

УДК 628.511

## Аналіз дії кулонівської та відцентрової сил на частинку пилу в циклоні з прямоточними елементами

Е.І. Дмитроченкова

К.т.н, доцент, Київський національний університет будівництва та архітектури, [ella.dmitrochenkova@mail.ru](mailto:ella.dmitrochenkova@mail.ru)

*У статті представлена конструкція комбінованого прямоточного циклону, де поєднуються відцентровий і електронний механізми сепарації пилу. Наведені рівняння для розрахунку кулонівської та відцентрової сил, а також сили опору газового середовища. Проаналізована зміна величини сумарної сили в порівнянні з силою опору газового середовища в залежності від зміни швидкості порошинки. Зазначена залежність величин відцентрової на електричної сил залежно від відстані частинки від осі потоку.*

*Ключові слова: комбінований циклон, відцентрова сила, кулонівська сила, сила опору потоку*

**Вступ.** Повітряні викиди промислових підприємств завдають значної шкоди навколишньому природному середовищу: забруднюють атмосферу промайданчиків і житлових районів, що негативно впливає на здоров'я людей.

Більшість промислових викидів містять цінні напівпродукти (метали, хімічні речовини), які безповоротно втрачаються. Тому очищення і знешкодження промислових викидів має санітарне та економічне значення.

Техніка знепилювання характеризується великою різноманітністю конструкцій і форм виконання обладнання. Циклони є найбільш характерними і поширеними представниками сухих інерційних пиловловлювачів, які, як правило, мають просту конструкцію, характеризуються великий пропускнуною спроможністю і нескладні в експлуатації. На сьогоднішній день актуальна проблема підвищення ефективності пиловловлюючого обладнання.

### 1. Основний матеріал досліджень.

Принцип роботи циклону такий, що для підвищення його ефективності необхідно, щоб весь пил, що знаходиться в газі, концентрувалася в зоні біля стінок апарату. Тривале знаходженні пилу в криволінійному потоці надає можливість сепарувати пил будь-якого фракційного складу, але це призведе до невиправданого збільшення габаритів циклону і підвищення його гідравлічного опору. Тому доцільно для більш швидкої сепарації пилу використовувати електричне поле, в результаті чого на пил будуть діяти кулонівська і відцентрова сили узгоджено.

На рис. 1 представлений комбінований прямоточний циклон. Через центр гвинта через ізолятор 2 розміщується електрод 1, на який подається висока напруга негативної полярності.

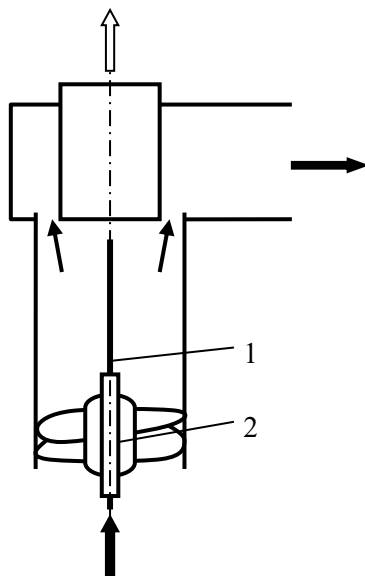


Рис. 1 – Комбинированный прямоточный циклон

У комбінованому прямоточному циклоні послідовно поєднується відцентровий і електричний механізми сепарації пилу. У роботі [1] виконані теоретичні та експериментальні дослідження руху заряджених аерозолів, а також фізичних процесів, що протікають в електрофільтрах.

Розподіл тангенціальної швидкості по радіусу корпусу прямоточного циклону за даними експериментальних досліджень носить складний характер. У центральній частині потоку, в так званому ядрі вихору, тангенціальна швидкість зростає зі збільшенням радіуса  $R$  за законом  $V_t = \omega R$  (зона твердого тіла), а потім по мірі наближення до корпусу прямоточного циклону зменшується. Можливість детального аналізу закону затухання тангенціальної швидкості в зоні біля стіни ускладнена через нестачу експериментальних даних, однак все повітря, що знаходиться в цій області, видаляється разом з сепарований пилом. Тому розподіл тангенціальної швидкості по радіусу в корпусі прямоточного циклону приймається таким же, як і в ядрі вихору, тобто вважається, що повітря обертається як тверде тіло і відрізняється постійною кутовою швидкістю [2].

Цікавим є розгляд окремо дії кулонівської і відцентрової сил.

