = \frac{dr(t)}{dt}. \quad (16)$$

Тоді, з урахуванням (16), силу гідравлічного опору середовища й силу опору середовища визначимо:

$$F_{ГДР} = C_1 \pi \frac{\rho_0 d_u^2}{8} \left(\frac{dr(t)}{dt} \right)^2, \quad (17)$$

$$F_{ОП} = 3\pi \rho_0 v d_u \frac{dr(t)}{dt}. \quad (18)$$

Тоді диференціальне рівняння руху частинки в радіальному напрямку можна записати наступним чином:

$$\rho_T \frac{\pi d_u^3}{6} \frac{d^2r_1(t)}{dt^2} = \rho_T \frac{\pi d_u^3}{6} \omega^2 r_1(t) - C_1 \pi \frac{\rho_0 d_u^2}{8} \left(\frac{dr_1(t)}{dt} \right)^2 - 3\pi \rho_0 v d_u \frac{dr_1(t)}{dt}. \quad (19)$$

Як видно із цього рівняння, характер руху може мати три варіанти, описаних нами вище.

Висновки:

Таким чином, проведений теоретичний аналіз і запропонована нами модель дозволяє:

- 1) розкрити фізичну сутність руху повітря, що очищається у проектованому апараті, визначити вплив діючих на частинку сил у радіальному напрямку на характер її руху;
- 2) значно знизити кількість експериментальних досліджень по вивченню впливу параметра апарата на ефективність очищення повітря й провести їх цілеспрямовано;
- 3) створити принципово нові конструкції відцентрово-інерційних вихрових пиловловлювачів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. Харлоу Ф.Х. Чисельний метод частинок в комірках для задач гідродинаміки. Обчислювальні методи в гідродинаміці. – М.: Мир, 1967.

2. Батлук В.А., Азарський К.І. Математичне забезпечення вибору оптимального обладнання для очистки повітря від пилу за допомогою комп'ютерної техніки II Український журнал медичної техніки і технології-Київ-2000.-№2-С. 92-94.
3. Батлук В.А. Математические модели процессов разделения гетерогенных систем при пылеочистке II Міжнар. наук. практ. конф. "Нові машини для виробництва будівельних матеріалів і конструкцій, сучасні будівельні технології"-Полтава-2000.-С. 87-91.
4. Жуковський С.С., Лабай В.Й. Аеродинаміка вентиляції: Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2003. – 372 с.

УДК 614.841.45.001.2:66

Є.С. Ленартович, к.т.н., с.н.с., Є.О. Тищенко, К.І. Мигаленко, (Академія пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля МНС України)

ПРОЦЕС ГОРІННЯ ТА ПОШИРЕННЯ ПІДЗЕМНИХ ПОЖЕЖ НА ТОРФ'ЯНИКАХ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТОРФУ

У статті розглядається актуальна проблема горіння торфу та поширення підземних пожеж в залежності від його хімічної природи та фізико-хімічних властивостей, а також наведені результати досліджень швидкості об'ємного поширення горіння, ступеня задимленості камери і масової концентрації CO, NO₂ та SO₂ в повітрі.

Актуальність проблеми.

За статистичними даними МНС України [1] кожен день в Україні виникає 120-140 пожеж, з них 30-40 пожеж на торф'яниках. Торфові пожежі найчастіше виникають у районах торфорозробок і в районах боліт. Особливо небезпечними є підземні пожежі на торф'яниках. Небезпека торфових пожеж у тому, що в процесі горіння утворюються порожнини у вигорілому торфі, в які можуть провалюватись люди, тварини і техніка. В порах торф'яної маси знаходиться досить велика кількість повітря, тому торф має здатність тліти. Під час пожежі задимляються великі території тому, що тління продовжується з виходом полум'я на нових ділянках торфовищ. Велика задимленість впливає на екологію навколишнього середовища. Стан здоров'я людей різко погіршується. Великих втрат зазнає рослинний та тваринний світ.

Для гасіння пожеж на торф'яниках необхідно залучати велику кількість людей та техніки і знати процес горіння торфу [2]. На сьогоднішній день цей процес не достатньо досліджено і проблема є дуже актуальною, про що свідчать розробки Богданова В.В. [3], Сізікова А.С. [4], Іпатьєва А.В. [5] та інших науковців.

Метою даної роботи є вивчення процесу горіння торфу та поширення підземних пожеж на торф'яниках для забезпечення пожежної та техногенної безпеки, що є невід'ємною частиною державної діяльності щодо охорони життя та здоров'я людей, національного багатства і навколишнього середовища.

Пожежа – це насамперед горіння, а горіння – це екзотермічна хімічна реакція взаємодії між речовинами або процес горіння – це реалізація однієї з хімічних реакцій, реакцій окиснення – відновлення [6].

В основному горіння на пожежі – це окиснення відновників киснем повітря. Відновниками виступають здебільшого органічні речовини або суміші органічних речовин (торф, деревина, бензин, спирт) але можуть горіти і метали (натрій, магній, та власне будь-який метал) і деякі інші прості речовини (сірка, фосфор).