

РОЗРАХУНОК ЕФЕКТИВНОСТІ ПИЛОВЛОВЛЮВАННЯ БАТАРЕЙНОГО ЦИКЛОНА З ЖАЛЮЗІЙНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ

Розкрито суть методу теоретичного визначення ефективності пиловловлювання в створеному за задумом автора відцентрово-інерційному пиловловлювачі з жалюзійним відводом повітря.

V. Kuts

CALCULATION OF EFFICIENCY OF BATTERY CYCLONE WITH JALOUSIES ELEMENTS

Essential of method of the theoretical determination of efficiency of deduster is exposed in centrifugal-inertia deduster created by plan of author with the jalousies taking of air.

При створенні нового обладнання важливо не лише шляхом проведення експериментальних досліджень визначити основні показники його роботи і дослідити вплив на них конструктивних і режимних параметрів, але також розробити на основі отриманих даних методику теоретичного розрахунку цих показників. Наявність такої методики дозволяє оцінити доцільність застосування цього обладнання в різних умовах виробництв, використовуючи необхідні параметри цих виробництв.

Основними технічними показниками пилоочисного обладнання є їх продуктивність, гідравлічний опір і ефективність пиловловлювання.

Найбільші труднощі виникають при розрахунку саме ефективності пиловловлювання, адже її величина в найбільшій мірі залежить як від конструктивних і режимних параметрів пиловловлювача, так і характеристик пилу, що вловлюється, в першу чергу, його дисперсного складу. Загальний ступінь очистки може бути розрахований лише за значенням парціальних (фракційних) коефіцієнтів.

Основою методик розрахунку ефективності пиловловлювачів є результати розв'язків математичних моделей процесів сепарації пилогазових потоків в них. В цих моделях відображено взаємозв'язок руху частинок пилу в пиловловлювачі з його ефективністю.

Створення математичної моделі процесу сепарації в батарейному циклоні з жалюзійними елементами [1] ускладнювалось не лише поєднанням в цьому пиловловлювачі принципів дії двох апаратів – циклонного і жалюзійного, - але і конструктивними відмінностями його елементів у порівнянні з класичними циклонами.

Логічне, на перший погляд, рішення умовно привести елементи батарейного циклона до вигляду циклонів з тангенціальним вводом запиленого потоку однакової продуктивності може зумовити значні розходження в результатах розрахунків, адже спосіб вводу запиленого потоку в апарат навіть у класичних циклонах у значній мірі впливає на ефективність, що і зумовило декілька варіантів його конструктивного оформлення в цих апаратах.

Саме найважливіші відмінності циклонних елементів створеного батарейного циклона з жалюзійним відводом повітря і класичних циклонів з тангенціальним вводом запиленого потоку і були прийняті визначальними факторами при розробці методу теоретичного визначення ефективності пиловловлювання в цьому апараті.

Це осьова подача запиленого потоку в направляючі апарати циклонних елементів, де він закручується, і відвід очищеного потоку через бокову поверхню жалюзійної решітки циклонних елементів по всій її висоті.

Основою запропонованого методу є відомі рівняння руху частинки в криволінійному каналі між корпусом циклонного елемента і вихідною трубою цього елемента.

Відмінністю цього методу від відомих моделей циклонної сепарації є те, що розрахунок проводиться з використанням осевої швидкості пилогазового потоку і з обов'язковим врахуванням в диференціальних рівняннях руху частинки радіального стоку, адже весь очищений газовий потік попадає у вихідну трубу через бокову поверхню жалюзійної решітки.

Рух частинок у криволінійному потоці при відсутності зовнішніх сил описується рівнянням у векторній формі [2]

$$\frac{d\mathcal{G}}{dt} = \frac{l}{t} \cdot (w - \mathcal{G}) = \frac{l}{\tau} \cdot \mathcal{G}_c, \quad (1)$$

де \mathcal{G} – швидкість прямолінійного руху частинки відносно нерухомої системи координат, м/с; w – середня швидкість повітряного середовища, м/с; τ – час релаксації частинки, с ($\tau = \frac{d^2 \cdot \rho_q}{18 \cdot \mu}$, де d – діаметр частинки, м; ρ_q – густина частинки кг/м³; μ – динамічна в'язкість повітря, Па·с; \mathcal{G}_c – відносна швидкість руху частинки, м/с).

Вираз (1) є диференціальним рівнянням руху частинки в повітряному потоці, де права частина рівняння виражає опір середовища при постійній швидкості руху частинки в даний момент.

