

**В.А. Батлук, д-р техн. наук,  
І.М. Козира,  
В.В. Клименець**

Державний університет безпеки життедіяльності, м. Львів

## **МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТРАЕКТОРІЇ РУХУ ЧАСТИНКИ ПИЛУ У ПИЛОВЛОВЛЮВАЧІ З ЖАЛЮЗІЙНИМ ВІДОКРЕМЛЮВАЧЕМ**

*Проанализированы силы, которые действуют на частичку пыли в центробежных и инерционных пылеуловителях, и описаны закономерности ее движения. Построены траектории движения частичек пыли разного медианного диаметра в аппаратах данного типа.*

*Forces which operate on the particle of dust in centrifugal and inertia dust collection and conformities to the law of its motion are described are analysed. Built trajectories motion of particles of dust of different median diameter in the vehicles of this type.*

### **Постановка проблеми**

Питанню моделювання процесу уловлення пилу в циклонах присвячено велику кількість вітчизняних та зарубіжних публікацій. Проте повної і точкої теорії пиловловлення у відцентрових апаратах досі не створено. Це пов'язано з цілою низкою факторів. Так, наприклад, існуючі теорії не враховують форму частинки пилу, не розглядають взаємодію між частинками, не враховується турбулентність повітряного потоку всередині апарату та форма останнього. Тому при розробці конструкцій циклонів доводиться враховувати експериментальні дані і досвід експлуатації їх у виробничих умовах.

### **Аналіз останніх досліджень**

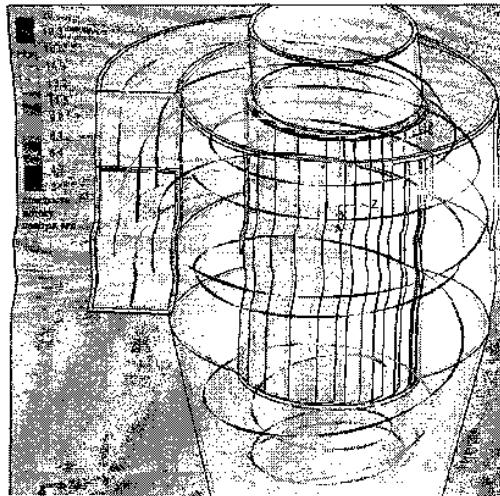
Підхід, який застосовується у більшій частині математичних моделей, зводиться до визначення мінімального розміру частинок, що вловлюється даним циклоном.

Результати, отримані за формулами, зазвичай відрізняються від даних експериментальних досліджень, які показують, що частинки з медіанним діаметром, більшим від  $d_{mm}$ , вловлюються в циклоні не повністю через вплив турбулентності та прийняті припущення. Одночасно частково вловлюються частинки пилу з діаметром, меншим  $d_{min}$ . Наприклад, при випробуваннях циклона на деревному пилу, що утворюється після шліфування з медіанним діаметром частинок менше  $12 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ , ефективність виявилась вище розрахункової у декілька разів [5]. Цей ефект спостерігається також при уловленні сажі, в цьому випадку не враховано коагуляцію частинок усередині циклона.

Отже, на сьогодні не створено повну і точну математичну модель руху частинки пилу в циклоні через складні аеродинамічні процеси у сепараторі. Тому отримані математичні формулі можна застосовувати лише для попередніх укрупнених розрахунків уже відомих та дослідженіх конструкцій у процесі обирання для конкретних виробництв.

Завдання дослідження — проаналізувати сили, які діють на частинку пилу у відцентрових та інерційних пиловловлювачах та на їх основі описати закономірності її руху в пиловловлювачі з жалюзійним відокремлювачем.

