

DOI: 10.15587/2312-8372.2017.112782

## ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ВИХРОВИХ КАМЕР

Пітак І. В., Шапорев В. П., Брянкін С. С., Пітак О. Я.

### 1. Вступ

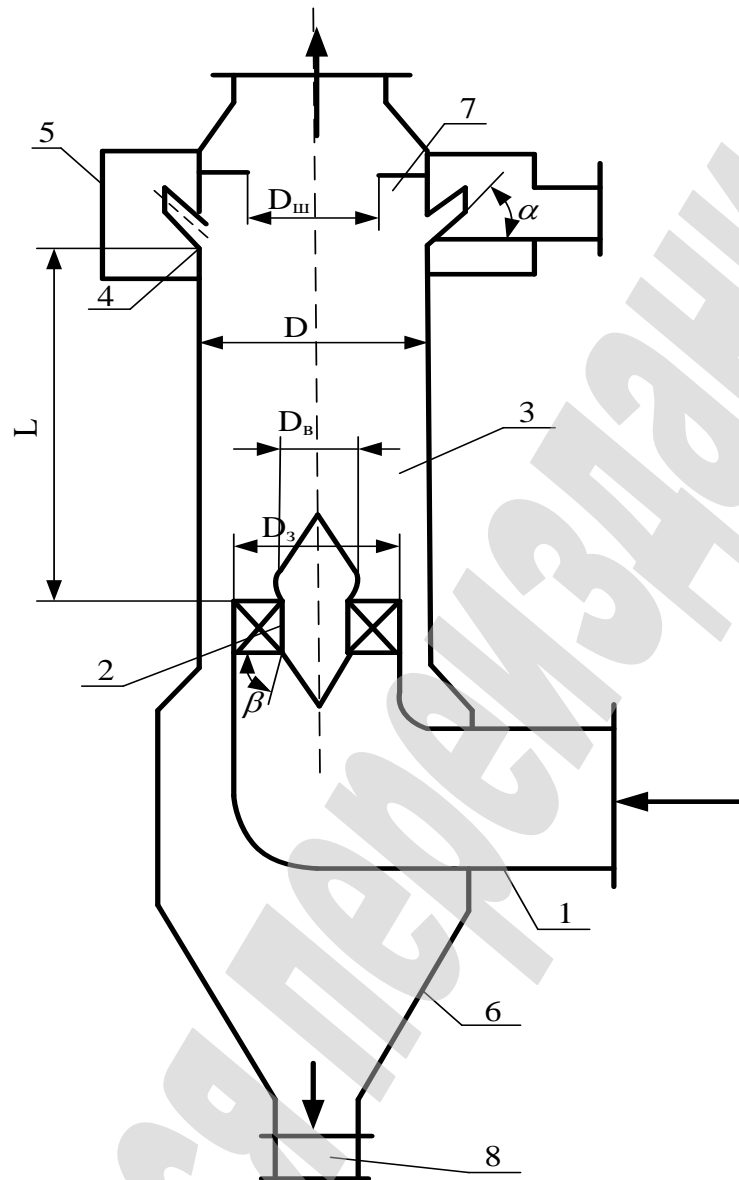
Однією з найактуальніших проблем, яка постає сьогодні перед промисловістю, є вдосконалення техніки і технології захисту навколишнього середовища в цілому, і, зокрема, зменшення запиленості атмосферного повітря і доведення у вихлопних газах концентрації аерозолів до допустимих норм. Як правило, при вловленні пиловидних продуктів однією з основних технологічних стадій є стадія «сухого» вловлення пилу, яка реалізується у різних по конструкції апаратах. Сучасні методи очистки повітря від пилу базуються на використанні апаратів, в яких гідродинамічні умови пов'язані з використанням закручених вихрових потоків [1, 2]. Цей напрямок розрахунку та обґрунтування конструктивно-режимних параметрів пиловловлювачів, з метою підвищення ефективності знепилення газів, вважається найбільш сучасним і перспективним [1, 2] та притаманний практично для всіх галузей промисловості: хімічної, металургійної, будівельної, харчової та інших.

