

УДК 621.928.9

В.А. Батлук, д-р техн. наук, проф.,
Н.М. Параняк, співшукач, **Е.В. Романцов**, співшукач,
Національний університет «Львівська політехніка»

ДОСЛІДЖЕННЯ ТРАЕКТОРІЙ РУХУ ЗВАЖЕНИХ ЧАСТИНОК У ЗАКРУЧЕНИХ ПОТОКАХ

В статті наводяться дані, які підтверджують тезу про неможливість сьогодні вловлювати дрібнодисперсний пил, тому запропоновано принципіально нові методи дослідження траєкторій руху зважених частинок пилу, застосування яких у запропонованій авторами конструкції відцентрово-інерційного пиловловлювача дозволяє стверджувати про підвищення ефективності вловлення такого типу пилу на 4-6% і зменшення енерго- і металоемкості.

пиловловлювач, циклон, траєкторії руху, ефективність, гідравлічний опір

Постановка проблеми. В останні роки об'єми викидів, скидів і утворення відходів істотно зменшилися, що більшою мірою пояснюється спадом виробництва а в меншій – здійсненням природоохоронних мір. У цей час ситуація в області техногенної безпеки на Україні така, що особливу тривогу викликає високий рівень аварійності існуючих технічних об'єктів і недостатні можливості в рішенні проблеми інженерної екології. Якщо в сфері оцінки шкідливих впливів на воду, ґрунт, повітря, і в цілому в області екологічної експертизи виробництв і моніторингу середовища, статичному обліку кількості промислових і побутових, а також у створенні полігонів і смітників відходів є певні досягнення, то в напрямку розробки нових екологічно чистих і безпечних технологій переробки відходів, досягнення й науково-технічна активність явно недостатні.

Тому потрібна розробка наукового підходу до питань охорони праці, екологічності й техногенної безпеки. Помітимо, що відомі підходи до проблеми техногенної безпеки розрізнені, часом відсутні науково обґрунтовані методики оцінки й кількісні критерії рівня небезпеки, недостатньо використовуються можливості в області комп'ютерних технологій, сучасних методів дослідження й математичне моделювання.

На багатьох промислових підприємствах України склався низький рівень техногенної безпеки. Це проявляється в частих викидах шкідливих речовин у навколишнє середовище, збільшення кількості промислових відходів, зниження рівня надійності об'єктів, погіршен-

ня здоров'я населення, що проживає поблизу виробництв і т.д. Причинами такої ситуації є старіння основних фондів, відсутність або повільні темпи їхнього відновлення, низька якість проектної документації, відсутність належного контролю стану об'єктів, засобів автоматизації й захисту. Дуже важливою причиною є також відсутність єдиних наукових методів оцінки й аналізу техногенної безпеки об'єктів на стадії проектування, що приводить до створення техногенно-небезпечних об'єктів. За останні роки проблеми екології стали винятково актуальними.

Сучасна ситуація на промислових підприємствах України характеризується явно незадовільним станом справ в галузі очистки повітря від пилу. В той же час масштабне технічне переозброєння підприємств, яке необхідне для забезпечення конкурентоздатності в умовах ринкової економіки, потребують надійної і досить тонкої очистки технологічних газів без якої нове, більш сучасне обладнання просто не в змозі функціонувати.

Аналіз останніх досліджень. Серед відомих і відносно недорогих апаратів для очистки повітря від пилу відцентрово-інерційні пиловловлювачі характеризуються найбільшими перспективами для універсального застосування. Основними причинами, які обмежують їх використання, являються високий гідравлічний опір і недостатня ефективність уловлення частинок з розмірами меншими за $10 \cdot 10^{-6}$ м, що обумовлено гідродинамічними особливостями закрученого потоку. Таким чином, встановлення основних закономірностей, які визначають ефективність роботи, аеродинамічні втрати, стійкість і режими руху повітряного потоку і зважених частинок у пиловловлювачах, являють собою важливу наукову проблему, що має велике практичне значення.

