

УДК 621.928.37

## УДОСКОНАЛЕННЯ МОДЕЛЕЙ РОЗРАХУНКУ ФРАКЦІЙНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОТИТЕЧНИХ ПИЛОВЛОВЛЮВАЧІВ ДЛЯ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ

Савченко-Перерва М.Ю., аспірант\*,  
Якуба О.Р., д.т.н.  
Сумський національний аграрний університет  
Тел.(0542) 62-78-30

**Анотація** – дану роботу присвячено розробці рівнянь для удосконалення моделей розрахунку фракційної ефективності протитечних пиловловлювачів для харчових виробництв.

**Ключові слова** – вдосконалення моделей, протитечні апарати-циклони, аналіз рівнянь, ефективність, запилений газ.

*Постановка проблеми.* Основним перетином моделювання фракційної ефективності є необхідність інтегрування складних функцій з розкладенням у ряди [1]. Вибір необхідної кількості членів розкладу в ряд дає об'єктивні показники [2].

*Аналіз останніх досліджень.* У даній роботі зроблено аналіз одержаних раніше розрахункових рівнянь та зроблені зусилля їх спрощення і підвищення ефективності при прогнозуванні ефективності експлуатації устаткування, що виготовляється для харчових продуктів.

*Постановка завдання.* Задачею вдосконалення моделей розрахунку фракційної ефективності протитечних апаратів – циклонів є підвищення об'єктивності отриманих результатів, спрощення самих залежностей, які іноді дуже об'ємні і не дають об'єктивних показників [2].

*Основна частина.* Принципова схема протитечних циклонних пило- та каплевловлювачів приведена на рис. 1 [3]. Запилений газ потрапляє через тангенціальний завихровувач та рухається між корпусом 1 та вихлопною трубою 2. Газ спускається до бункера 3, а потім повертає і рухається догори в привісній частині у вихідну трубу 2. Тверді частинки під дією відцентрових сил відокремлюються від газу і осідають на стінках циклону, а далі зсипаються у бункер 3. При побудові розрахункових залежностей фракційної ефективності будемо рахувати за височину зони сепарації відстань від вихідної труби до бункера Н. Інші параметри приведені на рис. 1.

---

© Савченко-Перерва М.Ю., аспірант, Якуба О.Р., д.т.н., професор

\* Науковий керівник – д.т.н., професор Якуба О.Р.

На частинки в закрученому потоці діють відцентрові сили  $m\omega^2 r$ , їм протидіють сили опору газу. Для ламінарного режиму обтікання ( $Re < 2$ ) сила опору згідно закону Стокса складає  $F_c = 3\pi d\mu v_r$  [4]. У циклонах ефект опору підсилюється наявністю радіального стоку [5], який здійснює частина вторинного потоку ( $L_{20}$ ), яка переходить у первинний поступово змішуючись з ним. Друга частина потоку ( $L_{10}$ ) рухається до самого низу без змішування [6]. Він після повороту стає основою для формування привісського висхідного потоку.

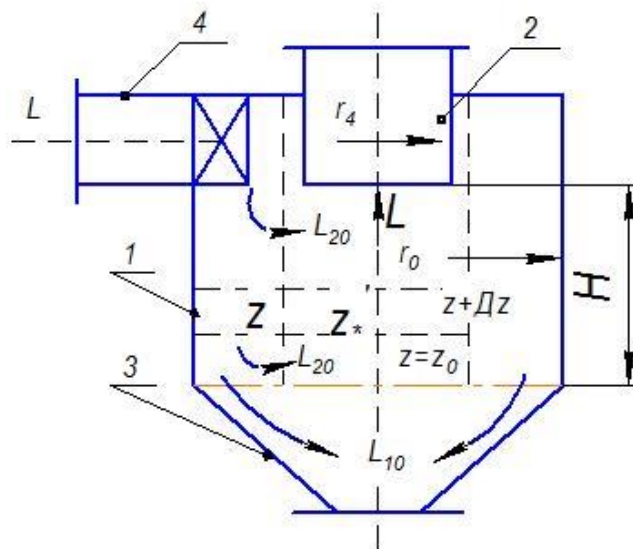


Рис. 1. Схема потоків протитечного циклона:

1 – корпус; 2 – вихідна труба; 4 – конічна частина для розвантаження пилю; 4 – вхідний завихрювач запиленого газу;  $L_1$  – приосьовий потік;  $L_2$  – пристінний потік.