### 2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єктом дослідження є пиловловлювачі. Ці апарати, в яких реалізуються вищезазначені гідродинамічні режими, прийнято відносити до вихрових апаратів.

Загальний вид вихрового пиловловлювача у виді вихрової камери наведено на рис. 1.

Знепилений вихлопний газ подається у вхідний патрубок (1), проходить крізь лопатево-подібний завихрювач (2), далі поступає в порожнину апарату (3). На зустріч закрученому потоку, що рухається в порожнині 3 подається вторинний потік газу через розподільний короб (5) і сопла (4). Цими соплами він закручується в протилежну сторону від закрутки основного потоку, який виходить крізь завихрювач (2). В результаті руху і обертання потоків пил концентрується у виді шару близько зовнішніх стінок циліндричного апарату (3) і щільним шаром стікає в бункер (6), а потім крізь пиловий затвор (8) виводиться з апарату. Очищений від пилу газу рухається в центральній частині в зоні вісі і через шайбу відводиться з апарату.



**Рис. 1.** Загальний вид вихрової камери для уловлювання пилу:

1 – вхідний патрубок; 2 – лопатево-подібний завіхрювач; 3 – корпус апарату;  
 4 – сопла для подачі вторинного потоку; 5 – розподільний короб вторинного потоку; 6 – бункер; 7 – шайба; 8 – пиловий затвор

Переваги використання вихрових апаратів: робота з газами високої температури, високий ступінь очищення; регулювання процесу очищення газу від пилу за рахунок регулювання витрати вторинного повітря. Серед недоліків вихрових пиловловлювачів слід виділити: високий гідравлічний опір, необхідність в потужному тягодуттєвому пристрої, а також складну експлуатацію і установку.

### 3. Мета і задачі дослідження

*Мета дослідження* – обґрунтування методів розрахунку основних параметрів вихрових камер.

Для досягнення вказаної мети необхідно:

1. Розглянути математичні залежності щодо умов процесу сухого очищення газового потоку від пилу.

2. Провести прогнозуючі оцінки для вибору умов процесу сухого очищення газу від пилу.
3. Вибрати конструктивні параметри вихрової камери.
4. Визначити швидкість руху частинок пилу у вихровому потоці, а також основні співвідношення конструктивних розмірів у вихровій камері.

#### 4. Дослідження існуючих рішень проблеми

Теоретичні основи руху закручених потоків в'язкого газу в трубах і криволінійних каналах, перенос енергії у адиабатних течіях газу, для однорідних і для дисперсійних потоків газу, фундаментально обґрунтовано в роботах [3–5]. Згідно цих робіт, раціональна організація того чи іншого закрученого потоку залежить від функції  $\alpha$ , яка визначається співвідношенням:

$$\alpha = \frac{C_{\theta} r}{C_M R}, \quad (1)$$

де  $C_{\theta}$  – окружна швидкість;  $r$  – поточне значення радіусу;  $C_M$  – максимальна швидкість витікання у пустоту;  $R$  – зовнішній радіус каналу.

Це так званий «закон закрутки» соплового або направляючого пристрою при вводі газового потоку у вихровий апарат.

Вказані пристрої для закрутки потоку мають різну конструкцію і в залежності від витрат газу, тиску, та фізико-хімічних властивостей газового потоку на вході в апарат очищення створюють у ньому той чи інший гідродинамічний режим. Так відомі методи закрутки потоку пов'язані:

- з тангенціальним вводом потоку (тангенціальні сопла, равликіві завихрювачі);
- з установкою кілець, що закручують (з тангенціальними прорізами, круглими тангенціальними отворами та тангенціальними соплами);
- лопатево-подібний завихрювач (різні кути напрями лопаток);
- закрутка потоку за рахунок схрещення електричних та магнітних полів.