В загальному випадку, коли на частинку впливають зовнішні сили, рівняння (1) має вигляд:

$$m \cdot \frac{d\mathcal{G}}{dt} = 3 \cdot \pi \cdot \mu_p \cdot (w - \mathcal{G}) + F, \quad (2)$$

де F – зовнішні сили, а в координатній формі:

$$\begin{cases} m \cdot \frac{d\mathcal{G}_x}{dt} = 3 \cdot \pi \cdot \mu_p \cdot (w_x - \mathcal{G}_x) + F_x; \\ m \cdot \frac{d\mathcal{G}_y}{dt} = 3 \cdot \pi \cdot \mu_p \cdot (w_y - \mathcal{G}_y) + F_y, \end{cases} \quad (3)$$

де $w_x, w_y, \mathcal{G}_x, \mathcal{G}_y$ – складові швидкостей потоку і частинки по осях x та y .

Коли нерухома частинка підхоплюється потоком повітря, її рух визначається рівнянням

$$\frac{d\mathcal{G}}{dt} = \frac{w - \mathcal{G}}{\tau}. \quad (4)$$

Розділивши змінні і провівши інтегрування, враховуючи те, що при $t = 0$ постійна інтегрування $c = \ln(w)$, отримують:

$$\ln\left(\frac{w - \mathcal{G}}{w}\right) = -\frac{t}{\tau},$$

або

$$\mathcal{G} = w \cdot (1 - e^{-t/\tau}), \quad (5)$$

а шлях, що проходить частинка:

$$l = w \cdot \tau \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right). \quad (6)$$

З врахуванням того, що до системи може бути застосована теорія безвихрового руху [3], можна застосувати закон Стокса. Тоді система рівнянь (3), що описує рух частинки відносно газового потоку, в полярних координатах матиме вигляд:

$$\begin{cases} \frac{d^2 R}{dt^2} - R \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 + \frac{1}{\tau} \cdot \frac{dR}{dt} - \frac{\Phi}{\tau R} = 0; \\ 2 \cdot \frac{dR}{dt} \cdot \frac{d\varphi}{dt} \cdot R + R^2 \cdot \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + \frac{1}{\tau} R^2 \frac{d\varphi}{dt} - \frac{k}{\tau} - \frac{\Phi}{\tau R} = 0, \end{cases} \quad (7)$$

де $\frac{dR}{dt}$ - характеризує зміну перерізу апарата; $\frac{d\varphi}{dt}$ - характеризує зміну потенціалу швидкості; k – постійна закону площ ($k = w \cdot R$); Φ – стік на одиниці висоти циклонного елемента ($\Phi = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot h_p}$, де q – витрата повітряного потоку, м³/с; h_p – висота решітки, м).

Перше рівняння характеризує радіальне зміщення частинки, а друге - тангенціальне.

Для розв'язку системи диференціальних рівнянь (7), для визначення швидкості руху частинки у криволінійному каналі, використовується метод Рунге-Кутта, але для цього переходять до системи рівнянь першого порядку, виконавши підстановку:

$$\begin{aligned} \frac{dR}{dt} &= x; & R \cdot \frac{d\varphi}{dt} &= y; \\ \frac{dx}{dt} &= y^2 - \frac{1}{\tau} \cdot x + \frac{\Phi}{\tau R}; & \frac{dy}{dt} &= \frac{-2 \cdot x \cdot y - \frac{1}{\tau} \cdot R \cdot y + \frac{k}{\tau} + \frac{\Phi}{\tau R}}{R}. \end{aligned}$$

Отже, система рівнянь (7) отримає вигляд:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} - y^2 + \frac{1}{\tau} x - \frac{\Phi}{\tau R} = 0 \\ 2 \cdot x \cdot y \cdot R + \frac{dy}{dt} \cdot R + \frac{1}{\tau} \cdot R \cdot y - \frac{k}{\tau} - \frac{\Phi}{\tau R} = 0. \end{cases} \quad (8)$$

З врахуванням того, що в елементи створеного батарейного циклона заповнений газовий потік входить паралельно до їх осей між корпусом і вихлопною трубою, яка в нижній частині виконана у вигляді жалюзійної решітки, закритої знизу конічним днищем, початкові умови для проведення розрахунків приймаються такими:

$t = 0$; $R_0 = R_{cp} = \frac{R_2 - R_1}{2} + R_1$, де R_1 – зовнішній радіус вихідної труби, м; R_2 – внутрішній радіус корпусу циклонного елемента, м; $y_0 = 0$; $x_0 = w_{oc}$ (w_{oc} - швидкість частинки на вході в циклонний елемент, причому $w_{oc} = \mathcal{G}$); $y_0 = w_m$).

