

**С.М. Сабадаш**, асп. (СНАУ, Суми)  
**А.Р. Якуба**, д-р техн. наук (СНАУ, Суми)

## **ЕФЕКТИВНІСТЬ КОНІЧНИХ ЦИКЛОНІВ**

*Розглянуто питання ефективності конічних циклонів. Проведено порівняння розрахунків з промисловими циклонами конічних циклонів типу СДК. Для зменшення похибок при розрахунках установлені коефіцієнти кореляції для теоретичного рівняння.*

*Рассмотрен вопрос эффективности конических циклонов. Проведены сравнения расчетов с промышленными циклонами конических циклонов типа СДК. Для уменьшения погрешностей при расчетах установлены коэффициенты корреляции для теоретического уравнения.*

*The question of efficiency of conical cyclones is considered. Comparisons of calculations are conducted with the industrial cyclones of conical cyclones as SDK. For diminishing of errors at calculations the coefficients of correlation are set for theoretical of equalization.*

**Постановка проблеми у загальному вигляді.** Конічні циклони мають найбільший опір, але їх ефективність відділення пилу від газу суттєво вища, ніж у циліндричних. Часто вони забезпечують належне очищення викидів, замінюючи більш складні в експлуатації мокрі пиловловлювачі [1].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Фракційну ефективність можна визначити у більшості випадків за емпіричними залежностями з використанням методів теорії подібності [1;2].

Теоретичний аналіз відносно конічних циклонів виконується рідко у зв'язку із складністю процесу. Використання для аналізу циліндричної системи координат приводить до складних і громіздких рівнянь. Використання сферичної системи координат [3;4] дещо спрощує аналіз, але точність рівнянь нижча.

**Мета та завдання статті.** У даній роботі зроблено спробу одержати рівняння розрахунку фракційної ефективності конічних циклонів у циліндричній системі. На рисунку схематично показано схему дії конічного апарата із заданими геометричними і технологічними параметрами.

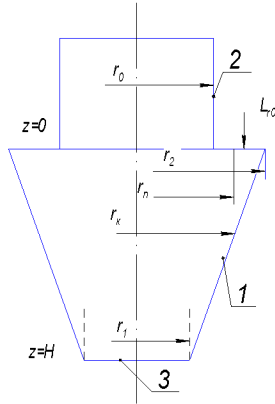


Рисунок – Схема конічного циклона: 1 – конічний корпус; 2 – вихід очищеного газу; 3 – отвір для пилу

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Газовий запилений потік з витратою  $L_{20}$  ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) після завихрювача рухається вниз біля корпусу 1. Зовнішня поверхня обертання приблизно дорівнює радіусу вихідної труби 2, потім зменшується до  $r_1$  і повертає вверх, після відокремлення твердих пилових частинок, які зсипаються через отвір 3 в бункер. Через нахил корпусу 1 газ входить у центральну зону поступово по всій висоті H.

Початковий радіус входження частинок у зону очищення позначений  $r_n$ . У середньому він дорівнює  $r_n = \frac{r_0 + r_2}{2}$ .

Відповідно середній радіус корпусу дорівнює  $r_k = \frac{r_1 + r_2}{2}$ .

Рівняння сил, діючих у закрученому потоці:

$$m \omega^2 r = 3\pi d \mu \left( \frac{dr}{dt} - V_r r \right), \quad (1)$$

де  $dr/dt$  – швидкість частинок пилу в напрямку радіуса  $r$  під дією відцентрової сили,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $m = \frac{1}{6} \pi d^3 \rho_T$  – маса частинки,  $\text{кг}$ ;  $\omega$  – кутова швидкість руху газу,  $1/\text{с}$ ;  $d$  – діаметр частинок,  $\text{м}$ ;  $\mu$  – в'язкість газу,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;  $V_r$  – радіальна швидкість переміщення газу,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $\rho$  – густина твердих частинок,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Радіальна швидкість руху  $V_r$  зв'язана з осьовою, яку можна визначити із витрат газу:

$$V_z = \frac{L_{20} \left(1 - \frac{z}{n}\right)}{\pi (r_k^2 - r_0^2)}. \quad (2)$$

Зв'язок між  $V_r$  та  $V_z$  визначається рівнянням нерозривності потоку [5]

$$\frac{\partial V_z}{\partial z} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial (rV_r)}{\partial r} = 0. \quad (3)$$

Радіальну швидкість частинки можна зв'язати з осьовою швидкістю газу  $V_z$ , яка більш визначена:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{dr}{dz / V_z} = V_z \left( \frac{dr}{dz} \right). \quad (4)$$

Після диференціювання (2) одержимо

$$\frac{\partial V_z}{\partial z} = - \frac{L_{20}}{\left(r_k^2 - r_0^2\right)H}. \quad (5)$$