Згідно вказаних методів закрутки потоку на вході в пиловловлювальні вихрові апарати можна класифікувати як циклони, вихрові труби, вихрові камери, газові центрифуги та інше. Якщо при вводі газового потоку у завихрювач (направляючий пристрій) і в самому апараті рух потоку проходить при числах  $Re$  більше  $10^6$  (вхідна швидкість потоку більше 50 м/с). Після цього, зразу за торцем пристрою і навколо декількох калібрів за ним виникають торо подібні вихори Хілла, та інші вихрові структури (наприклад, вихори Гертлера) [6, 7]. Цей гідродинамічний режим забезпечує інтенсивну дисипацію механічної енергії потоку, внутрішнє тепловиділення і нерівномірний розподіл температури гальмування і як наслідок виникає ефект Ранка. Як правило, описаний режим виникає в таких апаратах як вихрова труба та газова центрифуга. В інших апаратах таких, як циклони та вихрові камери умовна швидкість руху основного газового потоку в робочій порожнині пиловловлювача складає менше  $10 \div 20$  м/с. Останні апарати широко використовуються для вловлювання пилових продуктів в промисловості, що виносяться з печей, сушарок, продуктів, які транспортуються пневмотранспортом,

золи та пил з димових газів котельних установок та інше [8]. Розрахунок і вибір конструкції таких апаратів пов'язаний з необхідністю попереднього визначення радіальної швидкості частинок пилу даного дисперсного складу, швидкостей витікання потоку з каналів лопатево-подібних завихрювачів, швидкості витікання вторинного потоку з сопел та інше. Як відмічається в [9–11] теорія роботи цих апаратів ще не вдосконалена і не дає можливості розраховувати апарати різних конструкцій. До цього часу тільки емпіричним шляхом вирішується питання про найвигідніші конструктивні форми пиловловлювальних апаратів.

## 5. Методи дослідження

При конструюванні вихрових камер необхідно додержуватися наступних конструктивних параметрів (рис. 1):  $L/D \approx 2,5 \div 3,5$ ;  $D_3/D \approx 0,8$ ;  $D_B/D_3 \approx 0,5$ ;  $D_{ш}/D \approx 0,5 \div 0,8$ ; кут нахилу лопаток завихрювача на вході головного потоку  $\beta \approx 30 \div 60^\circ$ ; кут нахилу сопел вторинного потоку  $\alpha \approx 30 \div 45^\circ$ . Вказані вище співвідношення базуються на аналізі результатів досліджень [10–12], в яких розглянуті моделі закручених дисперсних колових потоків у гладкій циліндричній трубі з завихрювачем, чисельне дослідження моделей, експериментально досліджено змішування протилежно закручених потоків та інше.

ККД вихрової камери визначається з умов рівності часу дрейфу аерозолі від вісі камери до її стінок і часу перебування газу в апараті, тобто:

$$\frac{D-l}{2\overline{V}_r} = \frac{L}{\overline{W}_0}, \quad (2)$$

де  $L$  – діаметр умовного газового циліндра (м), в якому зосереджений весь не вловлений в апараті пил, при цьому фізико-хімічні параметри газу і концентрація пилу відповідає початковим.

Для розрахунків  $\overline{W}_0$  можна приймати як умовну швидкість руху основного газового потоку в робочій частині камери, при цьому, як свідчать практичні дослідження [8, 12]  $7 \leq \overline{W}_0 < 15$ , м/с, а  $\overline{W}_0$  визначається співвідношенням:

$$\overline{W}_0 \approx \frac{4Q_1}{\pi D^2}, \quad (3)$$

де  $Q_1$  – об'єм очищеного газу, м<sup>3</sup>/год.

Тоді ККД, який дорівнює відношенню вловленого пилу до всього пилу, що поступає в апарат буде дорівнювати:

$$\eta = 1 - \left(\frac{l}{D}\right)^2, \text{ або } \eta = \frac{2L\overline{W}_0}{D\overline{W}_0} \left(2 - \frac{2L\overline{V}_r}{D\overline{W}_0}\right). \quad (4)$$

Це доводить, що ця функція має екстремум (максимальне значення ККД,

що дорівнює одиниці) при  $\frac{2L\bar{V}_r}{DW_0} = 1$ .