Велика кількість праць по цій тематиці зумовлена використанням специфічних якостей закрученого потоку в різних технологічних процесах. Проведений аналіз праць вітчизняних та закордонних дослідників показує, що в даний час недостатньо розглянуті питання математичного моделювання процесів, методики розрахунку і конструювання пиловловлювачів, що не дозволяє не тільки їх порівняти, але і прогнозувати енергетичні показники і ефективність роботи на різних стадіях проектування. До даного часу багато важливих з теоретичної і практичної сторони питань аеродинаміки закручених потоків вивчені недостатньо, а вибір пиловловлюючого обладнання проводиться у більшості випадків інтуїтивно.

Аналізуючи вищенаведене, ми чітко можемо визначити, що на сьогоднішній день для забезпечення санітарно гігієнічних вимог охорони довкілля не існує апаратної підтримки для створення норм викидів шкідливих речовин. Найкращі з існуючих для цієї мети установок не в змозі справитися з цією задачею. Тому нами була поставлена мета створити установки здатні високоефективно вловлювати дрібнодисперсний пил.

Щоб мати можливість приймати будь які конкретні заходи щодо усунення тих або інших джерел забруднення біосфери, потрібно насамперед виявити їх і встановити зв'язок між забрудненням і його наслідками. Без цього не можна зрозуміти явища й тим більше вжити заходів до його припинення.

Значимість проблеми зумовлена відсутністю завершеної наукової теорії процесу пилоочищення, яка б відповідала вимогам до ступеня очистки повітря від пилу.

Метою роботи є вивчення аеродинамічних характеристик закручених потоків з метою створення на їх основі принципово нових конструкцій відцентрово-інерційних пиловловлювачів.

Виклад основного матеріалу. Для вивчення фізичного змісту процесів, які відбуваються у нашому апараті та для обґрунтування вибору параметрів експериментальних досліджень нами була побудована трьохмірна кінцево-елементна 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 із урахуванням тих геометричних параметрів вихрового апарату, які були визначені нами. Зовнішній вигляд пиловловлювача показаний на рис. 1.

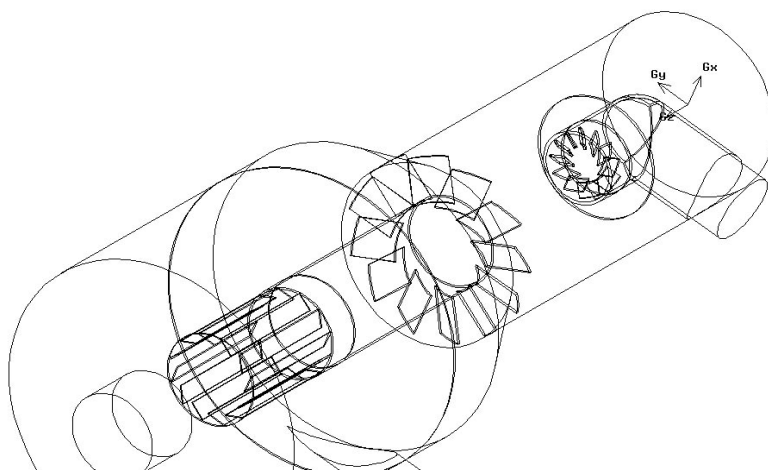


Рисунок 1 - Геометрична модель пиловловлювача

У результаті розв'язку цієї моделі з використанням ПЕОМ нами отримані поля швидкостей і тиску повітря у вихровому пиловловлювачі без урахування вмісту пилу в ньому. Лінії потоку повітря в проєктованому пиловловлювачі показані на рис. 2 при швидкості подачі повітря у верхній і нижній патрубках апарата 30 м/с.