Потік газу, що транспортується, спрямований вертикально вгору, поздовжній рух частинок вважається сталим, тобто рівномірним зі швидкістю

$$U = W - U_в, \quad (1)$$

де  $W$  – усереднена по перетину швидкість газу, м/с;  $U_e$  – швидкість вітання часток, м/с.

Характер руху газу характеризується критерієм Рейнольдса

$$Re = \rho W d / \mu, \quad (2)$$

де  $\rho$  – густина повітря, кг/м<sup>3</sup>;  $W$  – швидкість руху газу, м/с;  $d$  – діаметр труби, м;  $\mu$  – в'язкість газу, кг/(м·с).

Крім того приймаються наступні припущення: розподіл часток пилу в початковому перетині рівномірний і, зважаючи на малу концентрації дисперсної фази, зміна електричного поля за рахунок об'ємного заряду пилу не враховується.

Були розглянуті частинки радіусом  $r \geq 1$  мкм, поле напруженістю  $E > 1$  кВ/см, тому до уваги брався лише «ударний» механізм зарядки частинок.

Сила опору середовища у всьому діапазоні швидкостей частинок визначається однією залежністю - формулою Клячко Л.С. Величина відхилення сили опору від експериментальних даних в області малих швидкостей ( $Re < 1$ ), де більш точними є формули Стокса і Осєєна, не перевищує 2,5%. В даному випадку значення критерію Рейнольдса для частинки змінюється в інтервалі 0,1 - 10.

Розгляд ведеться в системі координат, що рухається разом з часткою в поздовжньому напрямку рис. 2.

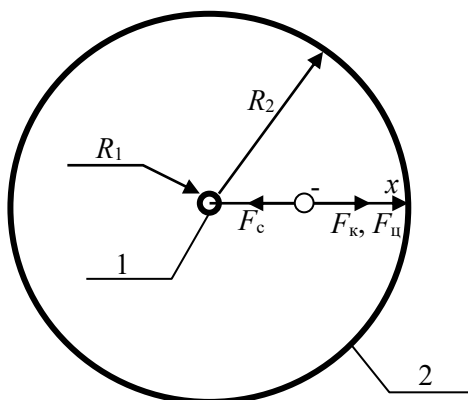


Рис.2 - Сили, що діють на частку пилу в вихровому потоці і неоднорідному електричному полі з аксіальною симетрією:

1 – коронуючий електрод; 2 - осаджувальний електрод.

При зазначених припущеннях рівняння руху часток пилу та кінетика їх зарядки має вигляд:

$$\frac{mdV}{dt} = E(R)Q(t) - F_c, \quad (3)$$

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{ken(t)}{4\varepsilon_0} Q_m \left[ 1 - \frac{Q(t)}{Q_m} \right]^2, \quad (4)$$

$$E = E_0 \sqrt{\frac{i}{2\pi\varepsilon_0 KE_0} \left( 1 - \frac{R_1^2}{R^2} \right) + \left( \frac{R_1}{R} \right)^2}, \quad (5)$$

де  $\varepsilon_0 = (4\pi \times 9 \times 10^9)^{-1}$  – електрична стала, Ф/м;  $K$  – рухливість іонів, м<sup>2</sup>/(В·с);  $R$  – поточний радіус, м.

Критична напруженість поля (формула Піка) поблизу поверхні коронуючого електрода, В / м:

$$E_0 = 3,03\delta_n \left( 1 + 0,0298\sqrt{\delta_0 R_1} \right), \quad (6)$$

де  $\delta_n$  – відношення дійсної густини повітря до його густини при нормальних умовах.

Лінійна щільність струму корони, А/м:

$$i = \frac{2K4\pi\varepsilon_0}{R_2^2 \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} U(U - U_0), \quad (7)$$

де  $U$  – напруга, прикладена до електродів, В.

Критична напруга для трубчастого електрофільтра з коронуючими електродами, виконаними з гладкого дроту [3], В:

$$U_0 = E_0 R_2 \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right), \quad (8)$$

Частки пилу в полі коронного заряду практично миттєво набувають електричний заряд, який визначається за формулою Понтъє

$$Q = 4\pi\varepsilon_0 \left( 1 + 2 \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \right) Er_c^2 \frac{Ken_0 t}{4\varepsilon_0 + Ken_0 t}, \quad (9)$$

де  $\epsilon$  – відносна діелектрична проникність частки пилу;  $r_i$  – радіус частки пилу, м;  $e$  – заряд електрону, Кл;  $n_0$  – початкова концентрація іонів,  $\text{м}^{-3}$ ;  $t$  – час зарядки, с.