## 6. Результати дослідження

При теоретичному аналізі руху часток аерозолі в робочій порожнині апарату необхідно визначення реальної швидкості часток пилу даного дисперсного складу  $\bar{V}_r$ . Для цього розглянемо рівняння руху часток пилу з постійним приведеним діаметром  $d$  і масою  $m$  у радіальному напрямку. В даному напрямку на частинку пилу діють: відцентрована сила, сила тиску та аеродинамічного опору (у випадку використання електровихрового апарату виникає додаткова електрична сила, що збільшує радіальну швидкість часток). У відповідності з другим законом Ньютона рівняння руху приймає вигляд:

$$m_{\Pi} \cdot \frac{dV_r}{d\tau} = m_{\Pi} \cdot \frac{\theta^2 V_r^2}{r} - \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{\partial P}{\partial r} dr - C_x \cdot \frac{\pi d^2}{4} \rho \cdot \frac{(V_r - V_R)^2}{2} + A_3 d^2, \quad (5)$$

де  $A_3 = \varepsilon_0 \cdot \delta \cdot E_3 \cdot E_0$ ;  $E_3$ ,  $E_0$  – напруга електричного поля зон зарядки і осадження відповідно, в/м;

$\varepsilon_0$  – діелектрична проникливість вакууму, Ф/м;

$\delta$  – діелектрична константа пилу;

$\rho$  – густина газу, кг/м<sup>3</sup>;

$P$  – тиск газового потоку, Па;

$C_x$  – коефіцієнт аеродинамічного опору;

$\theta$  – коефіцієнт ковзання аерозолі відносно газового потоку у радіальному напрямку;

$V_r$  і  $V_R$  – відповідно радіальна швидкість аерозолі і газового потоку, м/с.

Поділивши всі члени рівняння (4) на величину  $m_{\Pi} = \rho_{\Pi} \frac{\pi d^2}{6}$  і виконавши

відповідні перетворення, отримуємо:

$$\begin{aligned} \frac{dV_r}{d\tau} &= fV_r^2 + gV_r + h; \\ f &= -3/4 \cdot C_x \frac{\rho}{\rho_{\Pi}} \cdot \frac{1}{d}; \\ g &= 3/2 \cdot C_x \frac{\rho}{\rho_{\Pi}} \cdot \frac{V_R}{d}; \\ h &= \frac{\theta^2 \cdot V_r^2}{r} - \left( \frac{3}{4} \cdot C_x \frac{\rho}{\rho_{\Pi}} \cdot \frac{V_R^2}{d} - \frac{3}{2} \cdot \frac{\partial P}{\partial r} dr \frac{1}{\rho_{\Pi} d} \right), \end{aligned} \quad (6)$$

де  $V_{\tau}$  – тангенціальна швидкість газового потоку, м/с;  $d$  – діаметр частинки, м.

Згідно [13] в рівнянні (6) отримуємо:

$$U = \exp \int -V_r(\tau) f(\tau) d\tau, \quad (7)$$

де  $U$  – рішення лінійного диференційного рівняння:

$$U'' + au' + bu = 0; \quad (a = -g; b = fh),$$

яке при  $D = a^2 - 4b > 0$  має вид:

$$U = C_1 \exp \frac{-a + \sqrt{D}}{2} \tau + C_2 \exp \frac{-a - \sqrt{D}}{2} \tau. \quad (8)$$

В рівнянні (8) значення констант інтегрування:

$$C_1 = \frac{\lambda + a}{2\lambda}; \quad C_2 = \frac{\lambda - a}{2\lambda}. \quad (9)$$

Знайдені при початкових умовах  $\tau = 0; V_r(\tau) = 0; u = 1$  та  $\tau = 0; \frac{dV_r}{d\tau} = 0; u'' = 0$  з рівняння (7) витікає, що:

$$V_r(\tau) = \frac{1}{fu} \cdot \frac{du}{d\tau}. \quad (10)$$

Визначивши  $\frac{du}{d\tau}$  з рівняння (8) з урахуванням (9) і підставивши його в (10) отримуємо аналітичний вираз для радіальної швидкості частинки пилу у вихровому потоці:

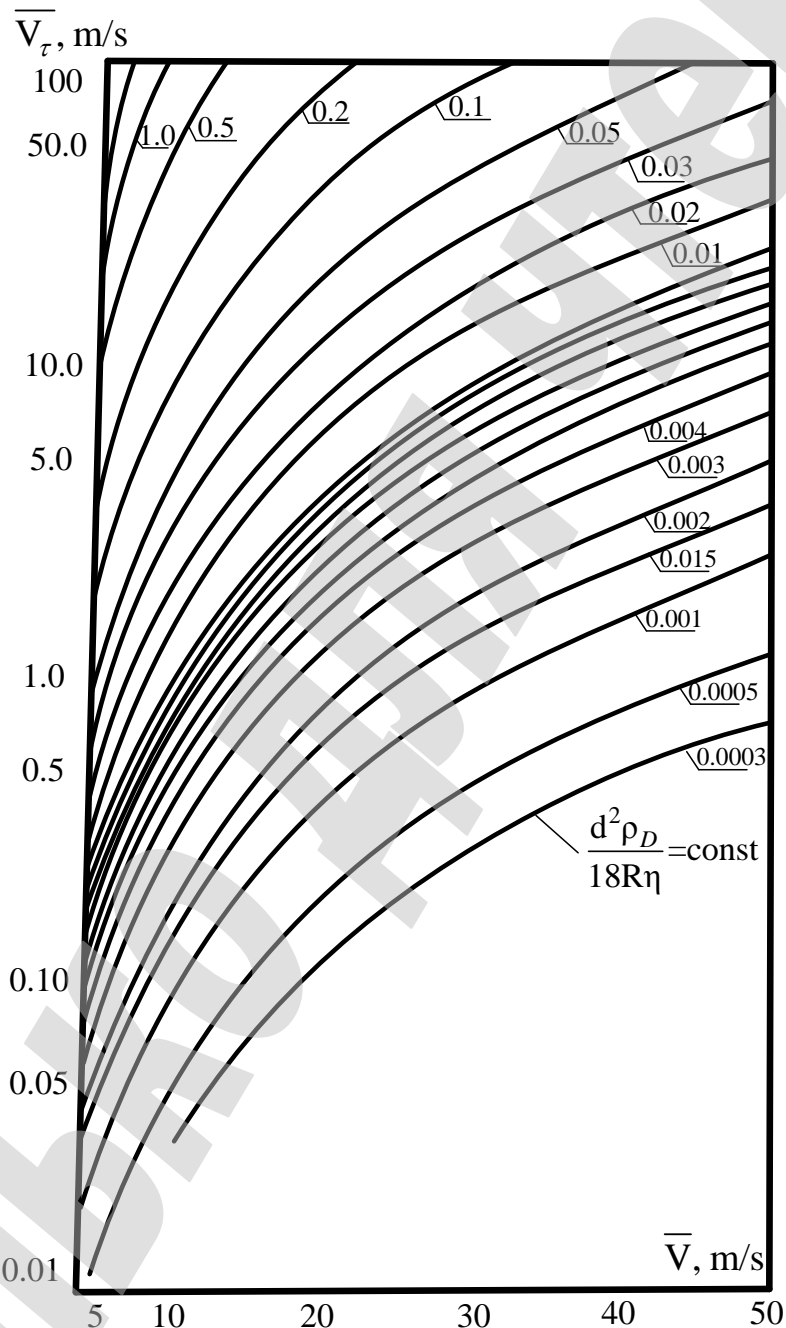
$$V_r(\tau) = \frac{b}{\lambda \tau u} \cdot \left[ \exp \left( \frac{\lambda - a}{2} \tau \right) - \exp \left( \frac{-\lambda + a}{2} \tau \right) \right]. \quad (11)$$

Якщо не враховувати електричні сили та враховувати вплив на частинки тільки відцентрованих сил і в'язкий опір осередку, то швидкість руху частинок до стінки апарату можна апроксимувати рівнянням:

$$\bar{V}_r(\tau) = \frac{d^2 \bar{V}_\tau^2 \rho_{II}}{18R\eta}, \quad (12)$$

де  $\bar{V}_\tau$  – усереднена тангенційна складова швидкості газового потоку в робочій порожнині апарату, м/с;  $\eta$  – динамічна густина газового осередку, кгс/м<sup>2</sup>; R – радіус апарату, м.