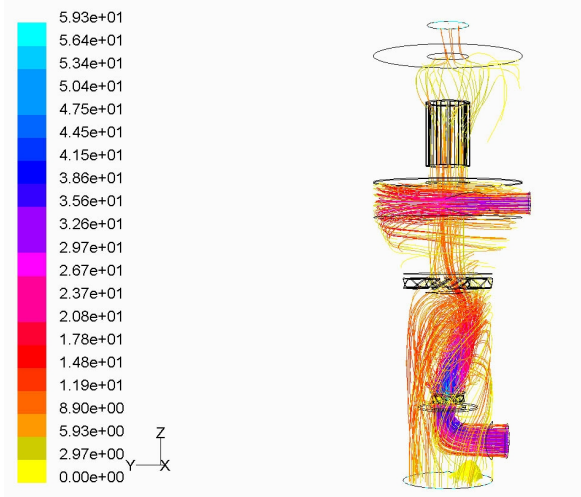


Рисунок 2 - Лінії струму повітря в проєктованому пристрої

З рис. 2 видно, що повітря яке подається через нижній отвір набуває обертального руху завдяки завихрювачу, у результаті чого значна частина повітря надходить до стінок нижньої частини корпусу апарата й рухається до нижнього патрубка виходу вловленого пилу, інша ж частина потоку рухається до осі апарата і попадає у верхню частину його корпусу. Повітря, яке подається тангенціально, через верхній вхідний патрубок, рухається по спіралі до нижньої циліндричної частини корпусу апарата і, проходячи через завихрювач, набуває додаткових обертів, що збільшує інтенсивність обертання повітря, яке подається через нижній патрубок. У результаті – внутрішній потік повітря рухається вздовж осі апарата вгору до жалюзійного відокремлювача і, пройшовши крізь нього, виводиться у верхній патрубок очищеного повітря. Вихровий рух повітря в центральній частині апарата можна побачити, якщо розсікти корпус площиною перпендикулярною до його осі, як показано на рис. 3.

Такий рух повітря пояснюється перепадом статичного тиску біля стінок апарата та у його центральній частині.

Припустимо, що при подачі через нижній патрубок повітря з механічними домішками, важкі частинки будуть відкидатися до стінок пиловловлювача і рухатимуться вниз до нижнього патрубка виходу пилу, тоді як більш легкі

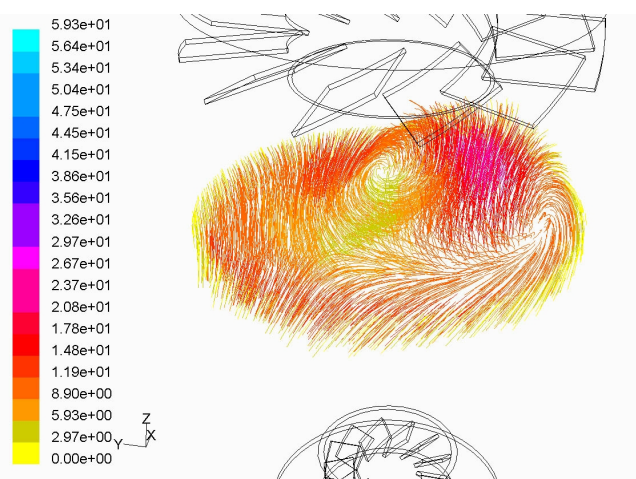


Рисунок 3 - Лінії струму в поперечному перерізі нижньої частини апарата

частинки разом з повітрям у внутрішньому висхідному потоці будуть рухатися до жалюзійного відокремлювача і далі до патрубку виходу очищеного повітря. Якщо розсікти корпус апарата площинами з певним кроком як показано на рисунку 4, то можна побудувати картину розподілу тиску в апараті для різних його перетинів.

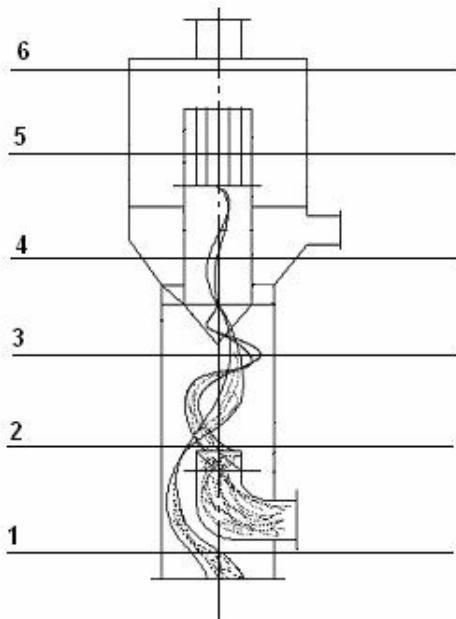


Рисунок 4 - Розташування поперечних площин в апараті

Якщо розсікти корпус апарата площинами з певним кроком як показано на рисунку 4, то можна побудувати картину розподілу тиску в апараті для різних його перетинів.

