

УДК 621.928.9

В.Куц, канд.техн.наук; Я.Ярош; О.Марціяш

Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя

ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ГІДРАВЛІЧНОГО ОПОРУ БАТАРЕЙНОГО ЦИКЛОНА З ЖАЛЮЗІЙНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ

Оцінюється придатність відомих методів розрахунку гідравлічного опору циклонів для визначення опору розробленого авторами батарейного циклона з жалюзійними елементами шляхом порівняння даних розрахунків за цими методами з результатами проведених експериментальних досліджень.

Умовні позначення

Δp – перепад тиску, Па;

ξ – безрозмірний коефіцієнт втрати тиску;

u_i – швидкість газу на вході в циклон, м/с;

ρ – густина газу, кг/м³;

$\rho_{\text{ч}} = c(\rho_{\text{ч}} - \rho)$ – густина частинок з врахуванням концентрації c , кг/м³;

ε – коефіцієнт опору;

D – діаметр циклона, м;
 D_e – діаметр вихідної труби циклона, м;
 H – висота циклона, м;
 h – висота циліндричної частини циклона, м;
 S – глибина вихідної труби циклона, м;
 a – висота входу в циклон, м;
 b – ширина входу в циклон, м;
 $a \cdot b$ – поперечний переріз вхідного патрубку в циклон, м²;
 u_e – швидкість газу на вході у вихідну трубу, м/с;
 K – поправочний коефіцієнт;
 g – прискорення сили ваги, м/с²;
 w – швидкість газу в поперечному перерізі (плані) апарата, м/с;
 Q – витрата газу, м³/с;
 k – коефіцієнт пропорційності;
 m – показник степені.

Знання перепаду тиску в пиловловлювачах і факторів, які на нього впливають, необхідне для передбачення енергії, що споживається, і, якщо це можливо, зменшення її шляхом вибору кращих параметрів апарата, а також для вибору вентиляторів.

Ефективність пиловловлювання і гідравлічний опір є основними параметрами будь-якого пилоочисного обладнання. Їх визначення є основою методики розрахунку цього обладнання.

При створенні нових пиловловлюючих апаратів виникає необхідність розробки такої методики і перевірки її достовірності співставленням розрахованих показників з результатами експериментальних досліджень. Часто за основу такої методики беруть методику розрахунку інших пиловловлюючих апаратів, подібних за принципом дії, вносять в них певні корективи, зумовлені особливостями даного апарата, і співставляють дані розрахунків і результати експериментів.

Для представленого на рис. 1 батарейного циклона з жалюзійними елементами, в якому поєднані принципи дії циклонних і жалюзійних пиловловлювачів, при розробці такої методики повинні враховуватись особливості як циклонів, так і жалюзійних апаратів.

Для циклонів розроблено декілька методів розрахунку їх гідравлічного опору. По-різному враховуючи фактори, що впливають на величину гідравлічного опору в цих апаратах, їх автори одержують результати, які часто не тільки не співпадають, але і значно розходяться між собою [1].

По-різному здійснюється перехід від результатів, одержаних для одиничних апаратів, до апаратів, скомпонованих в групи.

Для жалюзійних пиловловлювачів в більшості випадків оцінка величини гідравлічного опору проводиться разом з додатковим пиловловлювачем, що встановлюється після них.

Провівши повний комплекс експериментальних досліджень створеного батарейного циклона з жалюзійними елементами і розробляючи методику його розрахунку, було вирішено провести порівняльну оцінку відомих методів розрахунку гідравлічного опору циклонів з метою перевірки придатності їх для створеного апарата.

Вибір циклонів як базових апаратів для порівняння зумовлений тим, що конструкція створеного пиловловлювача розроблялась у відповідності з рекомендаціями проектування циклонів [2].

Однак циклонні елементи цього пиловловлювача принципово відрізняються від елементів класичних циклонів. Основою їх конструкції є відцентрово-інерційний пиловловлювач з жалюзійним відводом повітря [3].

