

Таким чином, із врахуванням формул (10) і (11) отримаємо рівність вигляду:

$$\frac{h_{cm}}{d} = \left(Ar^{\frac{1}{6}} Pr^{\frac{2}{3}} \right). \quad (22)$$

Аналіз впливу критеріїв Ar і Pr є неоднорідним (ступінь впливу критерію Ar невеликий, а критерій Pr для газів практично постійний). Це значить, що в шарі великих частинок ($Ar = 10^6 \dots 10^8$) можна записати:

$$\frac{C_c \rho_c \omega_{kp}}{\alpha_o} = \frac{h_{cm}}{d}.$$

Таким чином, величина середнього коефіцієнта тепловіддачі $\bar{\alpha}$ від поверхні на висоті H буде визначатися за формулою:

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{H} \int_0^H \alpha dh = \alpha_{cm} + (\alpha_0 - \alpha_{cm}) \frac{4d}{H} \left[1 - \exp\left(-\frac{H}{4d}\right) \right]. \quad (23)$$

Це значить, що наведені вище формули дозволяють визначити інтенсивність теплообміну у киплячому шарі при різних еквівалентних діаметрах частинок подрібненої деревини.

Література

1. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория тепло- и массопереноса. – М.: Энергия, 1963. – 536 с.
2. Тодес О.М., Себалло В.А., Гольцикер А.Д. Массовая кристаллизация из растворов. – Л.: Химия, 1984. – 232 с.
3. Забродский С.С. Гидродинамика и теплообмен в псевдооживленном слое. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 488 с.
4. Тодес О.М., Цитович О.Б. Аппараты с кипящим зернистым слоем. – Л.: Химия, 1981. – 296 с.
5. Аэров М.Э., Тодес О.М. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем. – Л.: Химия, 1968. – 512 с.
6. Романков П.Г., Ратковская Н.Б. Сушка в кипящем слое. – М.: Химия, 1976. – 288 с.
7. Озарків І.М., Сорока Л.Я., Грицюк Ю.І. Основи аеродинаміки і тепломасообміну: Навч. посібник. – К.: ІЗМН, 1997. – 280 с.
8. Куніч Д., Левеншпіль О. Промышленное псевдооживление. – М.: Химия, 1976. – 447 с.
9. Боттерилл Дж. Теплообмен в псевдооживленном слое. – М.: Энергия, 1980. – 344 с.
10. Гельперин Н.И., Айнштейн В.Г., Кваша В.Б. Основы техники псевдооживления. – М.: Химия, 1967. – 664 с.
11. Сыромятников Н.И., Королев В.Н., Блинов А.В. Внешний теплообмен в неподвижном продуваемом и виброкипящем слоях с учетом скоростных характеристик газовых потоков// Теплообмен - VII. – Минск: ИТМО АН Белоруссии им. А.В. Лыкова, т.5-ч.І, 1984. – С. 48-54.

УДК 674: 621.928.93

Є.М. Лютий¹, Л.О. Тисовський², П.П. Нахасєв³,
А.В. Ляшеник – Коломийський політехнічний коледж

МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ ЧАСТИНКИ В ФІЛЬТРУВАЛЬНОМУ ЦИКЛОНІ

Описано диференціальне рівняння руху частинки пилу в фільтрувальному циклоні. Теоретично описано вплив параметрів циклона на його ефективність.

Ye.M. Liutyj, L.O. Tysovski, P.P. Nahajev, A.V. Liashenyk

Modeling of particle movement in filter cyclone

This article describes the differential equation of movement of a particle in a cyclone. The influence of parameters of a cyclone on its efficiency is theoretically described.

Моделювання руху частинки пилу в циклоні призначене для проведення теоретичних розрахунків ефективності сепаратора залежно від його геометричних розмірів і параметрів пилу. Існуючі математичні моделі руху відрізняються різноманітними підходами та одержаними результатами [1], але всі вони дають тільки наближену, укрупнену, картину руху частинки пилу, що пов'язано зі складними аеродинамічними процесами, які проходять в циклоні. При моделюванні нехтують такими явищами, як радіальний сток, вихрові потоки та завихрення, взаємодією частинок між собою і зі стінкою циклона.

В даній роботі зроблена спроба описати рух частинки пилу в фільтрувальному циклоні [2, 3, 4] зі врахуванням радіального стоку та потоку фільтрації.