На рис. 5 показаний розподіл статичного тиску в проектованому апараті для різних поперечних перерізів у площинах XZ і XY. Аналіз даних залежностей підтверджує припущення про падіння статичного тиску від периферії апарата до його осі, що і зумовлює можливість очищення забрудненого повітря від механічних частинок пилу, причому очевидно, що найбільш ефективно очищення повітря від пилу можливе в нижній циліндричній частині апарата при виході забрудненого повітря з вхідного патрубку через завихрювач, тому що перепад тисків у поперечних перерізах 2 і 3 найбільший. У верхній же частині апарату очищення інтенсифікується за рахунок розташування жалюзійного відокремлювача.

ливе в нижній циліндричній частині апарата при виході забрудненого повітря з вхідного патрубку через завихрювач, тому що перепад тисків у поперечних перерізах 2 і 3 найбільший. У верхній же частині апарату очищення інтенсифікується за рахунок розташування жалюзійного відокремлювача.

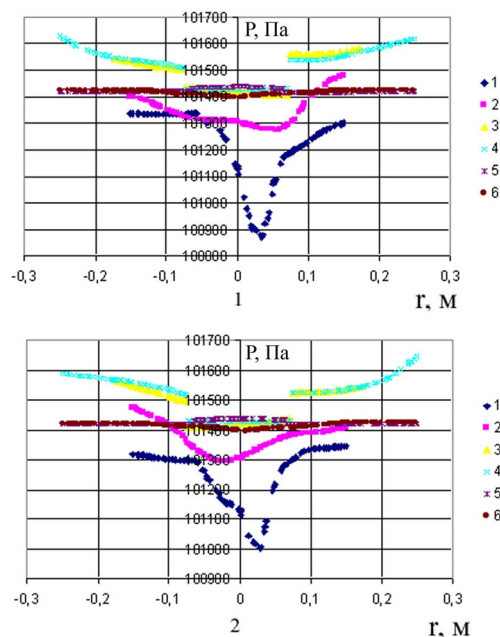


Рисунок 5 - Розподіл статичного тиску при швидкості подачі повітря 30 м/с:
1 – у площині XZ; 2 – у площині YZ

Якщо побудувати епюри абсолютних швидкостей, то можна побачити, що рух повітря відбувається в описаних вище напрямках (рис. 6), причому треба зауважити, що в середині апарата виникає потік повітря, який рухається вздовж осі до верхнього патрубку виходу очищеного повітря.

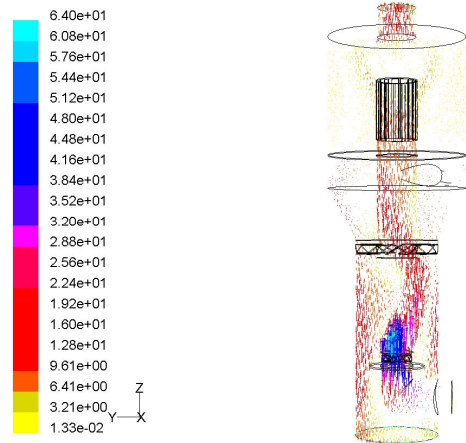


Рисунок 6 - Розподіл абсолютних швидкостей у пристрої, м/с

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, у центральній же частині потік рухається нагору до верхнього патрубку виходу чистого повітря (рис. 7). Особливо це чітко прослідковується для перетинів 1, 2, 3, в яких відбувається найбільш інтенсивне очищення повітря від великодисперсних частинок.