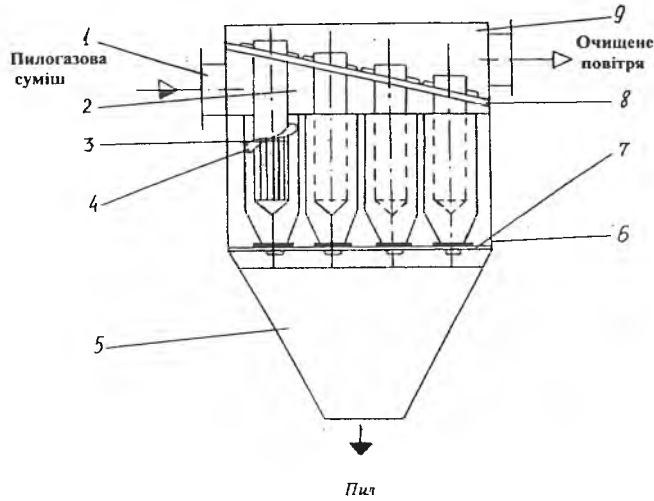


Рис 1. Батарейний циклон з жалюзійними елементами:
 1 - вхідний патрубок; 2 - розподільча камера; 3 - жалюзійний елемент; 4 - направляючий апарат; 5 - бункер; 6 - корпус; 7 - нижня опорна решітка; 8 - верхня опорна решітка; 9 - камера очищеного газу

Як показали результати досліджень цього апарата [4], він як за показниками гідравлічного опору, так і за показниками ефективності пиловловлювання переважає циклони. Розроблена на основі результатів досліджень методика розрахунку дозволяє визначати всі параметри цього пиловловлювача.

Для перевірки можливої придатності застосування методики розрахунку цього апарата як основи методики розрахунку створеного батарейного циклона з жалюзійними елементами було вирішено поряд з методиками розрахунку циклонів провести розрахунок гідравлічного опору батарейного циклона і за методикою розрахунку відцентрово-інерційного пиловловлювача з жалюзійним відводом повітря.

Слід відзначити, що при проведенні розрахунків створеного батарейного циклона за методами розрахунків одиничних циклонів потрібно враховувати відмінність входу повітряного потоку в апарат – тангенціальний в одиничних циклонах і через закручуючі елементи між корпусом і вихідною трубою в елементах батарейного циклона. Для проведення розрахунків циклонні елементи приймалися такими, як відповідні їм за розмірами одиничні циклони з тангенціальним патрубком вводу повітряного потоку.

Найважливіші етапи розрахунків приводяться нижче.

В циклонах розрізняють такі перепади тиску (зменшення або збільшення): втрати тиску у вхідній трубі внаслідок тертя; втрати, обумовлені розширенням або стисненням газу на вході; втрати в циклоні внаслідок тертя об стінки; втрати кінетичної енергії в циклоні; втрати на вході у вихідну трубу; гідростатичний напір між вхідною і вихідною трубою; рекуперация енергії у вихідній трубі [1].

В той час, як одні автори [5,6] пропонують детальні теорії, які враховують ряд причин перепаду тиску, інші [7,8] вважають, що втрати газом кінетичної енергії в циклоні настільки переважають втрати від всіх інших причин, що тільки ці втрати і повинні враховуватись. В [8] приводиться вираз для визначення цього перепаду в залежності від швидкості на вході і безрозмірного коефіцієнта втрати тиску:

$$\Delta p = \xi \frac{u^2 (\rho + \rho_v)}{2} \quad (1)$$

Слід зауважити, що хоч теоретично густина середовища збільшується внаслідок наявності частинок, і це повинно було б привести до збільшення перепаду тиску у відповідності з цим рівнянням, на практиці, з інших причин, наявність частинок зменшує перепад тиску в циклоні.

Автор [6] пропонує детально розроблений метод розрахунку коефіцієнта втрати тиску, що ґрунтується на двох факторах: на втраті тиску на вході в циклон і втраті тиску внаслідок тертя об стінки (позначені індексом і), а також на втраті тиску в центральній області і на вході у вихідну трубу (позначені індексом е).

Коефіцієнти втрати тиску ξ виражаються через швидкості газів на вході, рівну $u_{r,max}$, і задаються у вигляді функції від коефіцієнта опору ε , який визначається за формулою

$$\varepsilon = \frac{\xi}{\left(\frac{a \cdot b}{\pi D_e^2} \right)^2 \cdot \left(\frac{u_{r,max}}{u_e} \right)^2} \quad (2)$$

Коефіцієнт опору є сумою двох компонентів:

$$\varepsilon = \varepsilon_i + \varepsilon_e, \quad (3)$$

які можуть бути знайдені з таких виразів

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta p_i}{u_{r,max}^2 (\rho + \rho_v) \cdot 2g} = \frac{D_e}{D} \left\{ \frac{1}{\left[1 - \frac{2u_{r,max} (H - S) \cdot \mu}{u_e \cdot D_e} \right]^2} - 1 \right\}; \quad (4)$$

$$\varepsilon_e = \frac{\Delta p_e}{u_{r,max}^2 (\rho + \rho_v) \cdot 2g} = \frac{K}{\left(\frac{u_{r,max}}{u_e} \right)^{2.3} + 1}. \quad (5)$$

Співвідношення швидкостей $\frac{u_{r,max}}{u_e}$ було виражене через розміри циклона, коефіцієнт тертя газ-стінка μ і конструкційний коефіцієнт втрат на вході α

$$\frac{u_{r,max}}{u_e} = \frac{\pi D_e (D - b)}{2ab\alpha + \pi (H - S) \cdot (D - b) \mu}. \quad (6)$$

Величина α залежить від форми входу і може бути більшою, або меншою за одиницю.