Тоді діюча на частинки пилу кулонівська сила може бути визначена наступним чином:

$$F_k = QE = 2\pi\epsilon_0 E^2 d^2 = 2\pi\epsilon_0 d^2 \left\{ \frac{2i}{4\pi\epsilon_0 K} \left[ 1 - \left( \frac{R_1}{R} \right)^2 \right] + \left( E \frac{R_1}{R} \right)^2 \right\} =$$

$$= \frac{id^2}{K} \left[ 1 - \left( \frac{R_1}{R} \right)^2 \right] + 2\pi\epsilon_0 d^2 \left( E \frac{R_1}{R} \right)^2, \quad (10)$$

де  $d$  – діаметр частки пилу, м.

З формули (10) випливає, що сила, яка діє на частинки пилу з боку електричного поля, швидко зменшується в міру їх наближення до осаджувального електроду.

Приймається, що газовий потік разом з розташованими в ньому частинками пилу обертається в корпусі прямої циклону з постійною кутовою швидкістю  $\omega$ . Це припущення з достатньою точністю виконується для частинок пилу розміром менше 10 мкм. Тому відцентрова сила інерції може бути визначена за формулою [2]:

$$F_u = \frac{\pi d^3 \rho \omega^2 R}{6}, \quad (11)$$

Під дією сумарної сили  $F = F_k + F_u$  частка пилу рухається в радіальному напрямку до стінки циклону зі швидкістю  $\omega_p$ . Цьому руху газове середовище чинить опір, величина якого може бути визначена за формулою [4]

$$F_c = 3\pi\omega_p d \mu, \quad (12)$$

где  $\omega_p$  – радіальна швидкість частинки пилу, м/с;  $\mu$  – в'язкість газового середовища, Н·сек/м<sup>2</sup>.

Після входу в циклон сумарна сила  $F$  значно перевищує сили опору середовища  $F_c$ , так як початкове значення швидкості порошинки в радіальному напрямку дорівнювало нулю. Але в міру зростання цієї швидкості, практично через соті долі секунди, ці сили стають рівними, і з цього моменту частка продовжує рухатися в радіальному напрямку з постійною швидкістю, яку визначають з рівності  $F_c = F$ .

Як видно з формули (11), відцентрова сила інерції на відміну від електричної сили (10) збільшується зі зростанням відстані частинки від осі потоку.

Таким чином, електрична та відцентрова сили, будучи однаково

спрямованими, взаємно доповнюють одна одну.

**Висновок.** Виходячи із всього вищезазначеного, існує принципова можливість підвищення ефективності очищення газу шляхом оптимального поєднання відцентрового і електростатичного механізмів сепарації пилу.

Подальші розрахунки нададуть можливість визначити відстань від коронуючого електроду, де сумарна сила  $F$  має мінімальне значення.

### Література

1. Верещагин И. П. Основы электрогазодинамики и дисперсных систем [Текст] / И. П. Верещагин, В. И. Левитов, Г. З. Мирзабекян // – М. : Энергия, 1974. – 480 с.
2. Пирумов А.И. Обеспыливание воздуха [Текст] / А.И. Пирумов. – М. : Стройиздат, 1981. – 296 с.
3. Пылеулавливание в металлургии: Справочник [Текст] / Под ред. А. А. Гурвица. – М. : Металлургия, 1984. – 336 с.
4. Гордон Г. М. Пылеулавливание и очистка газов [Текст] / Г. М. Гордон, И. Л. Пейсахов // – М. : Стройиздат, 1968. – 499 с.

## Анализ действия кулоновской и центробежной сил на пылинку в циклоне с прямоточными элементами

Э. И. Дмитроченкова

*В статье представлена конструкция комбинированного прямоточного циклона, где сочетаются центробежный и электронный механизмы сепарации пыли. Приведенные уравнения для расчета кулоновского и центробежной сил, а также силы сопротивления газовой среды. Проанализировано изменение величины суммарной силы по сравнению с силой сопротивления газовой среды в зависимости от изменения скорости пылинки. Отмечена зависимость величин центробежной и электрической сил в зависимости от расстояния частицы от оси потока.*

## The analysis of action of Coulomb and centrifugal forces on a mote in a cyclone with direct-flow elements

E. Dmitrochenkova

*The design of the combined direct-flow cyclone where centrifugal and electronic mechanisms of separation of dust are combined is presented in article. The given equations for calculation Coulomb and centrifugal forces, and also force of resistance of the gas environment. Change of size of total force in comparison with force of resistance of the gas environment depending on change of speed of a mote is analysed. Dependence of sizes of centrifugal and electric forces depending on particle distance from a stream axis is noted.*

Надійшла до редакції 21.04.2016