На сьогодні процес сепарації частинок пилу в фільтрувальному циклоні можна описати наступним чином. Пилогазовий потік поступає в циклон через вхідний патрубок і починає обертатися навколо осі циклона, одночасно здійснюючи рух донизу (рис. 1). Під дією відцентрової сили частинки пилу починають рухатися до зовнішньої стінки. По мірі опускання вниз кількість повітря в потоці зменшується за рахунок відтоку частини очищеного повітря через фільтрувальну стінку. У циліндричній частині циклона процеси циклонування і фільтрації відбуваються одночасно, взаємокаталізуючи один одного [3,4]. Виток частини повітря через фільтрувальну стінку в атмосферу створює радіальний потік, який сприяє рухові частинки пилу до периферії циклона. Завдяки такому потоку в циклоні створюється ефект відсмоктування пограничного шару, що сприяє зменшенню гідравлічного опору циклона та підвищенню його ефективності [3,4].

Для опису рівняння руху частинки пилу в фільтрувальному циклоні введемо такі припущення:

- вважаємо швидкість радіального стоку і потоку фільтрації постійними по всій висоті циклона [1, 2];
- нехтуємо глибиною занурення вихлопної труби [1];
- тангенціальну складову швидкості потоку вважаємо постійною величиною [3].

¹ д-р техн. наук завідувач кафедри прикладної механіки УкрДЛТУ

² канд. фіз.-мат. наук, доц. кафедри прикладної механіки УкрДЛТУ

³ канд. техн. наук, доц. кафедри прикладної механіки УкрДЛТУ

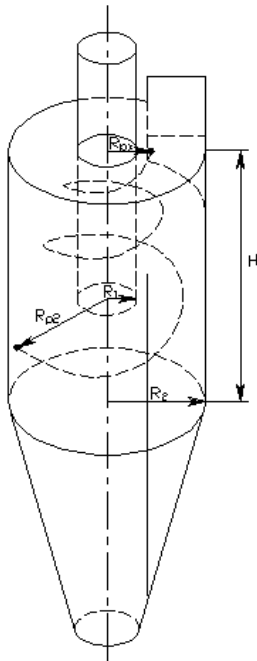


Рис. 1. Схема руху частинки пилу у фільтрувальному циклоні

Крім того, у фільтрувальному циклоні внаслідок накладання радіального стоку і потоку фільтрації виникає аеродинамічна сила, яка прикладена до частинки, що знаходиться на відстані R від осі циклона, яка може бути описана, як

$$F = 3\pi d\mu G / R, \quad (1)$$

де G – сток на одиниці висоти описується, як різниця радіального стоку і потоку фільтрації, тобто:

$$G = \frac{Q(1-q)}{2\pi H}, \quad (2)$$

де: $q = Q_\phi / Q$ – відношення кількості повітря Q_ϕ , що відходить в атмосферу через фільтрувальну стінку до загальної продуктивності циклона Q ; d – діаметр частинки пилу; μ – коефіцієнт в'язкості газу; H – висота циліндричної частини циклона.

Використавши результати роботи [1], диференціальне рівняння руху частинки пилу у фільтрувальному циклоні можна представити у вигляді:

$$\frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{1}{\theta} \frac{dR}{dt} - \frac{V_\tau^2}{R} + \frac{G}{\theta R} = 0, \quad (3)$$

де θ – час релаксації частинки;

$$\theta = \frac{2d^2 \rho}{9\mu} \quad (4)$$

де ρ – густина частинки пилу.

Відкинемо в якості першого наближення $\frac{d^2 R}{dt^2}$ прискорення сепарційного руху частинки. Таке наближення має зміст ще й з таких міркувань, що для кожної частинки існує радіус стаціонарної орбіти, де прискорення сепарації дорівнює нулю, тобто $\frac{d^2 R}{dt^2} = 0$. Тоді з рівняння (3) отримаємо:

$$\frac{dR}{dt} = \frac{1}{R} (\theta V_\tau^2 - G),$$

$$i \quad R dR = (\theta V_\tau^2 - G) dt \quad (5)$$

Проінтегрувавши ліву і праву частини рівняння отримаємо:

$$R^2 = 2(\theta V_\tau^2 - G)t + 2C \quad (6)$$

Постійну інтегрування C можна визначити з міркувань, що при вході частинки в циклон в момент часу $t=0$ її радіальне положення дорівнює R_{bx} (рис. 1). Тому

$$C = \frac{1}{2} R_{bx}^2 \quad (7)$$

В такому випадку можна визначити, яке положення R_{p2} набуде частинка за час t перебування в циклоні.