Осьова швидкість w_{oc} розраховується за формулою

$$w_{oc} = \frac{q}{\pi \cdot (R_2^2 - R_1^2)}, \quad (9)$$

а тангенціальна швидкість w_m за формулою

$$w_m = \frac{q \cdot R_{cp} \cdot \operatorname{tg} \alpha}{\pi \cdot (R_2^2 - R_1^2)}, \quad (10)$$

де α - кут нахилу лопаток направляючого апарата в циклонному елементі.

Розрахунок проводиться з використанням режимних і конструктивних параметрів створеного пиловловлювача, який досліджувався на експериментальному стенді за рекомендованою для такого класу стандартною методикою.

Це батарейний циклон з прямокутним корпусом, в якому розміщені 8 циклонних елементів у два ряди по чотири в кожному. Діаметр циклонних елементів 100 мм, діаметр вихлопної труби 59 мм, розраховані вони на оптимальну продуктивність 0,035 м³/с (125 м³/год) кожний. Як направляючі апарати в них використані апарати типу "гвинт" і "розетка" з кутом $\alpha = 25^\circ$ з можливістю їх заміни в процесі досліджень.

Обчислені значення вхідного параметра τ при різних діаметрах частинок для рекомендованого пилу і часу t (час від моменту входу частинок на заокруглення, по закінченні якого рух можна вважати практично квазістаціонарним ($t \approx 7\tau$)), наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Значення τ і t для частинок різного розміру ($\rho_q = 2650 \text{ кг/м}^3$)

$d, \text{ м} \cdot 10^{-6}$	$\tau, \text{ с}$	$t, \text{ с}$
2	0,00003183	0,0002228
5	0,0001989	0,0001393
8	0,0005093	0,003565
10	0,0007958	0,005571
20	0,003183	0,022
25	0,004974	0,035

Довжина шляху, який проходять частинки різного діаметра в створеному батарейному циклоні з жалюзійними елементами визначалась згідно з формулою (6). Для кожного інтервалу часу визначалась швидкість частинок різного діаметра в криволінійному каналі (v_k) цього апарата (рис.1).

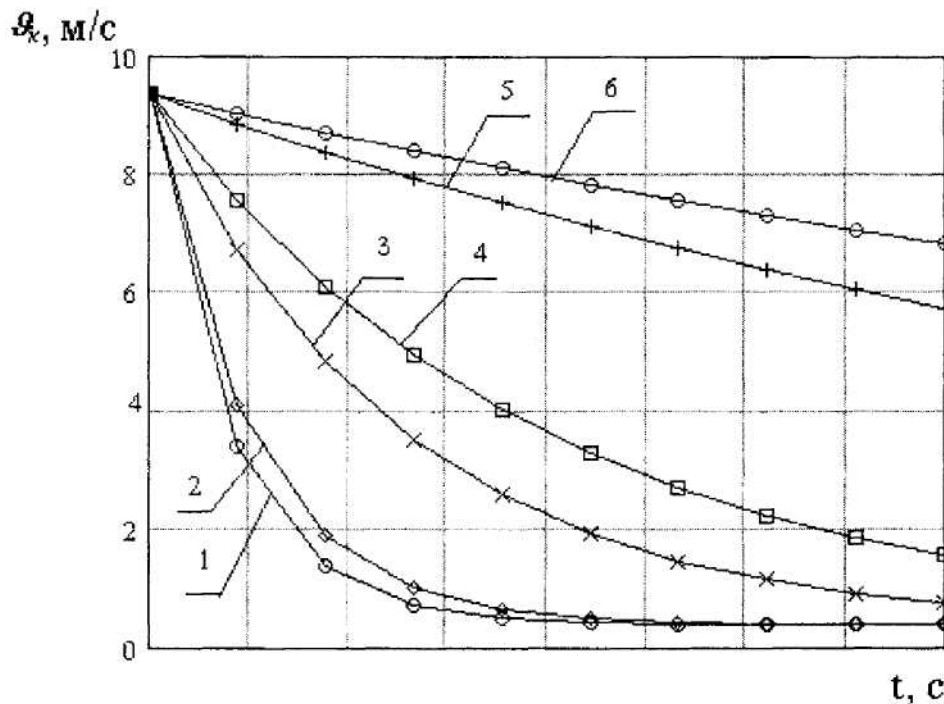


Рисунок 1 – Графік швидкості проходження частинок пилу різного діаметра в батарейному циклоні: 1 - 2 мкм; 2 - 5 мкм; 3 - 8 мкм; 4 - 10 мкм; 5 - 20 мкм; 6 — 25 мкм.