Рівність прикладених до частинок сил виразиться законом Ньютона [4]

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

Для зовнішнього опору:

$$L_{20} = K_\varepsilon L_3; \quad L_{10} = (1 - K_\varepsilon) L_3 \quad \text{та} \quad K_{\varepsilon \text{ cp}} = 0,35.$$

Радіальна швидкість визначається на межі розділу потоків у просторі між стінкою і поверхнею розділу

$$V_{r^*} = -\frac{L_{20}}{2\pi r^* H}; \quad (2)$$

$$V_{r2} = \frac{L_{20}(r^2 - r_0^2)}{2\pi H(r_0^2 - r_*^2)r^2}.$$

Із рівняння (1)

$$\frac{dr}{dt} = \frac{m\omega^2 r}{3\pi d\mu} + V_r. \quad (3)$$

Осьова швидкість у периферії

$$V_{z2} = -\frac{L_2 - L_{20} \frac{z}{H}}{\pi(r_0^2 - r_*^2)}. \quad (4)$$

Встановимо зв'язок між параметрами

$$dt = \frac{dz}{V_z}; \quad \frac{dr}{dt} = V_z \frac{dr}{dz}. \quad (5)$$

Підстановка параметрів в (3)

$$V_z \frac{dr}{dz} = \frac{d^2 \rho_T \omega^2 r}{18\mu} + \frac{L_{20}(r^2 - r_0^2)}{2\pi H(r_0^2 - r_*^2)r}, \quad (6)$$

де  $\rho_T$  - густина частинок.

Підстановка значень  $V_z$  та  $\omega$  для зовнішнього шару

$$\omega_2 = \omega_1(z) \frac{r_*^2}{r^2} = C_0 \frac{L_{10} + \frac{L_{20}}{H} z}{L_3} \frac{r_*^2}{r^2}. \quad (7)$$

для внутрішнього шару

$$\omega_0 = \frac{C_0 r_*^2 L_{10}}{(L_{10} + L_{20})}; \quad \omega_1 = \omega_0 \left(1 + \frac{L_{10}}{L_{20}} \frac{z}{H}\right). \quad (8)$$

$$V_z \frac{dr}{dz} = d^2 \frac{\rho_T C_0^2 \left[ L_{10} + \frac{L_{20}}{H} z \right]^2 \frac{r_*^4}{r^3}}{18\mu \cdot L_3^2} + \frac{L_{20}(r^2 - r_0^2)}{2\pi H(r_0^2 - r_*^2)r}; \quad (9)$$

$$\frac{V_z}{dz} = d^2 = \frac{\rho_0 c_0^2 (L_{10} + \frac{l_{20}}{H} z)^2 \frac{r_*^4}{r^3}}{18\mu \cdot L_3^2 dr} + \frac{l_{20}(r^2 - r_0^2)}{2\pi H (r_0^2 - r_*^2) r dr}. \quad (10)$$

Інтеграція рівнянь для зовнішнього шару:

$$\int \frac{dV_{z2}}{dz} = \int_0^H \frac{L_3 - L_{20} \frac{z}{H}}{\pi(r_0^2 - r_*^2) dz} = \int_0^H \frac{L_3}{\pi(r_0^2 - r_*^2) dz} - \int_0^H \frac{l_{20} \frac{z}{H}}{\pi(r_0^2 - r_*^2) dz} = \frac{L_3}{\pi(r_0^2 - r_*^2)} - \frac{\frac{L_{20}}{H}}{\pi(r_0^2 - r_*^2) \frac{dz}{z}} = \frac{L_3}{\pi(r_0^2 - r_*^2) H} - \frac{\frac{L_{20}}{H}}{\pi(r_0^2 - r_*^2) \cdot \ln z} \Big|_0^H; \quad (11)$$

$$\ln z = (H-1) = \frac{(x-1)^2}{2} + \frac{(x-1)^3}{3} - \frac{(x-1)^4}{4}. \quad (12)$$

