

АНАЛІЗ ПРЯМОТОЧНИХ ЦИКЛОННИХ ОЧИСНИХ АПАРАТІВ

Смілян І.О., аспірант, Степанюк А.Р., к.т.н., доцент
Національний технічний університет України «КПІ», м. Київ

Проведено огляд та аналіз циклонних прямоточних апаратів для вловлення дрібнодисперсних твердих часток. На основі аналізу запропоновано підхід для створення нової конструкції для вловлювання частинок з газового потоку.

The review and analysis of cyclone uniflow apparatus for catching fine particulate matter. On the basis of an approach to create new designs to capture particles from the gas stream.

Ключові слова: осадження, циклон, частинки, конструкція, пиловловлювання.

Найбільш простий спосіб очистки газів від механічних частинок є осадження частинок під дією відцентрової сили, у так називаємих циклонах. Цей тип апаратів має ряд переваг: простота конструкції відсутність рухомих елементів конструкції, порівняно велика питома швидкість фільтрації (до 7...8 м/с), та ефективність пиловловлювання (до 98%). Проте існує і ряд недоліків, серед них обмежений діапазон розмірів частинок, що вловлюються (найменші частинки до 1 мкм) можливий вторинний винос частинок, обмеження щодо властивостей частинок (вологість, здатність до коагуляції) [1].

Метою роботи є дослідження способів осадження твердих частинок з газового потоку та надання рекомендацій щодо зменшення гідравлічного опору та покращення ефективності пиловловлювання та створення узагальнених фізичної та математичної моделей для визначення ефективності пиловловлювання.

За принципом дії циклони бувають: прямоточні і протиточні.

Перевагою прямоточних циклонів є простота конструкції, рівномірно розподілений профіль швидкостей потоку по всьому апарату, висока степінь очистки. До недоліків можна віднести досить значну висоту циклонів, складне відведення пилу з апарату та скупчення великої кількості пилу внизу апарата.

Цих недоліків позбавлені протиточні циклони.

Розглянемо деякі види циклонів і їх переваги і недоліки.

Циклон з тангенційним горизонтальним вводом потоку та радіальним стоком зображено на рис. 1 [1].

До переваг такого типу апарату можна віднести відведення частини очищеного повітря з циклона перед вихлопною трубою, зниження швидкості потоку повітря у вихлопній трубі, зниження радіального стоку у конічній частині циклона, зменшення перепаду статичного тиску у плоскому перерізі циклона, ці фактори впливають також на зменшення гідравлічного опору.

З недоліків можна відзначити досить погану організацію потоку на вході в апарат, коло такий після першого витка потік очищеного повітря зіткається з неочищеним, внаслідок чого виникає турбулізація потоку і в наслідок чого вторинний виникає викид пилу в потік, та зменшення відцентрової сили, недостатньо висока степінь очистки.

Більшості перерахованих раніше недоліків позбавлений циклон конструкції "НИОГАЗ" зображено на рисунку 2 з тангенційним вводом потоку повітря. [2]

Переваги такого типу апаратів є покращення організація потоку на вході в апарат, висока степінь очистки, вивантаження осаду із бункера можна робити безперервно, що дає змогу використовувати такі циклони в процесах безперервної дії, при потребі можна збільшити швидкість газового потоку.

З недоліків можна відзначити порівняно великий гідравлічний опір, збільшення гідравлічного опору при збільшенні продуктивності, при збільшенні швидкості значно зменшується ККД та збільшується турбулентність потоку, що сприяє вторинному виносу вловлених частинок.

Деякі зі вказаних недоліків постаралися вирішити автори розробки циклону з ступеневим відведенням твердої фази зображено на рисунку 3 [3].

Перевагами цього апарату відносно невеликий гідравлічний опір, високу ефективність і висока степінь очистки.

Недоліками є можлива турбулізація потоку за рахунок ступінчастої зміни твірної конусу циклоні і, як результат, вторинний унос частинок, що рухається до бункера та значні втрати тиску, також можливе попадання запиленого потоку через жалози циліндричної частини вихлопної труби, досить складна конструкція, складність при монтажі та експлуатації.