Автор [9] визначив $\xi / \frac{ab}{\pi D_e^2}$ для ряду співвідношень $\frac{u_{r,max}}{u_e}$. Його величина,

як і величина K , залежить від форми входу в трубу.

Отже, для розрахунку коефіцієнта втрати тиску ξ необхідно знайти значення ε_i і ε_c за рівняннями (4) і (5) і співвідношення $\frac{u_{c, \text{max}}}{u_c}$ за рівнянням (6), а потім застосувати рівняння (2)

Альтернативний метод розрахунку втрати тиску, запропонований в [5], ґрунтується на визначенні в різних точках втрат тиску, що виражаються через швидкісний напір за формулою $\frac{u^2(\rho + \rho_s)}{2g}$:

- 1) на вході – 1-й швидкісний напір $\frac{u_i^2(\rho + \rho_s)}{2g}$;
- 2) на виході – 2-й швидкісний напір $\frac{u_c^2(\rho + \rho_s)}{2g}$;
- 3) втрати всередині циклона.

Крім того, втрати, які виникають у вхідній і вихідній трубі, повинні бути розраховані за нормальними рівняннями для перепаду тиску в газоходах (рівняння Фаннінга). Автор запропонованого методу вважає, що втрати всередині циклона є втратами внаслідок тертя об стінку і втратами кінетичної енергії. Було знайдено, що втрата кінетичної енергії є подвоєна різниці між швидкісним напором на вході і на периферії внутрішньої області, тобто $\frac{(\rho + \rho_s) \cdot (u_{c, \text{max}}^2 - u_i^2)}{g}$, тоді як коефіцієнт втрат на тертя є від-

ношенням окружної швидкості u_c на радіусі входу $\left(\frac{D}{2} - \frac{b}{2}\right)$ до лінійної швидкості у вхідному газоході u_i , тобто

$$\varphi = \frac{u_c}{u_i} \quad (7)$$

$$\varphi = \frac{-\sqrt{\frac{D_c}{2(D-b)}} + \sqrt{\frac{D_c}{2(D-b)} + \frac{4GA}{ab}}}{2 \frac{GA}{ab}} \quad (8)$$

де G – постійна тертя (безрозмірна константа втрат на тертя Стенгтона і Панелла, рівна 0,05 для газових циклонів); A – площа поверхні циклона, яка контактує з газами; ab – площа поперечного перерізу вхідної труби.

Значення коефіцієнта втрат на тертя φ може бути знайдено із графіка залежності φ від $\frac{2(D-b)}{D_c}$ для різних значень $\frac{G \cdot A}{a \cdot b}$ [1].

Тоді повна втрата тиску може бути розрахована із комбінації коефіцієнтів втрат:

$$\Delta p = \frac{\rho + \rho_s}{2g} \left\{ u_i^2 \left[2\varphi \frac{2(D-b)}{D_c} \right] + 2u_c^2 \right\} \quad (9)$$

Гідравлічний опір відцентрово-інерційних пиловловлювачів з жалюзійним відводом повітря може бути визначений двома способами:

а) за формулою

$$\Delta p = \xi \frac{\rho w^2}{2} \quad (10)$$

Значення ζ і w для цих пиловловлювачів приведені в [4]; поправочні коефіцієнти на діаметр, запиленість газів, компоновку для пиловловлювачів інших розмірів і інших умов роботи приймаються такими, як при розрахунку циклонів;

б) шляхом графічного розв'язку залежності $\Delta p = kQ^m$ у вигляді $\lg \Delta p = \lg k + m \lg Q$. Такі залежності для чотирьох різновидностей відцентрово-інерційних пиловловлювачів цього типу приведені там же [4].

За цими методиками розрахований гідравлічний опір батарейного циклона з жалюзійними елементами при тих параметрах (швидкості, витрати, розміри), при яких проводились його експериментальні дослідження.

Порівняння даних теоретичних розрахунків з результатами експериментальних досліджень дає можливість не тільки визначити придатність даних методик для розрахунку гідравлічного опору створеного апарата, але також провести їх порівняльну оцінку.