На рис. 2 представлені графічні залежності  $\bar{V}_r(\tau) = f(\bar{V}_\tau)$  для різних значень комплексу  $\frac{d^2 \rho_{II}}{18R\eta}$ , розраховані з використанням ЕОМ.



**Рис. 2.** Залежність швидкості руху часток до стінок апарату від усередненої тангенціальної швидкості газового потоку для різноманітних комплексів  $\frac{d^2 \rho_{II}}{18R\eta}$

При розрахунках і проектуванні вихрової камери необхідно виконувати

умови постійності тангенціальної швидкості сумарної течії по всій довжині робочої порожнини апарату, що забезпечує максимально можливу ефективність його функціонування. Для виконання цих умов швидкість витікання газового потоку з сопел (рис. 1, поз. 4) повинна бути в 1,5÷3 рази більше тангенціальної швидкості потоку на виході з лопатоподібного завихрювача:

$$Q_2 = (0,25 \div 0,65) \cdot Q_1,$$

де  $Q_1$  – об'єм вторинного потоку, м<sup>3</sup>/год.

Швидкість витікання потоку з каналів лопатоподібного завихрювача визначається з рівняння Бернуллі, записаного для реального потоку [14]:

$$W = 0,91 \sqrt{\frac{2\Delta H}{\rho_1}}, \quad (13)$$

де  $\Delta H$  – втрати напору на завихрювачі, мм рт. ст.;  $\rho_1$  – густина основного потоку, кг/м<sup>3</sup>.

В дійсності у пилоочисних апаратах забезпечити ідеальний безударний вхід потоку не можливо, тому в розрахункову формулу (13) для визначення швидкості витікання потоку вводиться емпіричний коефіцієнт  $k=0,5 \div 0,7$ .

Вісьова складова швидкості газового потоку на виході з завихрювача складає:

$$W_{o.з.} = k \cdot 0,91 \sin \beta \sqrt{\frac{2\Delta H}{\rho_1}}. \quad (14)$$

Умовна вісьова швидкість в апараті  $W_o$  пов'язана з віською швидкістю у завихрювачі  $W_{o.з.}$  умовами нерозривного потоку:

$$W_{o.з.} = \bar{W}_o \frac{1}{\left(\frac{D_3}{D}\right)^2 \left[1 - \left(\frac{D_B}{D_3}\right)^2\right]}. \quad (15)$$

Швидкість струї біля стінки в області завихрювача  $V_L$ , яка залежить від вимог, які ставляться до потоку що є низхідним не повинна бути менше за 1 м/с. При цьому діаметр сопла  $d_c$  і початкова швидкість витікання  $V_c$  пов'язані з довжиною робочої камери і кутом нахилу сопел співвідношенням [15]:

$$\frac{V_k}{V_c} = \frac{0,48 d_c \sin \alpha}{aL}. \quad (16)$$

Значення величини  $\alpha$  приймається в інтервалі 0,085÷0,11.

Швидкість витікання вторинного потоку з сопел у відповідності [15]



визначається залежністю:

$$V_c = 0,78 \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_2}}, \quad (17)$$

де  $\Delta P$  – втрата напору в соплах, мм. в. ст.;  $\rho_2$  – густина вторинного потоку, кг/м<sup>3</sup>.

Кількість сопел для подачі вторинного потоку складає:

$$n = \frac{4k_1 Q_1}{\pi d_c^2 V_c}, \quad (18)$$

де  $k_1$  – коефіцієнт, який залежить від розміру часток пилу (0,25÷0,65); більші значення цього коефіцієнту відповідають дрібнодисперсним фракціям.

В роботі [16] було визначено, що для пилу з фракційним складом <10 мкм цей коефіцієнт, який залежить від розміру часток складає  $k_1 \approx 0,6 \div 0,65$ ; з фракційним складом 10÷20 мкм  $k_1 \approx 0,4 \div 0,5$ ; з фракційним складом >50 мкм  $k_1 \approx 0,25 \div 0,3$ . Отримані математичні залежності не суперечать відомим підходам щодо вибору і розрахунку пиловловлювальних апаратів.