Підставивши (5) у (3) одержимо

$$\frac{L_{20}}{\pi \left(r_k^2 - r_0^2\right)H} = \frac{1}{r} \frac{d(rV_r)}{dr}. \quad (6)$$

Після інтегрування одержимо:

$$rV_r = \frac{L_{20} \cdot r^2}{\pi \left(r_k^2 - r_0^2\right)2H} + C. \quad (7)$$

При  $r = r_k$ ;  $V_r = 0$

$$r \cdot 0 + \frac{L_{20} \cdot r_k^2}{2\pi \left(r_k^2 - r_0^2\right)} + C. \quad (8)$$

Із (8) отримаємо 
$$C = -\frac{L \cdot 20 \cdot r_k^2}{2\pi(r_k^2 - r_0^2)}. \quad (9)$$

Тоді із (7) визначаємо:

$$rVr = \frac{L \cdot 20 \cdot (r^2 - r_k^2)}{2\pi(r_k^2 - r_0^2)H \cdot r}. \quad (10)$$

$$Vr = \frac{L \cdot 20 \cdot (r^2 - r_k^2)}{2\pi(r_k^2 - r_0^2)H \cdot r}. \quad (11)$$

Підставивши в (1) всі значення одержимо:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{d^2 \omega \rho r}{18\mu} + Vr. \quad (12)$$

Після зміни  $dr/dt$  згідно з (4)

$$\frac{dr}{dt} Vr = \frac{d^2 \rho T \omega^2 r}{18\mu} + \frac{L \cdot 20 \cdot (r^2 - r_k^2)}{2\pi(r_k^2 - r_0^2)Hr}. \quad (13)$$

Підставимо в (13) значення  $Vz$  із (2), а також значення  $\omega$  із роботи

Н.А. Фукса [6]  $\omega = \frac{V_0}{2r} \sqrt{\frac{r_k}{r}}$ , де  $V_0$  – швидкість газу на вході в циклон

після проходження завихровувача.

Одержимо:

$$\frac{dr}{dz} = \frac{d^0 \rho T V_0^2 \cdot r_k \cdot \pi \cdot (r_k^2 - r_0^2)}{18 \cdot 4 \cdot \mu \cdot r^2 L \left(1 - \frac{z}{H}\right)} + \frac{r^2 - r_k^2}{2Hr \left(1 - \frac{z}{H}\right)}. \quad (14)$$

Зауважимо, що  $r_k = r_0 \cdot 2 - z \cdot \tan \alpha / 2$ , тоді:

$$\frac{dr}{dz} = r' = \frac{\pi \rho_r d^2 V_0^2 (r_2 - z \operatorname{tg} \alpha / 2) \left( r_2^2 - 2r_2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} + z^2 \operatorname{tg}^2 \alpha / 2 - r_0 \right)}{75 \mu L_{20} (H - Z)} H +$$

$$+ \frac{r}{2(H-r)} - \frac{r_2^2 - 2r_2^2 z \operatorname{tg} \alpha / 2 + z^2 \operatorname{tg}^2 \alpha / 2}{2(H-z)2}. \quad (15)$$

Для початку руху  $z=0$ ;  $r=r_n$ :

$$r'(z=0) = \frac{\pi \rho_T d^2 V_0^2 r_2 \left( r_2^2 - r_0^2 \right)}{72 \cdot \mu L_{20} r_n^2} + \frac{r_n}{2H} - \frac{r_2^2}{2Hr_n}. \quad (16)$$

Значення  $r$  можна подати у вигляді ряду Макларена [7]:

$$r = r_n + r'(0) \cdot z + \frac{r''}{2!} z^2 + \frac{r'''}{3!} z^3 \dots \quad (17)$$

У першому наближенні будемо враховувати тільки першу повільну  $r'(0)$ , бо інші ( $r''$  та  $r'''$ ) мало збільшують точність.

Проінтегруємо  $\int_{r_n}^{r_k} dr = r_k - r_n$  та визначимо також значення

ефективності уловлення частинок пилу в кінцічному циклоні:

$$\eta_{cp} = \frac{r_k - r_n}{r_k - r_0} = \frac{r_n + r'(0)z}{r_k - r_0}. \quad (18)$$

Розрахуємо середню ефективність для циклону СДК-ЦН-33 [1].