У запропонованому пиловловлювачі (рисунок 1) пилоповітряна суміш надходить тангенційно через вхідний патрубок у корпус апарату. Під дією відцентрових сил частинки пилу більшої маси відкидаються до циліндричної частини корпусу апарату і під дією сил тяжіння сповзають вниз — спочатку вздовж циліндричної, а потім конічної частини до патрубка виходу пилу і через нього у бункер. Частинки пилу меншої маси, що захоплюються потоком вже очищеного від великих фракцій повітря, рухаються у напрямку жалюзійного відокремлювача і після удару об жалюзі не відбиваються на значну відстань від них, а, продовжуючи рух вздовж жалюзі, досягають кінця відокремлювача і вловлюються, захоплюючись потоком масивніших частинок пилу.



**Рис. 1. Траекторії руху частинок пилу у пиловловлювачі з жалюзійним відокремлювачем.**

Очищене таким чином повітря обминає жалюзі з мінімальним кутом атаки і потрапляє в середину жалюзі.

зійного відокремлювача. Отже, в апараті відбувається двоступеневе очищення повітря від пилу – під дією відцентрових сил на рівні верхньої суцільної частини жалюзійного відокремлювача і під дією сил інерції при проходженні через жалюзі відокремлювача [6]. Рух частинки пилу в криволінійному потоці описується векторним диференціальним рівнянням, на основі якого, передшовши до полярної системи координат  $r, \theta$ , було описано рух частинки пилу системою двох диференціальних рівнянь:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{1}{\tau} \vec{v}_c + \frac{\vec{F}}{m}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{d^2r}{dt^2} + \frac{1}{\tau} \frac{dr}{dt} - \left[ k + (V_0 \cdot R_0 - k) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \right] + \frac{k_2}{r} = 0; \\ \frac{d\theta}{dt} = \left[ k + (V_0 \cdot R_0 - k) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \right] \end{cases} \quad (2)$$

Із рівняння (1) наведеної системи визначали радіальну координату частинки пилу в довільний момент часу  $r=r(t)$ , а тоді, підставивши отримане значення в друге рівняння системи, визначимо дугову координату частинки пилу в цей момент часу. За відомими значеннями координат побудували траєкторію руху частинки в просторі між зовнішньою стінкою апарату і жалюзійним відокремлювачем. Для єдиності розв'язку системи рівнянь (1), (2) було задано три додаткові умови. Вважали, що частинка пилу влітає в апарат і починає рухатися в напрямку до відокремлювача (початковий етап), потім вдаряється в жалюзі і відбивається від них з деякою швидкістю, або проникає в цілину між жалюзі (рисунок 2). У першому випадку рух частинки продовжується далі (наступний етап) до стінки корпуса апарату, а в другому випадку частинка виводиться із чистим повітрям, що є небажаним явищем.

Відбившись від жалюзі, частинка пилу повинна рухатися деякий час у напрямку до зовнішньої стінки апарату, але під дією аеродинамічної сили стоку вона знову повертається до жалюзійного відокремлювача. При цьому вона може досягти зовнішньої стінки і відбитись від неї, а може і не досягти. Не виключено, що частинка пилу вже після першого контакту із жалюзі буде вловленою, тобто потрапить у бункер. Час перебування частинки пилу в активній

зоні апарату  $t \leq t_*$ , де  $t_* = \sqrt{\frac{2H}{g}}$ ,

де  $H$  – висота жалюзійного відокремлювача, м.

На основі наведеного вище було побудовано найпростішу математичну модель пиловловлювача із жалюзійним відокремлювачем (рисунок 2) і знайдено розв'язок системи диференціальних рівнянь (2), який задовільняє наступні початкові чи граничні умови (3). У формулах (3) положення 1 (рисунок 1) характеризує момент введення частинки пилу разом із пилоповітряним потоком в пиловловлювач; положення 2 фіксує момент удару частинки пилу в жалюзі пиловловлювача. При цьому припускається, що радіальні складові швидкості частинки пилу до і після удару є рівними.