Як показали розрахунки, для частинок, діаметром більше 5 мкм, довжина початкової ділянки відповідає загальному шляху, що проходить частинка в батарейному циклоні.

Враховуючи припущення, що рух частинки по відношенню до газового потоку може описуватися законом Стокса і нехтуючи ефектами підйомної сили, визначається ефективність очистки в створеному батарейному циклоні за значенням критичного діаметра частинки, яка може бути вловлена [4]:

$$d_{кр} = 3 \cdot \sqrt{\frac{\rho \cdot v}{\pi \cdot \rho_q \cdot n \cdot \omega \cdot \ln \frac{R_2}{R_1}}}, \quad (11)$$

де v – кінематична в'язкість повітря, $\text{м}^2/\text{с}$; n – число обертів повітряного потоку в циклоні; ω – середня кутова швидкість твердої фази в циклоні (при умові, що

швидкість повітряного потоку w по перерізу робочої частини циклона є величина постійна) ($\omega = \mathcal{G}_k / R_{cp}$).

Як показав розрахунок, критичний діаметр частинок, що вловлюються в батарейному циклоні, $d_{kp} = 1,8 \cdot 10^{-6}$ м.

За цим значенням, використовуючи графік інтегральної функції розподілу пилу, що поступає в пиловловлювач, визначається теоретично розрахована ефективність пиловловлювання.

Для батарейного циклона, який досліджувався, при вловлюванні експериментального кварцового пилу густиною $\rho_{\text{ч}} = 2650 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ з медіанним діаметром частинок $\delta_{50} = 8$ мкм теоретично розрахована ефективність становить 88 %.

Експериментально визначена ефективність пиловловлювання в тих умовах, параметри яких закладені у використанні рівняння, в пиловловлювачі з направляючими апаратами пилу "розетка" становить 93 %, а в пиловловлювачі з направляючими апаратами типу "гвинт" - 91 %.

Розходження між теоретично розрахованими і експериментально визначеними значеннями ефективності пиловловлювання може бути зумовлене декількома причинами: неповним врахуванням факторів, що впливають на процес сепарації, вловлюванням частинок і меншого розміру, особливо при утворенні агрегатів, і т. д.

Висновки

Все ж таки вирішальну роль в такому розходженні експериментальних результатів з результатами розрахунків відіграє те, що у використаній математичній моделі не в повній мірі враховані розділяючі властивості застосованих в циклонних елементах жалюзійних решіток. Адже не всі частинки пилу, які будуть зноситись газовим потоком до осі апарата, будуть винесені ним у вихлопну трубу – частина з них виділяється із газового потоку за рахунок розділяючих властивостей решітки.

Якщо скористатись твердженням авторів [5,6], що за рахунок застосування у відцентрових пиловловлювачах жалюзійного відводу очищеного газу можна досягти підвищення їх ефективності на 6 – 10%, розходження буде зовсім незначним. А це свідчить про те, що застосований метод розрахунку ефективності пиловловлювання в батарейному циклоні з жалюзійними елементами цілком придатний для пиловловлювачів такої конструкції.

Література

1. Батарейний циклон з жалюзійними елементами: Пат.59139А Україна. 7 В04С 3/06/Куц В.П., Ярош Я.Д., Марціяш О.М. Заявл.24.02.03; Опубл.15.058.03; Бюл.№8. –2с.
2. Пирумов А.И. Обеспыливание воздуха. –М.: Стройиздат, 1981. –296с.
3. Страус В. Промышленная очистка газов. –М.: Химия, 1981. –616с.
4. Смухнин П.Н., Коузов П.А. Центробежные пылеотделители – циклоны. – М.-Л.: Главная редакция строительной литературы, 1935. –119с.
5. Куц В.П. Повышение эффективности пылеулавливания в центробежно-инерционных пылеотделителях с жалюзийным отводом воздуха: Дис.... канд.техн.наук: 05.17.08. –Львов, 1986. – 221с.
6. Каспрук В.Б. Підвищення ефективності пиловловлювання в апаратах із зустрічними закрученими потоками: Дис.... канд.техн.наук: 05.05.13. –Тернопіль, 1998. –165с.
7. Батунер Л.М., Позин М.Е. Математические методы в химической технике. –Л.: Химия, 1971. –824с.

Одержано 29.06.2006 р.