$$R_{p2} = \sqrt{2(\theta V_\tau^2 - G)t + R_{bx}^2} \quad (8)$$

Якість очистки пилогазової суміші в циклоні збільшується з наближенням R_{p2} до радіусу зовнішньої стінки циклона R_2 . Вводимо припущення, що всі частинки, які за час t перебування в циклоні, досягнуть зовнішньої стінки циклона будуть видалені з потоку повітря, нехтуючи при цьому явищем пружного удару частинки до стінки циклона. Таке припущення допустиме, оскільки стінка виконується з фільтрувальної тканини. З рівняння (8) визначимо:

$$R_2^2 - R_{bx}^2 = 2(\theta V_\tau^2 - G)t \quad (9)$$

З іншого боку ефективність вловлювання частинок певного розміру η_d може бути представлена, як відсоток матеріальних точок даного діаметра, виділених з повітряного потоку [5]. Якщо прийняти, що частинки пилу діаметром d на вході в циклон повністю розподілені по всьому потоку, ефективність вловлювання частинок буде дорівнювати відношенню двох площ S_1 і S_2 , де $S_1 = \pi \cdot (R_2^2 - R_{bx}^2)$, $S_2 = \pi \cdot (R_2^2 - R_1^2)$.

$$\eta_d = \frac{(R_2^2 - R_{bx}^2)}{(R_2^2 - R_1^2)} \cdot 100\%, \quad R_1 \leq R_{bx} \leq R_2 \quad (10)$$

де R_1 – радіус вихлопної труби циклона;

З рівнянь (9, 10) отримаємо:

$$\eta_d = \frac{2(\theta V_{\tau}^2 - G)t}{(R_2^2 - R_1^2)} 100\% \quad (11)$$

Ефективність циклона буде становити 100 % для частинок, час релаксації яких:

$$\theta = \frac{R_2^2 - R_1^2}{2tV_{\tau}^2} + \frac{G}{V_{\tau}^2} \quad (12)$$

Враховуючи припущення 3 запишемо:

$$V_{\tau} = k_{V\tau} Q(1-q), \quad (13)$$

де $k_{V\tau}$ – коефіцієнт тангенціальної складової швидкості потоку повітря;

Для визначення часу перебування частинки в циклоні скористаємось рівнянням [7]:

$$t = \frac{\pi D n}{V_{\tau}}, \quad (14)$$

де: D – середній діаметр траєкторії руху частинки, $D = R_1 + R_2$; n – кількість обертів, що здійснює частинка в циклоні (приймається $n = 2-3$)

На основі рівнянь (4) (12)-(14) запишемо

$$d = \frac{3}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\pi \rho k_{V\tau} Q(1-q)} \left(\frac{R_2 - R_1}{n} + \frac{1}{H k_{V\tau}} \right)} \quad (15)$$

Отримана формула дозволяє визначити діаметр найменших частинок пилу, ефективність вловлення яких становити 100 %.

Одержану формулу можна вважати справедливою для фільтрувальних циклонів при $q=0,04 \div 0,2$, а також для циклонів з рівномірним розподілом тангенціальної складової швидкості потоку повітря. Як засвідчують проведені дослідження, в фільтрувальних циклонах q доцільно використовувати з проміжку $0,08 \div 0,13$.

Дана залежність показує вплив окремих параметрів фільтруючого циклона на його ефективність. Так, зменшення радіального зазору R_2 / R_1 підвищує ефективність циклона. Збільшення висоти циліндричної частини також позитивно впливає на якість очистки, що пояснюється зменшенням дії радіального стоку. З підвищенням продуктивності якість очистки збільшується. Описане в різноманітних джерелах [1, 3, 6] явище незначного підвищення ефективності при перевищенні певної, оптимальної продуктивності можна пояснити не тільки радіальним стоком, а й значною турбулізацією по-

току, збільшенням кількості вихрових потоків. На відміну від циклонів з металічною стінкою в фільтруючих циклонах, завдяки наявності радіального потоку в області між вихлопною трубою і зовнішньою стінкою, кількість вихрових потоків зменшена, що сприяє покращенню ефективності та зменшенню гідравлічного опору фільтруючих циклонів.