## 7. SWOT-аналіз результатів досліджень

*Strengths.* Перевагою наведеного в роботі підходу є те, що здобуті математичні залежності при відомому розподілу часток пилу по розмірам дозволяють попередньо визначити основні конструктивні співвідношення пиловловлювача при заданих витратах газу, що подається на очищення, та заданої ефективності пиловловлювача.

Аналіз здобутих результатів обґрунтування методів розрахунку основних параметрів вихрових камер свідчить про доцільність використання таких методів для розрахунку газоочисного обладнання.

При реалізації процесу очищення пилогазових потоків у вихрових апаратах спостерігається не тільки процеси агломерації пилу, а також деструкція газових токсикантів.

*Weaknesses.* Основні недоліки вихрових пиловловлювачів – це необхідність додаткового дуттєвого пристрою для подачі вторинного газу, складність виготовлення і експлуатації, відсутність інженерних методів розрахунку через складність процесів, які протікають в них.

*Opportunities.* Розглянуті математичні залежності дозволяють проводити прогнозуючі оцінки для вибору умов процесу сухого пилоочищення та вибору конструктивних параметрів вихрової камери. Це відкриває перспективи для впровадження вихрових апаратів з метою зниження промислового негативного впливу на навколишнє середовище, а саме атмосферу.

*Threats.* Підприємствам знадобиться збільшення капітальних витрати на встановлення нового, або вдосконаленого газоочисного обладнання. Капітальні витрати на впровадження газоочисного обладнання одноразові.

## 8. Висновки

1. Отримані математичні залежності щодо вибору умов процесу сухого очищення газового потоку від пилу і розрахунку пиловловлювальних апаратів. Рациональна організація того чи іншого закрученого потоку залежить від функції  $\alpha$ , яка визначається «законом закрутки» соплового або направляючого пристрою при вводі газового потоку у вихровий апарат.

2. Визначено, що коефіцієнт, який залежить від розміру часток змінюється в залежності від зміни фракційного складу пилу. Для пилу з фракційним складом  $<10$  мкм коефіцієнт залежить від розміру часток і складає  $k_1 \approx 0,6 \div 0,65$ ; з фракційним складом  $10 \div 20$  мкм  $k_1 \approx 0,4 \div 0,5$ ; з фракційним складом  $>50$  мкм  $k_1 \approx 0,25 \div 0,3$ . Отримані математичні залежності не суперечать відомим підходам щодо вибору і розрахунку пиловловлювальних апаратів.

3. Отримані математичні залежності, які дозволяють попередньо визначити основні конструктивні співвідношення пиловловлювача при заданих витратах газу та заданій ефективності пиловловлювача. А саме, при конструюванні вихрових камер необхідно дотримуватися наступних конструктивних параметрів:  $L/D \approx 2,5 \div 3,5$ ;  $D_3/D \approx 0,8$ ;  $D_B/D_3 \approx 0,5$ ;  $D_{III}/D \approx 0,5 \div 0,8$ ; кут нахилу лопаток завіхрювача на вході головного потоку  $\beta \approx 30 \div 60^\circ$ ; кут нахилання сопел вторинного потоку  $\alpha \approx 30 \div 45^\circ$ .

4. Визначено швидкість руху частинок пилу у вихровому потоці, а також основні співвідношення конструктивних розмірів вихрової камери. При розрахунках і проектуванні вихрової камери необхідно виконувати умови постійності тангенціальної швидкості сумарної течії по всій довжині робочої порожнини апарату, що забезпечує максимально можливу ефективність його функціонування. Для виконання цих умов швидкість витікання газового потоку з сопел повинна бути в  $1,5 \div 3$  рази більше тангенціальної швидкості потоку на виході з лопатоподібного завіхрювача.

## Література

1. Konovalov, V. I. Design Calculation of Ranque-Hilsch Vortex Tubes [Text] / V. I. Konovalov, A. Yu. Orlov, T. Kudra // Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta. – 2012. – Vol. 18, No. 1. – P. 74–107.