Положення 1 фіксує момент введення частинки пилу в жалюзі пиловловлювача. При цьому припускається, що радіальні складові швидкості частинки пилу до і після удару є рівними.

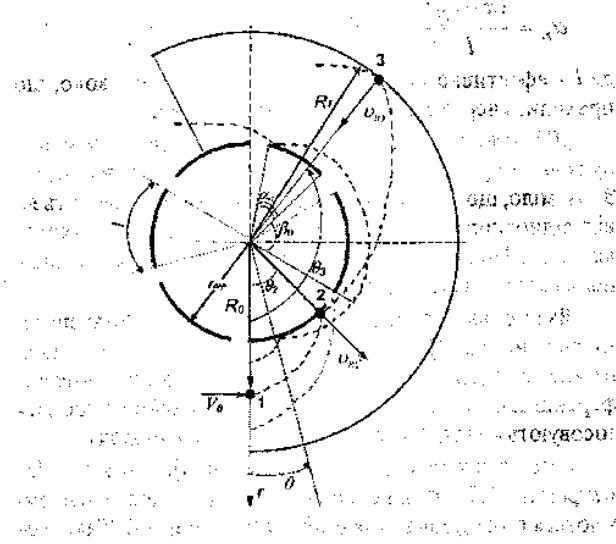


Рисунок 2. Розрахункова схема до математичної моделі руху частинок пилу в пиловловлювачі з жалюзійним відокремлювачем.

На основі наведеного вище було побудовано найпростішу математичну модель пиловловлювача із жалюзійним відокремлювачем (рисунок 2) і знайдено розв'язок системи диференціальних рівнянь (2), який задовільняє наступні початкові чи граничні умови (3). В формулах (3) положення 1 (рисунок 1) характеризує момент введення частинки пилу разом із пилоповітряним потоком в пиловловлювач; положення 2 фіксує момент удару частинки пилу в жалюзі пиловловлювача. При цьому припускається, що радіальні складові швидкості частинки пилу до і після удару є рівними.

$$t = 0; r = R_0; u = 0; \frac{dr}{dt} = 0 \text{ (положення 1);}$$

$$t = t_p; r = r_{sep}; u = \theta_1; \frac{dr}{dt} = |v_{R2}|;$$

$$\beta_n \cdot i < \theta < \beta_n \cdot i + \alpha_n, i=0, \dots, n-1 \text{ (положення 2);}$$

$$t = t_p; r = R_p; u = \theta_2; \frac{dr}{dt} = -|v_{R3}| \text{ (положення 3).}$$

Час  $t_p$  (а відповідно і  $v_{R2}$ ) знаходиться в результаті розв'язування першого рівняння системи рівнянь (1), (2) з початковими умовами для положення 1; положення 3 характеризує момент відбивання частинки пилу від зовнішньої стінки. Зазначимо, що частинка пилу не завжди досягає зовнішньої стінки. Час  $t_p$  (а, відповідно, і швидкість  $v_{R3}$ ) знаходимо у результаті розв'язування першого рівняння (1) з початковими умовами для положення 2

$\beta_n = \frac{2\pi}{z_p}$ ,  
де  $z_p$  – кількість жалюзі у відокремлювачі;

$$\alpha_n = \frac{2\pi \cdot r_{cep}}{l},$$

де  $l$  – ефективна довжина жалюзі;  $r_{cep}$  – уявне коло, що проходить через середину довжини жалюзі.

„Ефективною” довжиною  $l$  жалюзі назовемо ту частину кола радіуса  $r_{cep}$  від якої відбиваються частинки пилу. Зрозуміло, що „ефективна” довжина жалюзі залежить як від відносного розташування жалюзі, так і від їхньої кількості. При розрахунках  $l$  вважається відомою величиною, яка визначається конструктивно.

Як вже зазначалося, характерною особливістю системи рівнянь (1), (2) є те, що перше рівняння розв’язується незалежно від другого. Для розв’язування нелінійних диференціальних рівнянь другого порядку найчастіше застосовують метод Рунге–Кутта четвертого порядку.