Позначимо  $\ln z = f(H)$ , тоді

$$\int \frac{dV_{z2}}{dz} = \frac{L_3}{\pi(r_0^2 - r_*^2) H} - \frac{L_{20}}{\pi H (r_0^2 - r_*^2)} \left[ (H-1) = \frac{(H-1)^2}{2} + \frac{(H-1)^3}{3} - \frac{(H-1)^4}{4} \right]. \quad (13)$$

Підстановка  $V_{z2}$  та інтеграція лівої частини

$$\int_0^H \frac{L_3 - L_{20} \frac{z}{H}}{\pi(r_0^2 - r_*^2)} = \int_0^H \frac{L_3 - L_3 \cdot K_\Sigma \frac{z}{H}}{\pi(r_0^2 - r_*^2)} = \frac{L_3}{\pi(r_0^2 - r_*^2)} - \frac{L_3 K_\Sigma}{\pi H (r_0^2 - r_*^2) \ln z}; \quad (14)$$

Результат інтеграції лівої частини:

$$\frac{L_3}{\pi(r_0^2 - r_*^2)} - \frac{L_3 K_\Sigma}{\pi H (r_0^2 - r_*^2) f(z)} = \int \frac{dV_{z2}}{dz}. \quad (15)$$

Інтеграція правої частини рівняння:

$$\int d^2 \frac{\rho + C_0^2 \left[ L_{10} + \frac{L_{20}}{H} (H_{cp}) \right]^2}{18\mu L_3^2 dr \cdot r^3} = d^2 \frac{2\rho_T C_0^2 \left[ L_{10} + \frac{L_{20}}{z} \right]^2 r_*^4}{\rho \mu L_3^2 (r_0^4 - r_{cp}^4)}; \quad (16)$$

$$H_{cp} = \frac{H}{2};$$

$$\int_{r_{cp}}^{r_0} \frac{L_{20}(r^2 - r_0^2)}{2\pi H[r_0^2 - r_*^2] \cdot r} = \int_{r_{cp}}^{r_0} \frac{L_{20} \cdot r}{2\pi H(r_0^2 - r_*^2) dr} - \int_{r_{cp}}^{r_0} \frac{L_{20} r_0^2}{2\pi H(r_0^2 - r_*^2) r dr}; \quad (17)$$

$$\int_{r_{cp}}^{r_0} \frac{L_{20} r}{2\pi H(r_0^2 - r_*^2) dr} = \int_{r_{cp}}^{r_0} \frac{L_{20}}{2\pi H(r_0^2 - r_*^2) \frac{dr}{r}} = \int_{r_{cp}}^{r_0} \frac{L_{20}}{2\pi H(r_0^2 - r_*^2) \ln r} = \frac{L_{20}}{2\pi H(r_0^2 - r_*^2) f(r)}, \quad (18)$$

$$f(r) = \left[ (r_{cp} - 1) - \frac{(r_{cp} - 1)^2}{2} + \frac{(r_{cp} - 1)^3}{3} - \frac{(r_{cp} - 1)^4}{4} \right] - \int_{r_{cp}}^{r_0} \frac{L_{20} r_0^2}{2\pi H[r_0^2 - r_*^2]} r dr =$$

$$= - \frac{L_{20} r_0^2}{2\pi H[r_0^2 - r_*^2] [r_0^2 - r_{cp}^2]}. \quad (19)$$