2. Batluk, V. A. Matematychna model protsesu ochyshchennia zapylenoho potoku u vidtsentrovo-inertsiiynykh pylovlovliuvachakh [Text] / V. A. Batluk, I. V. Proskurina, A. V. Liashenyk // Promyslova hidravlika i pnevmatyka. – 2010. – No. 1 (27). – P. 31–36.

3. Landau, L. D. Teoreticheskaia fizika [Text]. Vol. VI. Gidrodinamika / L. D. Landau. – Moscow: Nauka, 1988. – 736 p.

4. Shakerin, S. Vortex Apparatus and Demonstrations [Text] / S. Shakerin // The Physics Teacher. – 2010. – Vol. 48, No. 5. – P. 316–318. doi:10.1119/1.3393063

5. Ilescu, M. S. Analysis of the Cavitating Draft Tube Vortex in a Francis Turbine Using Particle Image Velocimetry Measurements in Two-Phase Flow [Text] / M. S. Ilescu, G. D. Ciocan, F. Avellan // Journal of Fluids Engineering. – 2008. – Vol. 130, No. 2. – P. 021105. doi:10.1115/1.2813052

6. Turik, V. N. Formirovanie vihrei gertlera v vihrevoi kamere [Text] /

V. N. Turik, V. V. Babenko, V. A. Voskoboinikov, A. V. Voskoboinikov // Promyslova hidravlika i pnevmatyka. – 2009. – No. 3 (25). – P. 31–36.

7. Pirashvili, Sh. A. Vihrevoi effekt [Text]. Vol. 1. Fizicheskoe iavlenie, eksperiment, teoreticheskoe modelirovanie / Sh. A. Pirashvili. – Moscow: Nauchtehlitizdat, 2013. – 337 p.

8. Proskurina, I. V. Pryntsyrove nove v metodakh ochystky povitria vid pylu v protsesakh vydobuvannia koksu z kamer koksovykh batarei [Text] / I. V. Proskurina // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2009. – Vol. 4, No. 9 (40). – P. 12–15. – Available at: <http://www.URL: http://journals.uran.ua/eejet/article/view/22271/19949>

9. Bona, C. Elements of Numerical Relativity and Relativistic Hydrodynamics [Text] / C. Bona, C. Palenzuela-Luque, C. Bona-Casas // Lecture Notes in Physics. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2009. – Vol. 783. – 214 p. doi:10.1007/978-3-642-01164-1

10. Pitak, I. V. Issledovanie protsessa mokrogo ulavlivannia pyli v roturnom vihrevom apparate [Text] / I. V. Pitak // Visnyk natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». – 2010. – No. 17. – P. 135–140.

11. Thakare, H. R. Experimental, computational and optimization studies of temperature separation and flow physics of vortex tube: A review [Text] / H. R. Thakare, A. Monde, A. D. Parekh // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2015. – Vol. 52. – P. 1043–1071. doi:10.1016/j.rser.2015.07.198

12. Bogomolov, A. On Inertial Systems, Dust Cleaning and Dust Removal Equipment, and Work Areas in the Production of Aerated Concrete from the Hopper Suction Apparatus CSF [Text] / A. Bogomolov, N. Sergina, T. Kondratenko // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 150. – P. 2036–2041. doi:10.1016/j.proeng.2016.07.290

13. Dekterev, A. A. Sovremennye vozmozhnosti CFD SIGMAFOW dlia resheniia teplofizicheskikh zadach [Text] / A. A. Dekterev, A. A. Gavrilov, A. A. Minakov // Sovremennaia nauka. – 2010. – No. 2 (4). – P. 117–122.

14. Pitak, I. Study of experimental-industrial design of rotary vortex machine [Text] / I. Pitak // Technology Audit and Production Reserves. – 2014. – Vol. 3, No. 2 (17). – P. 33–38. doi:10.15587/2312-8372.2014.26212

15. Tovazhnianskyi, L. L. Mashyny i aparaty u khimichnykh, kharchovykh i pererobnykh vyrobnytstvakh [Text] / L. L. Tovazhnianskyi, V. P. Shaporev, I. V. Pitak et al. – Kharkiv: Kolehium, 2011. – 610 p.