Розходження між експериментальними даними і розрахунками за методом [6] становить приблизно 100%, тобто розрахункові величини вдвічі більші за одержані при проведенні експериментів. Це розходження може бути зумовлене декількома причинами. Перш за все, неповним врахуванням при теоретичних розрахунках всіх факторів, що впливають на перепад тиску, особливо тих, що його зменшують. По друге, методика розрахунку розроблена для одиночних циклонів з тангенціальним входом газу, а вплив закручуючих апаратів в циклонних елементах батарейного циклона не такий значний. Третьою важливою причиною є те, що опір відцентрово-інерційного пиловловлювача з жалюзійним відводом повітря, який є прообразом застосованих циклонних елементів в створеному батарейному циклоні, нижчий за опір циклонів.

Ще більше розходження між результатами теоретичних розрахунків за методом [5] і експериментальними даними, а також в бік переважання розрахункових величин гідравлічного опору над дослідними. Причини тут також можуть бути такі ж, що вказані вище. Крім того, на наш погляд, в цій методиці втрати тиску в циклоні дуже деталізовані, що не завжди близьке до дійсності.

Найменше розходження між даними теоретичних розрахунків і даними експериментів є при застосуванні методики, запропонованої в [4]. Воно складає приблизно 1,5 раза. Це розходження в повній мірі може бути пояснене вказаними вище причинами, і саме ця методика може бути використана з внесенням певних поправок для розрахунку гідравлічного опору створеного батарейного циклона з жалюзійними елементами.

На рис.2. представлені результати експериментальних досліджень і результати теоретичних розрахунків гідравлічного опору батарейного циклона з трьома описаними вище методиками.

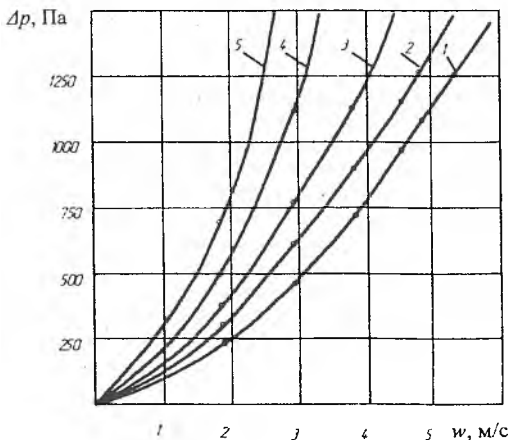


Рис.2. Гідравлічний опір батарейного циклона з жалюзійними елементами:

- 1 — з направляючим апаратом типу "гвинт" (експериментальні дані);
- 2 — з направляючим апаратом типу "розетка" (експериментальні дані);
- 3 — дані розрахунків за методикою (4);
- 4 — дані розрахунків за методикою (6);
- 5 — дані розрахунків за методикою (5).

Висновок

Порівняння результатів теоретичних розрахунків з результатами експериментальних досліджень гідравлічного опору створеного батарейного циклона з жалюзійними елементами дає можливість зробити висновки про придатність деяких з описаних методик для розрахунку опору даного апарата. Крім того, результати експериментальних досліджень свідчать про те, що гідравлічний опір його менший від опору батарейних циклонів інших конструкцій. Це підтверджує доцільність його створення і те, що процес очистки в ньому можна проводити з меншими затратами.

Suitability of known methods of calculation of hydraulic resistance of cyclone collectors for definition of resistance of the battery cyclone collector developed by authors with louvre units is estimated by comparing data of calculations behind these methods with results of the conducted experimental researches.

Література

1. Страус В. Промышленная очистка газов. Пер. с англ. – М.: Химия, 1981 – 616 с.
2. Батарейные циклоны. Руководящие указания по проектированию, изготовлению, монтажу и эксплуатации. – М.: Госхимиздат, 1955. – 104 с.
3. А.с. 598623 СССР, МКИ ВО4 С 7/15. Центробежно-инерционный пылеуловитель / Чернявский А.И., Батлук В.А., Куц В.П. (СССР). Заявл. 21.06.76. Опубл. 09.10.78. Бюл. №21.
4. Куц В.П. Повышение эффективности пылеулавливания в центробежно-инерционных пылеотделителях с жалюзийным отводом воздуха. - Дис. канд. техн. наук.:05.17.08. – Львов, 1986. –221 с.
5. Stairmand C.J. – Engineering, 168, 409 (1949).
6. Barth W. – Brennst. - Wärme – Kraft, 8,1 (1956).
7. Sherherd G.B., Lapple E.C. – Ind. Engng Chem., 31, 972 (1939).
8. ter Linden A.J. – Tonindustrie – Zeitung, 22 (III),49 (1953).
9. Weidner G. – Ver. Deut. Ing. Tagungsheft, 3,16 (1954).

Одержано 25.11.2002 р.