Підстановка результатів інтеграції у (13)

$$\frac{L_3}{\pi(r_0^2 - r_*^2)H} - \left[ 1 - \frac{K_\Sigma}{f(H)} \right] = d^2 \frac{2\rho_T C_0^2 \left[ L_{10} + \frac{L_{20}}{2} \right] r_*^4}{9\mu L_3^2 (r_0^4 - r_{cp}^4)} + \frac{L_{20}}{2\pi H(r_0^2 - r_*^2) f(r)} -$$

$$- \frac{L_{20} r_0^2}{\pi H(r_0^2 - r_*^2) (r_0^2 - r_{cp}^2)}. \quad (20)$$

Перетворення (20) до виду

$$\frac{r_0 - r_{cp}}{r_0 - r_*} = d^2 \frac{2\rho_T C_0^2 \left[ L_{10} + \frac{L_{20}}{2} \right] r_*^4 \pi H(r_0 + r_*)}{\rho\mu L_3^2 (r_0 + r_{cp}) (r_0 + r_{cp}^2) f(H)} + \frac{K_\Sigma (r_0 + r_*) (r_0 - r_{cp})}{2(r_0^2 - r_*^2) \cdot f(r_0 - r_{cp})} +$$

$$+ \frac{K_\Sigma r_0^2}{(r_0^2 - r_*^2) \cdot f(H)} = \eta_{cp2}, \quad (21)$$

де  $\frac{r_0 - r_{cp}}{r_0 - r_*}$  – являє собою геометричну ймовірність уловлення

частинок, які потрапляють на орбіту з радіусом  $r = r_{cp}$ , тобто, середню фракційну ефективність у зовнішньому шарі  $\eta_{cp2}$ .

Для внутрішнього шару.

У внутрішньому шарі діють сили аналогічно зовнішньому шару

(1). Складові для внутрішнього шару аналогічні також:

$$\omega_1(z) = C_0 \left[ \frac{L_{10} + \frac{L_{20}}{H} z}{L_3} \right]; \quad \omega = \omega_1(z); \quad (22)$$

$$V_{z1} = \frac{L_{10} + \frac{L_{20}}{H} z}{\pi r_*^2}; \quad V_{r1} = -\frac{L_{20} r}{2\pi H r_*}. \quad (23)$$

Підстановка (23) в (1)

$$\frac{dr}{dt} = \frac{m\omega^2 r}{3\pi d\mu} + V_r. \quad (24)$$

З урахуванням (5):

$$V_z \frac{dr}{dz} = \frac{1/6 \pi d^3 \rho_T \omega_1^2(z) r}{3\pi d\mu} - \frac{L_{20} r}{2\pi H r_*}; \quad (25)$$

$$\frac{L_{10} + \frac{L_{20}}{H} z}{\pi r_*^2} \frac{dr}{dz} = d^2 \rho_T C_0^2 \frac{\left( L_{10} + \frac{L_{20}}{H} z \right)^2 r}{L_3^2} - \frac{L_{20} r}{2\pi H r_*^2}. \quad (26)$$

Відокремлення змінних

$$\frac{dr}{r} = \pi r_*^2 C_0^2 \frac{d^2 \rho_\delta \left[ L_{10} + \frac{L_{20}}{H} z \right]^2 dz}{18\mu L_3^2} - \frac{L_{20} dz}{2H \left[ L_{10} + \frac{L_{20}}{H} z \right]}. \quad (27)$$

Інтеграція складових

$$\int_r^{r_*} \frac{dr}{r} = \ln \frac{r_*}{r} = \ln \frac{1}{1-\eta}, \quad (28)$$

де  $\frac{r_* - r}{r_*} = \eta$  – геометрична ймовірність уловлення частинок, які

потрапили на орбіту з радіусом  $r$ .

$$1 - \frac{r}{r_*} = \eta; \quad \frac{r}{r_*} = 1 - \eta; \quad \frac{r_*}{r} = \frac{1}{1 - \eta}; \quad (29)$$

$$\int_0^H \left( L_{10} + \frac{L_{20}}{H} z \right) dz = L_{10} z + \frac{L_{20}}{H} \frac{z^2}{2} \Big|_0^H = L_{10} H + \frac{L_{20}}{H} \frac{H^2}{2} = H \left( L_{10} + \frac{L_{20}}{2} \right); \quad (30)$$

$$\begin{aligned} \int_0^H \frac{dz}{\left( L_{10} + \frac{L_{20}}{H} z \right) \frac{L_{20}}{H}} &= \frac{1}{\frac{L_{20}}{H}} \ln \left[ L_{10} + \frac{L_{20}}{H} z \right] \Big|_0^H = \frac{H}{L_{20}} [\ln(L_{10} + L_{20}) - \ln L_{20}] = \\ &= \frac{H}{L_{20}} \ln \frac{L_{10} + L_{20}}{L_{10}}; \end{aligned} \quad (31)$$

$$\ln \frac{1}{1-\eta} = d^2 \frac{\pi \rho_T r_*^2 C_0^2 H \left( L_{10} + \frac{L_{20}}{2} \right)}{18 \mu L_3^2} - \frac{L_{20}}{2H} \frac{H}{L_{20}} \ln \frac{L_{10} + L_{20}}{L_{10}}. \quad (32)$$