Гідравлічний опір розглянутих апаратів досить значний. Враховуючи значні обсяги відходів, енергетичні затрати процесів очищення є дуже великі. Тому роботи, спрямовані на зменшення гідравлічного опору циклонних пиловловлювачів шляхом модернізації відомих конструкцій, а також створення нових апаратів є актуальними.

За результатами пошуку встановлено, що найсприятливішим чином у циклонних апаратах є протиточні циклони, проте в них недостатньо вирішено проблему вторинного уносу частинок та доцільно збільшити питому продуктивність апарату.

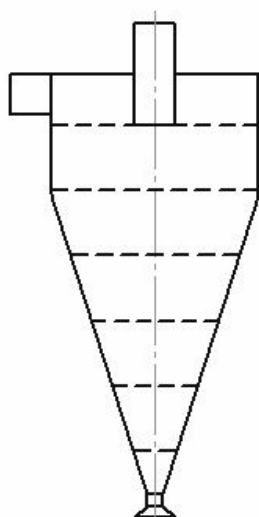


Рис. 1 – Циклон з радіальним стоком

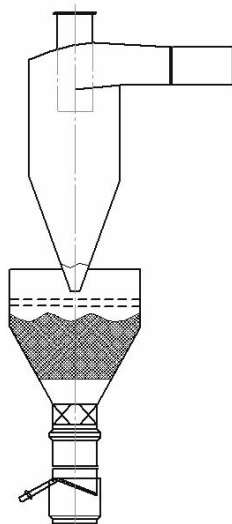


Рис. 2 – Циклон конструкції “НИОГАЗ”

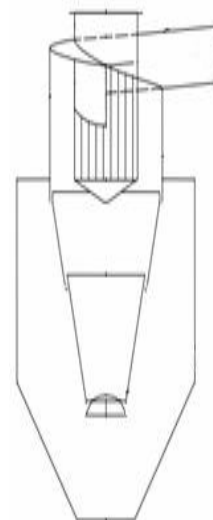


Рис. 3 – Циклон з ступеневим відведенням твердої фази

Найкращим вирішенням такої проблеми, з нашого погляду, є створення апарату, який би поєднував простоту конструкції прямогочного циклону та мав би якомога менший гідравлічний опір. Наприклад в апараті доцільно встановити спеціальні пристрої для розкрутки низхідного потоку, тим самим можна зменшити витрати енергії руху потоку, що витрачається на поворот потоку. Зменшення гідравлічного опору та стабілізація низхідного потоку призведе до можливості збільшення швидкості фільтрування.

Для визначення ефективності процесу циклонування була підібрана наступна фізична модель: у циклоні частинки рухаються по колу, без зіткнень, рис.4

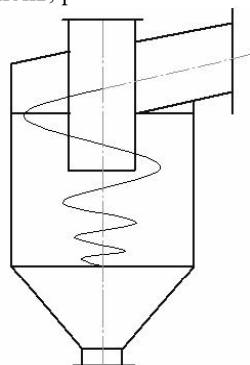


Рис. 4 – Фізична модель циклонного апарату

Математична модель циклонного процесу. Система дифференціальних рівнянь руху частинки діаметром δ в полярних координатах ρ, φ має вигляд:

$$\mathbf{m}_j \times \mathbf{r} = \mathbf{F}_r ; \quad \mathbf{m} \times \mathbf{j}_\varphi = \mathbf{F}_\varphi$$

де j_r, j_φ - проекції вектора прискорення на радіус-вектор і нормаль до нього;
 F_r, F_φ - проекції сили опору F .

Система диференціальних рівнянь руху частинки діаметром δ в полярних координатах ρ, φ має вигляд:

$$\mathbf{m}_j \times \mathbf{r} = \mathbf{F}_r ; \quad \mathbf{m} \times \mathbf{j}_\varphi = \mathbf{F}_\varphi$$

де $\mathbf{j}_r, \mathbf{j}_\varphi$ - проєкції вектора прискорення на радіус-вектор і нормаль до нього;
 $\mathbf{F}_r, \mathbf{F}_\varphi$ - проєкції сили опору \mathbf{F} .