Рівняння (15) дає змогу проаналізувати чутливість критичного діаметра [5] до зміни різноманітних параметрів. Для того, щоб визначити чутливість зміни діаметра частинки, яка буде вловлена, до конкретного параметра знайдемо похідну по відповідному параметру. Інші параметри при цьому вважаємо постійними.

$$\frac{\partial d}{\partial Q} = -\frac{3}{4} \sqrt{\frac{\mu}{\pi \rho k_{V\tau} Q^3 (1-q)}} \left(\frac{R_2 - R_1}{n} + \frac{1}{H k_{V\tau}} \right) \quad (16)$$

$$\frac{\partial d}{\partial q} = \frac{3}{4} \cdot \frac{1}{1-q} \sqrt{\frac{\mu}{\pi \rho k_{V\tau} Q (1-q)}} \left(\frac{R_2 - R_1}{n} + \frac{1}{H k_{V\tau}} \right) \quad (17)$$

$$\frac{\partial d}{\partial H} = -\frac{3}{4} \cdot \frac{1}{H^2 k_{V\tau}} \cdot \sqrt{\frac{\mu}{\pi \rho k_{V\tau} Q (1-q)}} \cdot \sqrt{\frac{\mu}{\pi \rho k_{V\tau} Q (1-q)}} \quad (18)$$

$$\frac{\partial d}{\partial \rho} = -\frac{3}{4} \sqrt{\frac{\mu}{\pi \rho^3 k_{V\tau} Q (1-q)}} \left(\frac{R_2 - R_1}{n} + \frac{1}{H k_{V\tau}} \right) \quad (19)$$

Якщо радіальний зазор: $R_2 - R_1 = R_a$, то

$$\frac{\partial d}{\partial R_a} = \frac{3}{4n} \sqrt{\frac{\mu}{\pi \rho k_{V\tau} Q (1-q)}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{R_a}{n} + \frac{1}{H k_{V\tau}}}} \quad (20)$$

Знак мінус в рівняннях (16) (18) і (19) означає, що діаметр частинки обернено пропорційний до відповідного параметра, тобто d зменшується при зростанні Q, ρ .

Застосовуючи рівняння (15-20) визначимо ефективність циклона з $R_1=0,118$ м, $R_2=0,2$ м, $H=0,6$ м для очистки потоку від деревного пилу ($\rho \approx 700$ кг/м³).

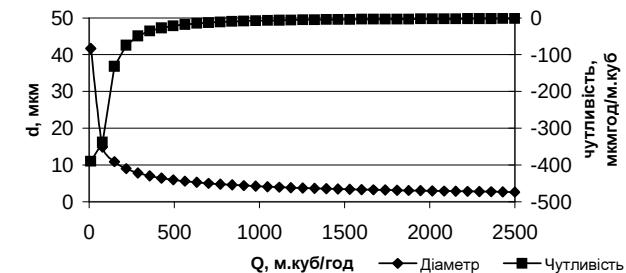


Рис. 2. Графік залежності діаметра частинки від продуктивності і чутливості критичного діаметра до продуктивності

Діаметр частинки, що вловлюється в циклоні, зі збільшенням продуктивності різко зменшується до певної продуктивності $\approx 1000 \text{ м}^3/\text{год}$. Після досягнення продуктивності більше $1500 \text{ м}^3/\text{год}$ діаметр частинки практично не чутливий до збільшення продуктивності.

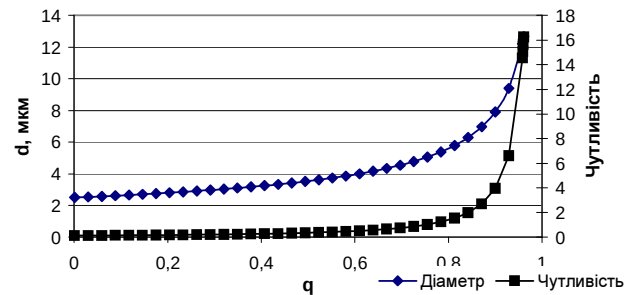


Рис. 3. Графік залежності діаметра частинки від q і чутливості критичного діаметра до q

Рівняння (15-20) через прийняті при створенні математичної моделі припущення не відображають реального впливу величини q . При проведенні практичних досліджень було встановлено, що оптимальне значення $q=0,08 \div 0,11$ і основний вплив продуктивності фільтрації полягає не тільки в зменшенні явища радіального стоку, а в створенні радіального потоку, який протидіє виникненню вихрових потоків в області між вихлопною трубою і зовнішньою стінкою циклона [3, 4].