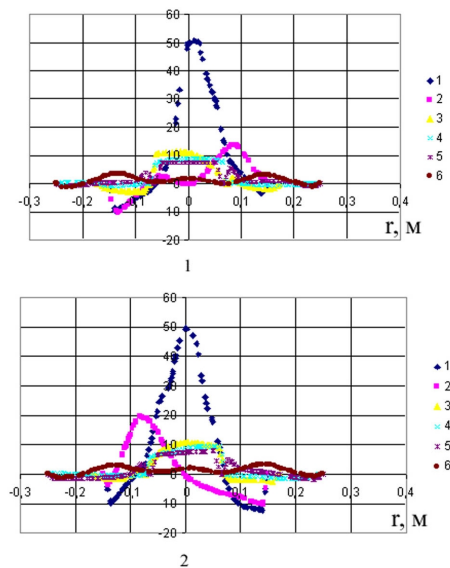


Рисунок 7 - Розподіл осьових швидкостей в апараті:
1 – у площині XZ; 2 – у площині YZ

Необхідно наголосити, що ефективність очищення більшою мірою залежить від радіальних складових швидкості повітряного потоку, розподіл яких показано на рис. 8.

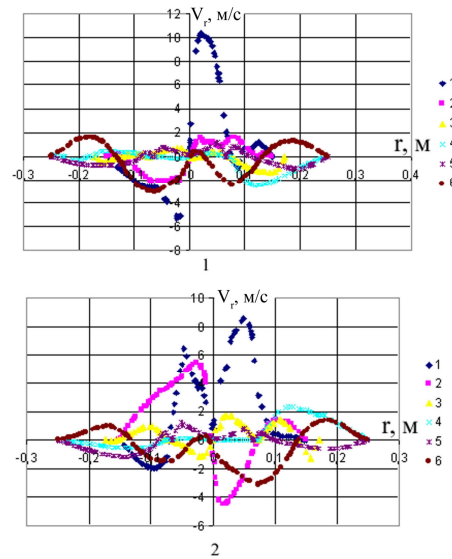


Рисунок 8 - Розподіл радіальних швидкостей у поперечних перерізах апарату:
1 – у площині XZ; 2 – у площині YZ

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

Аналіз залежностей, наведених на рисунку 8, показує, що в центральній частині значення радіальних швидкостей вище, особливо в зоні площин 1 і 2, де і відбувається інтенсивне очищення повітря. Із залежностей, показаних на рисунку 9, видно, що тангенціальна швидкість біля стінок апарату 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.

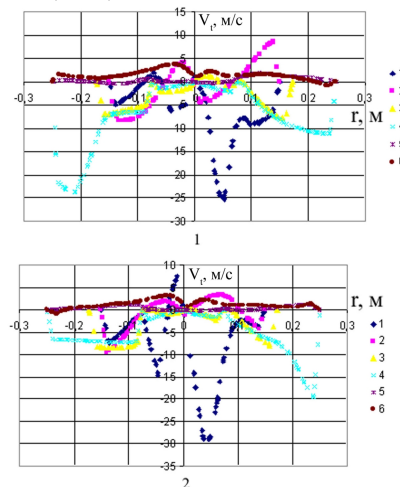


Рисунок 9 - Розподіл тангенціальних швидкостей у поперечних перерізах апарату: 1 – у площині XZ; 2 – у площині YZ

Необхідно сказати, що при розгляді руху частинки аерозолі у радіальному напрямку на неї 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 апарата $F_{ГДР}$, яка зумовлена перепадом тисків біля стінок і осі апарата і направлена до його осі, як показано на рис. 10.