Було одержано наступні результати [3]. Частинки діаметром  $d \approx 6,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ , потрапляючи у пиловловлювач, рухаються по стаціонарних орбітах (рисунок 3а). Такі частинки також будуть вловлені у запропонованій конструкції пиловловлювача завдяки тому, що нижня частина жалюзіального відокремлювача має глухе дно. Частинка досягає конічної частини апарату, після чого, внаслідок тертя об стінку, втратить швидкість і випадає в бункер. Частинки пилу, діаметр яких є більшим за  $6,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ , під дією відцентрової сили відкидаються до зовнішньої стінки пиловловлювача і сповзають по ній у бункер. Траекторію руху такої частинки показано на рисунку 3б.

Метою зміни конструкції циклона було підвищення його ефективності за рахунок встановлення жалюзіального відокремлювача всередині циклона, що мало на меті знизити діаметр частинок пилу, які потрапляють в атмосферу після очищення потоку в циклоні. Тому більш детально розглядали траекторію руху частинок пилу з медіанним діаметром меншим за  $6,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ .

У результаті проведення числового аналізу математичної моделі зробили висновок, що дрібні частинки пилу, які рухаються у напрямку до жалюзіального відокремлювача, після удару об жалюзі, не відбиваються на значну відстань від них, а продовжують свій рух поблизу відокремлювача. Такі частинки можуть, рухаючись вздовж жалюзі, досягти кінця відокремлювача, після чого бути вловленими, або змінити напрямок свого руху, пройти крізь жалюзі та через вихлопну трубу і потрапити в атмосферу.

Траекторії руху таких частинок, які представлено на рисунках 5 а–г, дають змогу описати рух частинки пилу, починаючи з моменту контакту частинки з жалюзійним відокремлювачем, наступним чином. Протягом певного періоду часу траекторія руху частинки пилу залишається незмінною у порівнянні з траекторіями руху в сепараційній зоні, що пояснюється інерцією частинки. Ділянка такого руху зростає зі збільшенням діаметра частинки пилу. Далі частинка під дією потоку повітря у просторі між жалюзі починає більш стрімко рухатися до осі циклона.