Визначимо через  $A$

$$\ln \frac{1}{1-\eta} = A; \quad \eta = \frac{\exp A - 1}{\exp A}, \quad (33)$$

$$\text{де} \quad A = d^2 \frac{\pi \rho_T r_*^2 C_0^2 H \left( L_{10} + \frac{L_{20}}{2} \right)}{18 \mu L_3^2} - \frac{1}{2} \ln \frac{L_{10} + L_{20}}{L_{10}}. \quad (34)$$

Де аналогічно відношення  $\frac{r_* - r}{r_*}$  – є геометричною ймовірністю уловлення частинок, які потрапили на орбіту з радіусом  $r$ , а при  $r = r_{cp}$  будемо мати середню фракційну ефективність.

*Висновки.* Проведені розрахунки показують об'єктивність отриманих рівнянь, але вони дещо завищені порівняно з проведеними промисловими експериментами, приведеними в [5]. Тому при проектуванні промислових апаратів слід використати моделюючі коефіцієнти.

Література:

1. *Бронштейн И.П.* Основним перетином моделювання фракційної ефективності є необхідність інтегрування складних функцій з розкладенням в ряди / *И.П. Бронштейн, К.А. Семендяев // Справочник по математике. – Изд. М.: Наука. – 1981. – С.720.*

2. Якуба О.Р. Вибір необхідної кількості членів розкладу в ряд дає об'єктивні показники є необхідність інтегрування складних функцій з розкладенням в ряди / О.Р. Якуба, С.О. Тимчук, Р.В. Галіч // Розрахунок ефективності пило- та каплеуловлювачів очищення газів компресорних станцій. – Вісник СНАУ, серія КВ, вип. 10, Суми. – 2003. – С.277-282.

3. Страус В. Принципова схема протитечних циклонних пило- та капле уловлювачів приведена на рис. 1 / В. Страус // Промышленная очистка газов. – Изд. М.: Химия. – 1981. – С.616.

4. Ciliberti D.F., Для ламінарного режиму обтікання сила опору згідно закону Стокса складає  $F_c = 3\pi d\mu v_r$  / D.F. Ciliberti, B.W. Lancaster // Performance of rotary flow cyclones. – Alche Journal, vol. 22. – 1976. – P. 394-399.

5. Пирумов А.И. В циклонах ефект опору підсилюється наявністю радіального стоку / А.И. Пирумов // Обеспыливание воздуха. – Изд. М.: Стройиздат. – 1980. – С.296.

6. Белоусов А.С. Друга частина потоку рухається до самого низу без змішування / А.С. Белоусов // Структура встречных закрученных потоков и расчёт эффективности центробежного разделения газозвесей. // Дисс. канд. техн. наук. – Изд. М.: МТИ. – 1996. – С.267.

## УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ РАСЧЕТА ФРАКЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОТИТЕЧНЫХ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЕЙ

Савченко-Перерва М.Ю., Якуба А.Р

**Аннотация** - данная работа посвящена разработке уравнений для усовершенствования моделей расчета фракционной эффективности противоточных пылеуловителей для пищевых производств.

## IMPROVEMENT OF MODELS OF CALCULATION OF FRACTIONAL EFFICIENCY OF CYLINDRIC COUNTER-CURRENT DUST EXTRACTOR-CYCLONE

M. Savchenko-Pererva, A. Yakuba

### *Summary*

**Hired sanctified to development of equalizations for the improvement of models of calculation of fractional efficiency of cylindric counter-current dust extractor-cyclone for food productions.**