Параметри циклону:  $r_2 = 150 \text{ мм} = 0,15 \text{ м}$ ;

$$r_2^2 = 0,0225 \text{ м}^2; \quad r_0 = 0,055 \text{ м}; \quad r_1 = 0,05 \text{ м}; \quad H_k = 0,9 \text{ м};$$

$$\rho_T = 2670 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \quad L_{20} = 500 \text{ м}^3 / \text{год}; \quad V_0 = 11 \text{ м/с}.$$

Необхідні параметри розрахуємо:

$$r_n = \frac{r_0 + r_2}{2} = \frac{0,055 + 0,15}{2} = 0,1025 \text{ м};$$

$$r_k = r_{cp} = \frac{r_1 + r_2}{2} = \frac{0,05 + 0,15}{2} = 0,1 \text{ м};$$

$$r^l(0) = \frac{d^2 \cdot 3,14 \cdot 2670 \cdot 11^2 \cdot 0,15 \cdot 0,0195 \cdot 3600}{72 \cdot 0,018 \cdot 10^{-3} \cdot 50 \cdot 0,0105} + \frac{0,1025}{2 \cdot 0,9} -$$

$$- \frac{0,0225}{2 \cdot 0,9 \cdot 0,1025} = d^2 \cdot 1,57 \cdot 10^9 - 0,065.$$

$$\eta_{cp} = \frac{d^2(1,57 \cdot 10^9 - 0,065)H}{r_k - r_0} = d^2 \cdot 3,49 \cdot 10^{10} - 1,3. \quad (20)$$

У таблиці 1 наведено теоретичні значення ефективності порівняно з експериментально-практичними даними НДіОГАЗ [1].

**Таблиця 1– Порівняння ефективності  $\eta_{cp}$  уловлення частинок, розраховане теоретично (20) та експериментально**

d, мкм	1,6	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0
$\eta$ , за теорією, %	-121,0	-116,0	-99,6	-74,2	-42,75	-4,36	+41,0	+93,4	+152,7
$\eta$ , з експерименту, %	+55,0	+65,0	+77,0	+85,0	+90,0	+92,0	+94,0	+95,5	+96,5

Для приведення теоретичних розрахунків відповідно до експериментальних даних були установлені коефіцієнти кореляції  $K_1$  та  $K_2$ .

Розраховувались ( $K$ ) для двох діапазонів діаметрів:  $5 \text{ мкм} > d > 1 \text{ мкм}$  та  $9 \text{ мкм} > d > 5 \text{ мкм}$ .

Середнє значення коефіцієнтів кореляції для I-го діапазону:  $K_1=0,938$ ;  $K_2=-0,389$ .

Для II-го діапазону:  $K_1=+0,03$ ;  $K_2=-0,684$ .

Розрахунки ефективності за напівемпіричними рівняннями, з урахуванням коефіцієнтів кореляції, за рівнянням:

$$\eta = K_1 \cdot d^2 \cdot 3,49 \cdot 10^{-10} - 1,3 \cdot K_2. \quad (21)$$

Наступне співвідношення з експериментом циклона СДК-ЦН-33 (табл. 2).

**Таблиця 2 – Порівняння ефективності  $\eta_{cp}$  уловлення частинок за напівемпіричним рівнянням (21) з експериментом**

<b>d, мкм</b>	<b>1,6</b>	<b>2,0</b>	<b>3,0</b>	<b>4,0</b>	<b>5,0</b>	<b>6,0</b>	<b>7,0</b>	<b>8,0</b>	<b>9,0</b>
$\eta_{cp}$ теоретичне, %	59,09	63,8	80,2	109,5	132,7	32,68	94,05	95,62	97,4
$\eta_{cp}$ експериментальне, %	55,0	65,0	77,0	85,0	90,0	92,0	94,0	95,5	96,5
Середня похибка розрахунків, Δ%	7,43	-	4,2	28,8	47,4	0,75	0,054	0,13	0,93

**Висновки.** Одержані теоретичні рівняння для розрахунку фракційної ефективності конічних циклонів. Проведені порівняння розрахунків з промисловими циклонами конічного типу СДК. Для зменшення похибок при розрахунках установлені коефіцієнти кореляції для теоретичного рівняння. Їх використання дозволило проводити розрахунки з середньою похибкою  $\pm 10\%$ .

#### *Список літератури*

1. Фукс, Н. А. Механіка аерозолів [Текст] / Н. А. Фукс. – М. : АНСССР, 1955. – 349 с.
2. Якуба, А. Р. Фракционная эффективность конических циклонов [Текст] / А. Р. Якуба, С. В. Федоренко, В. М. Голубев // Прикладная химия. – Л., ВИНТИ, Деп. 2056, №1488. – С. 6.
3. Якуба, А. Р. Фракционная эффективность конических циклонов с закрученными потоками [Текст] / А. Р. Якуба // Сборник научных трудов Министерства образования Украины, Сум ГУ. – 1994. – С. 269 – 280.
4. Якуба, А. Р. Структура потоков в конических вихревых аппаратах [Текст] / А. Р. Якуба // Химическое машиностроение. – К.: УммВО, 1992. – С. 53 – 67.

Отримано 30.09.2009. ХДУХТ, Харків.  
© С.М. Сабадаш А.Р. Якуба, 2009.