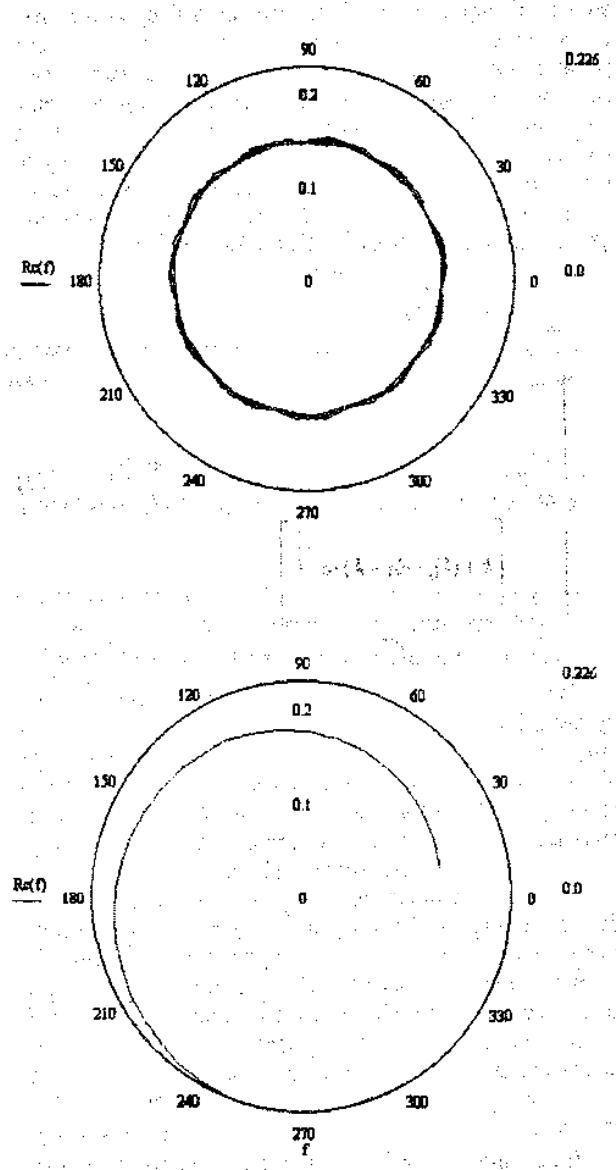


Рисунок 4. Траекторія руху частинки  $8 \cdot 10^{-6} \text{ м}$  у пиловловлювачі.

Частинка пилу діаметром  $1 \cdot 10^{-6} \text{ м}$  практично відразу змінює напрямок свого руху і, будучи захоплена потоком повітря, потрапляє у середину жалюзіального відокремлювача. Частинки такого діаметру не можуть бути вловлені в апараті. Зі збільшенням діаметра частинки пилу на неї зменшується захоплювальна дія потоку. Частинки пилу розміром  $2,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$  вже здатні подолати половину міжжжалюзійного простору. Частинки пилу, діаметр яких складає  $3,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ , долають простір між жалюзі. Такі частинки відбиваються від наступної жалюзі і, таким чином, продовжують свій рух «скакучи» поблизу жалюзіального відокремлювача. Частинки такого діаметру вже будуть вловлені жалюзійним відокремлювачем. На частинки пилу, діаметр

яких складає  $3,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ , потік повітря між жалюзі відокремлювача практично не має впливу і траекторія їхнього руху збігається з траекторією, зображену на рисунку 5г. При зменшенні середнього кроку  $t_{op}$  – діаметр частинок, які будуть проходити крізь жалюзійний відокремлювач, зменшується. Проте надмірне зменшення параметра  $t_{op}$  є не доцільним, оскільки при цьому значно зростає гідравлічний опір розробленої конструкції циклона та ймовірність забивання простору між жалюзі деревним пилом.

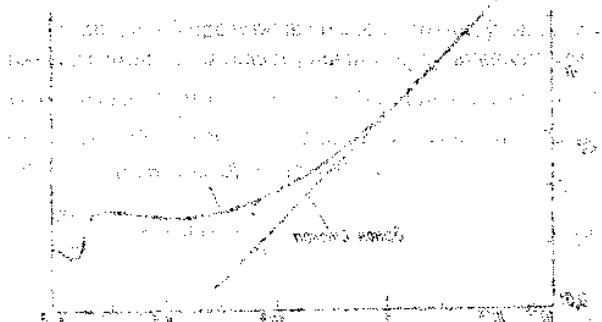
### Висновки

Побудована математична модель є основою для розрахунків при створенні пиловловлювачів з жалюзійним відокремлювачем та підтверджує доцільність встановлення жалюзійного відокремлювача. Отримана математична модель дозволяє побудувати траекторію руху частинки пилу будь-якого медіанного діаметру у пиловловлювачі з жалюзійним відокремлювачем. Теоретично доведено, що застосування жалюзійного відокремлювача дає змогу вловлювати дрібнодисперсний пил з медіанним діаметром не меншим за  $3,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ . Виходячи з того, що внаслідок встановлення жалюзійного відокремлювача зменшується критичний діаметр частинки пилу, яка буде вловлена в циклоні, з  $6,5$  до  $3,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ , вважаємо теоретично обґрунтованим факт доцільності встановлення жалюзійного відокремлювача на осі корпуса пиловловлювача.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Пирумов, А.Н. Обеспыливание воздуха. — М.: Стройиздат, 1981. — 296 с.
2. Козориз, Г.Ф. Пневматический транспорт деревообрабатывающих предприятий. — М.: Машиностроение, 1968. — 122 с.
3. Страус, В. Промышленная очистка газов. — М.: Мир, 1981. — 616 с.
- 4 Горбис, З.Р., Спокойный, Ф.Е. Физическая модель и математическое описание процесса движения мелких частиц в турбулентном потоке газов // ТВТ. — 1977. — №2. — С. 399—408.