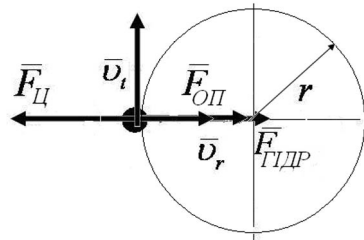


Рисунок 10 - Сили, що діють на частинку у відцентровому полі в радіальному напрямку

У цьому випадку можна запропонувати три варіанти характеру руху частинок:

1 – якщо відцентрова сила більша по модулю суми сил опору середовища і гідравлічного опору апарата, то частинка рухається до стінок апарата і через нижній вихідний патрубок видаляється з нього;

2 – якщо сума сил опору середовища й гідравлічного опору пиловловлювача більша по модулю відцентрової сили, то частинка буде рухатися до осі апарата і далі разом з висхідним потоком повітря – до жалюзійного відокремлювача і випускного патрубку очищеного повітря, залишаючи очищену частину повітря всередині апарата ;

3 – якщо відцентрова сила дорівнює по модулю сумі сил опору середовища й гідравлічного опору апарата, то частинка рухається в рівноважному стані по певній орбіті і її розмір визначає граничний діаметр частинок, які видаляються з потоку.

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 рис. 10 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;

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

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

де ρ_T - щільність механічних домішок, кг/м³; d_c - діаметр частинки, м.

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

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

де ω - кутова швидкість обертання частинки, с⁻¹;

Тоді після нескладних перетворень із урахуванням виразів (2) і (3) 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, кг/м³; ν - коефіцієнт кінематичної в'язкості, м²/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:

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

де C_1 - коефіцієнт, що залежить від форми тіла, для кулі $C_1=0,1-0,4$ S_c ; S_c - площа найбільшого перетину частинки в площині, перпенди-

кулярної напрямку потоку, м^2 ; ρ_0 – щільність середовища, $\text{кг}/\text{м}^3$; v_r – радіальна швидкість руху частинки в, $\text{м}/\text{с}$.

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:

$$S_{\text{ч}} = \frac{\pi d_{\text{ч}}^2}{4}, \quad (9)$$

де $d_{\text{ч}}$ – діаметр частинки, м .

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

$$F_{\text{ГІДР}} = C_1 \pi \frac{\rho_0 d_{\text{ч}}^2}{8} v_r^2. \quad (10)$$

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

$$\bar{F}_{\partial} = \bar{F}_{\text{Ц}} + \bar{F}_{\text{ОП}} + \bar{F}_{\text{ГІДР}}, \quad (11)$$

де \bar{F}_{∂} – 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 апарату до його стінки, тоді з урахуванням напрямків сил рівняння (11) у скалярних величинах прийме вигляд:

$$F_{\partial} = F_{\text{Ц}} - F_{\text{ОП}} - F_{\text{ГІДР}}. \quad (12)$$

Силу руху \bar{F}_{∂} можна представити в наступному вигляді:

$$F_{\partial} = m a_r, \quad (13)$$

де m – маса частинки, кг ; a_r – повне прискорення частинки в радіальному напрямку, $\text{м}/\text{с}^2$.

Повне прискорення частинки в радіальному напрямку a_r визначимо як:

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

З урахуванням формул (12) і (14) силу руху визначимо як:

$$F_{\partial} = \rho_T \frac{\pi d_{\text{ч}}^3}{6} \frac{d^2 r(t)}{dt^2}. \quad (15)$$

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 пиловловлювача й силу опору середовища визначимо:

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

$$F_{\text{СОПР}} = 3\pi\rho_0 v d_c \frac{dr(t)}{dt}. \quad (18)$$

Тоді диференціальне рівняння руху частинки в радіальному напрямку можна записати в наступному вигляді:

$$\rho_T \frac{\pi d_c^3}{6} \frac{d^2 r_1(t)}{dt^2} = \rho_T \frac{\pi d_c^3}{6} \omega^2 r_1(t) - C_1 \pi \frac{\rho_0 d_c^2}{8} \left(\frac{dr_1(t)}{dt} \right)^2 - 3\pi\rho_0 v d_c \frac{dr_1(t)}{dt}. \quad (20)$$

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

Висновки та перспективи подальших досліджень. Таким чином, проведений теоретичний аналіз і запропонована нами модель дозволяє:

1 – розкрити фізичну сутність руху повітря, що очищається, у проєктованому апараті, визначити вплив діючих на частинку сил у радіальному напрямку на характер її руху;

2 – значно знизити кількість експериментальних досліджень по вивченню впливу параметрів апарата на ефективність очищення повітря й провести їх цілеспрямовано;

3 – створити принципово нові конструкції відцентрово-інерційних пиловловлювачів.