Враховуючи те, що $\mathbf{j} = \mathbf{j}_r + \mathbf{j}_\varphi$ і приймаючи за додатній напрямок $\mathbf{j}_r, \omega_r, v_r$ - напрямок від центра обертання і за додатній напрямок \mathbf{j}_φ - напрямок, що відповідає обертанню радіус - вектора проти годинникової стрілки, отримаємо:

$$\mathbf{j}_r = \mathbf{j}_{\text{ом}} + \mathbf{j}_{\text{вц}} = \frac{d\omega_r}{d\tau} - r \times \omega_r^2 = \frac{d\omega_r}{d\tau} - \frac{d\omega_r^2}{r}$$

$$\mathbf{j}_\varphi = \mathbf{j}_{\text{дот}} + \mathbf{j}_{\text{кор}} = \frac{r \times d\omega_2}{d\tau} - 2 \times \omega_2 \times \omega_r = \frac{d\omega_\varphi}{d\tau} - \frac{\omega_r \times \omega_\varphi}{r}$$

З рисунка отримаємо, що

$$F_r = F \times \cos \gamma = \frac{F \times u_r}{u} = \psi \times \frac{\pi \times \eta \times \delta \times u_r}{8}, \quad F_\varphi = F \times \sin \gamma = \frac{F \times u_\varphi}{u} = \psi \times \frac{\pi \times \eta \times \delta \times u_\varphi}{8}$$

Отже, з наведеного вище ми отримаємо:

$$\frac{d\omega_r}{d\tau} = \frac{d\omega_r^2}{r} + \psi \times \frac{\pi \times \eta \times \delta \times (v_r - \omega_r)}{8 \times m}, \quad \frac{d\omega_\varphi}{d\tau} = \frac{-\omega_r \times \omega_\varphi}{r} + \psi \times \frac{\pi \times \eta \times \delta \times (v_\varphi - \omega_\varphi)}{8 \times m}$$

Система безрозмірних рівнянь руху частинки в повітряному потоці має вигляд:

$$\frac{dq}{dT} = W_r$$

$$\frac{d\varphi}{dT} = \frac{W_\varphi}{q}$$

$$\frac{dW_r}{dT} = \frac{W_\varphi^2}{q} + \frac{\psi \times (V_r - W_r)}{St}$$

$$\frac{dW_\varphi}{dT} = \frac{W_\varphi \times W_r}{q} + \frac{\psi \times (V_\varphi - W_\varphi)}{St}$$

До цих рівнянь додамо ще два рівняння кінематики:

$$\frac{dr}{d\tau} = \omega_r, \quad \frac{d\varphi}{d\tau} = \omega_2 = \frac{\omega_\varphi}{r}$$

Виключимо з системи рівнянь часу, отримаємо систему в наступному вигляді:

$$\frac{dq}{d\varphi} = \frac{q \times W_r}{W_\varphi}, \quad \frac{dW_r}{d\varphi} = W_\varphi + \frac{\psi + q \times (V_r - W_r)}{St \times W_\varphi}, \quad \frac{dW_\varphi}{d\varphi} = -W_r + \frac{\psi + q \times (V_\varphi - W_\varphi)}{St \times W_\varphi}$$

Математична модель вирішена за допомогою числових методів з використанням кінцево-різничної схеми.

Висновки: за результатами роботи запропоновано підходи до створення нової конструкції апаратів для вловлення твердих частинок з газового потоку, проведено фізичне та математичне моделювання процесу пилловловлення. За результатами моделювання визначено оптимальні розміри циклонного апарату.

Література

1. www.nbu.gov.ua/portal/chem_biol/nvntu від 20.02.2011
2. А.Г Касагін "Основні процеси і апарати хімічної технології".
3. www.nbu.gov.ua/portal/chem_biol/nvntu від 20.02.2011