Надійшла 04.03.2011 р.



Для отримання цієї публікації виконавець здійснив оплату

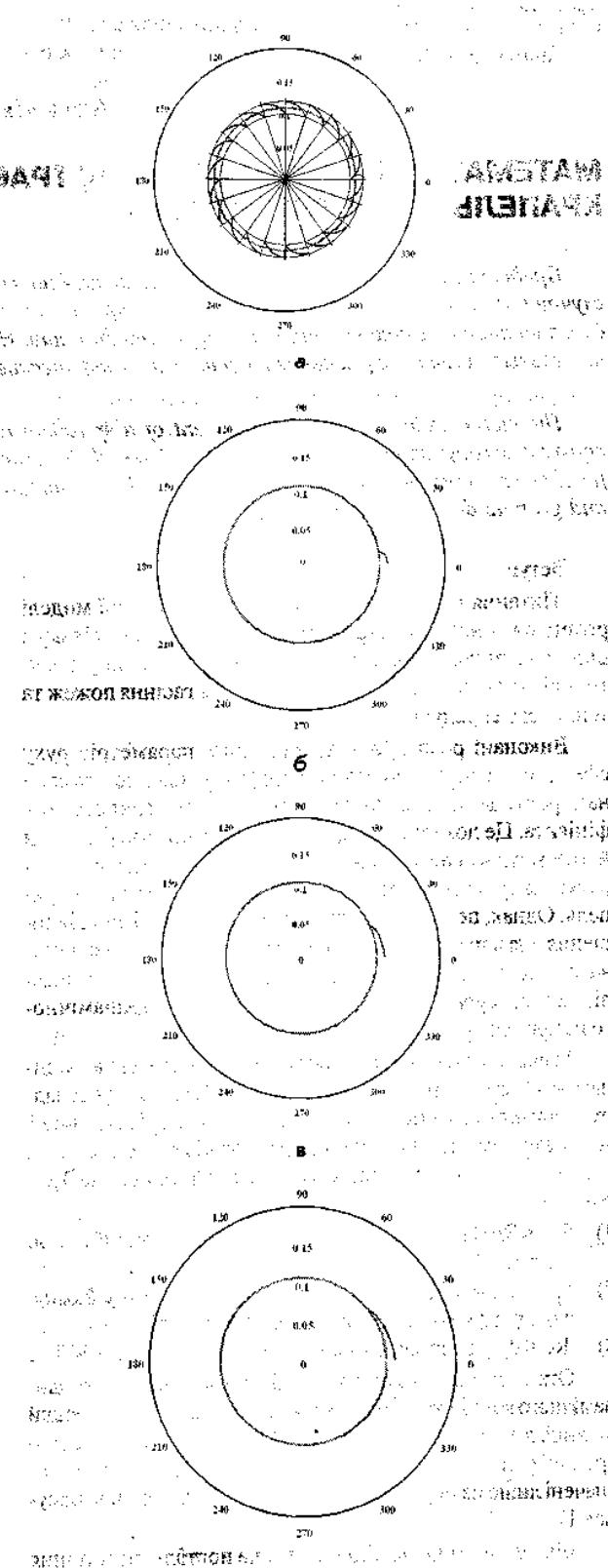


Рисунок 5. Траекторії руху частинок пилу діаметром  $1 \cdot 10^{-6} \text{ м}$  (а),  $2,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$  (б),  $3,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}$  (в),  $5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$  (г) у жалюзійному пиловловлювачі.