Список літератури

1. Ландау Л.Д. Механіка суцільних середовищ / Л.Д.Ландау, Е.М.Ліфшиц. – М.: ГИТТЛ, 1954.
2. Харлоу Ф.Х. Чисельний метод частинок в комірках для задач гідродинаміки. Обчислювальні методи в гідродинаміці / Ф.Х. Харлоу. – М.: Мир, 1967.
3. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй / Г.Н.Абрамович. – Г.:Физматгиз, 1960.
4. Кисіль Ю.Г. Математичне моделювання процесів пиловловлення в процесах виготовлення машин та обладнання / Ю.Г.Кисіль, Р.М.Василів // Тези доповідей УІІ

Міжнародної конференції «Прогресивна техніка і технологія, Київ-Севастополь, 2007. - С.8.

5. Ступницька Н.В. Принципово нові перспективні методи очистки повітря від дрібнодисперсного пилу / Н.В.Ступницька, І.В.Проскуріна, Ю.Г.Кисіль // Наукові вісті, спеціальний випуск матеріалів ІУ міжнародної науково-технічної конференції «Еколого-економічні проблеми карпатського євро регіону» ЕЕП КЄ 2007, Івано-Франківськ. – С.21-25.
6. Батлук В.В. Установа для спалювання відходів / В.В.Батлук, Р.Є.Стець, Р.М.Василів и др. // Матеріали доповідей на VII міжнародній науково-методичній конференції «Безпека життєдіяльності людини – освіта, наука, практика», Миколаїв; НУК, 2008. – С.172 – 174.
7. Пиловловлювач зі змоченими жалюзі : патент на корисну модель / Батлук В.А., Проскуріна І.В. - № 21264; від 21.07. 2006. В01D45/00; опубл. 15.13.2007, Бюл. № 3.
8. Пиловловлювач із попередньою очисткою : патент на корисну модель / Батлук В.А., Параняк Н.М. - № 50126 ; від 7.12.2009. В01D45/00 ; опубл. 25.05.2010, Бюл. № 10.
9. Пиловловлювач із теплообмінником і змійовиком : патент на корисну модель / Батлук В.А., Параняк Н.М. - № 50128 ; від 7.12.2009. В01D45/00 ; опубл. 25.05.2010, Бюл. № 10.

В.А. Батлук, Н.М. Параняк, Е.В. Романцов. Исследование траекторий движения взвешенных частиц в завихренных потоках. В статье проводятся данные, подтверждающие тезис о невозможности сегодня улавливать мелкодисперсную пыль, поэтому предложены принципиально новые методы исследования траекторий движения взвешенных частиц пыли, применение которых в предложенной авторами конструкции центробежно-инерционного пылеуловителя позволяет утверждать о повышении эффективности улавливания такого типа пыли на 4-6% и уменьшении энерго- и металлоемкости.

пылеуловитель, циклон, траектории движения, эффективность, гидравлическое сопротивление

V.A. Batluk, N.M. Paranyak, A.V. Romancov. A Study of Motion Paths of Suspended Particles in Whirling Currents. The paper provides the data which confirm the impossibility of collecting fine-dispersed dust. So we suggest new methods of researching the motion paths of suspended dust particles. The use of these methods in a centrifugal-inertial dust collector shows that the efficiency of dust collection in this case grows by 4-6% and power and metal costs are reduced.

dust collector, cyclone, motion path, efficiency, hydraulic resistance

Стаття надійшла до редколегії 24.10.2010

Рецензент : д-р техн. наук, проф. каф. охорони праці

НУ «Львівська політехніка»

Г.Г. Гогіашвілі

© Батлук В.А., Параняк Н.М., Романцов Е.В., 2010