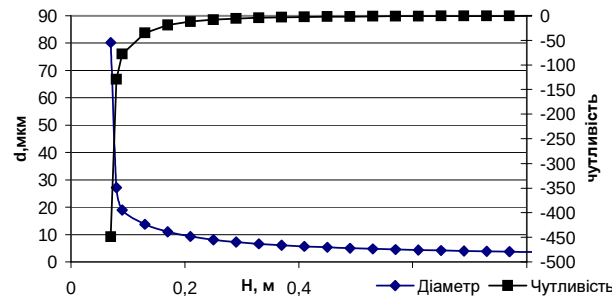


Рис. 4. Графік залежності діаметра частинки від висоти циліндричної частини циклона і чутливості критичного діаметра до висоти циліндричної частини циклона

Діаметр частинки, що вловлюється в циклоні, різко зменшується при збільшенні висоти циліндричної частини циклона до $0,4 \text{ м}$. Після збільшення висоти більше $0,6 \text{ м}$ діаметр частинки практично не зменшується, проте значно ростуть енерговитрати на очистку. Тому висоту циклона не необхідно завищувати.

Зі збільшенням радіального зазору діаметр частинки, що вловлюється в циклоні, збільшується. Проте занадто малі зазори можуть ставати причиною забивання циклонних апаратів. Тому значення R_a необхідно вибирати з практичних міркувань.

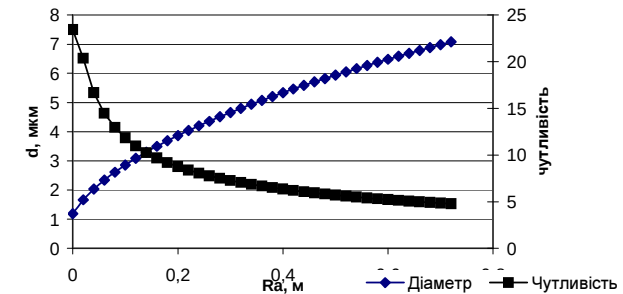


Рис. 5. Графік залежності діаметра частинки від висоти циліндричної частини циклона і чутливості критичного діаметра до висоти циліндричної частини циклона

Створення математичної моделі процесу сепарації частинки в фільтрувальному циклоні дозволило теоретично оцінити вплив різноманітних параметрів циклона на його ефективність.

Література

1. Пирумов А.И. Аэродинамические основы инерционной сепарации/ Под ред. Н.Я. Фабриканта. – М.: Госстройиздат, 1961. 120 с.
2. Ляшеник А.В. "Високоєфективна повітроочисна установка з фільтрувальними циклонами". "Світ меблів і деревини" 2/99 – ст28-29.
3. До розподілу тангенціальної складової швидкості потоку в циклоні ЦН-15 і фільтруючому циклоні. Лютий С.М., Нахаєв П.П., Ляшеник А.В// Науковий вісник: Зб. Наук-техн.пр. – Львів: УкрДЛТУ. – 2001, вип.11.4. – С. 190-195.
4. Ефективність застосування циклонів із фільтруючими зовнішніми стінками. Лютий С.М., Нахаєв П.П., Ляшеник А.В// Науковий вісник: Зб. Наук-техн.пр. – Львів: УкрДЛТУ. – 2001, вип.12.2. – С. 121-125.
5. Yuanhui Zhang. Modeling and Sensitivity Analysis of Dust Particle Separation for Uniflow Dedusters. University of Illinois Urbana-Champaign, 2000.
6. Майструк В.В. Розділення запиленних газів у циклонах з проміжним відведенням твердої фази: Дис...канд. тех. наук. 05.17.08. – Львів, 2000. – 142с
7. Кузнецов И.Е., Шмат К.И., Кузнецов С.И. Оборудование санитарной очистки газов. – К.: Техніка, 1989. – 304 с.

УДК 674. 047

Проф. П.В. Білей, д-р техн. наук;
аспір. А.В. Полоз – УкрДЛТУ

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ АТМОСФЕРНОГО СУШІННЯ ПИЛОМАТЕРІАЛІВ

Наведено дані експериментальних досліджень процесу атмосферного сушіння умовного матеріалу та зміни його вологості і густини.

Prof. P.V. Biley, A.V. Poloz – USUFWT

Methods of carrying and results of the research of the atmosphere drying of lumber

The data of experimental researches of the process of atmosphere drying of the relative material and changing of its humidity and density are given.