

10. Ward, C. R. The use of coal combustion products in mine backfill applications [Text] / C. R. Ward, D. French, J. Jankowski // Co-operative Research Centre for Coal in Sustainable Development. – 2007. – P. 341–371.
11. Ляшенко, В. И. Совершенствование технологии закладочных работ при подземной разработке урановых месторождений. [Текст] / В. И. Ляшенко, Н. И. Дядечкин // Известия вузов. Горный журнал. – 2011. – № 2. – С. 9–17.
12. Ghoreishi-Madiseh, S. A. Numerical modeling of thawing in frozen rocks of underground mines caused by backfilling [Text] / S. A. Ghoreishi-Madiseh, F. Hassani, F. Abbasy, A. Mohammadian // International journal of rock mechanics and mining sciences. – 2011. – P. 1068–1076.
13. Галкин, А. Ф. Регулирование теплового режима при проходке выработок в мерзлых породах [Текст] / А. Ф. Галкин // Безопасность труда в промышленности. – 2008. – № 7. – С. 17–21.
14. Андреев, М. Н. Разработка состава закладочного материала и испытания его прочностных свойств. [Текст] / М. Н. Андреев, Э. И. Богуславский // Записки горного института. – 2011. – Т. 189. – С. 130–133.
15. Zhang, H. B. Study of the mechanism of backfill and surrounding rock of open stope during subsequent backfill mining [Text] / H. B. Zhang, Y. J. Chen // Advanced material research. – 2013. – P. 452–456.

*В даній статті на основі аналізу існуючих методик оцінки пофракційної ефективності уловлювання твердих частинок в циклонних апаратах була розвинута фізична модель та вирішена задача математичного моделювання процесу очистки неоднорідних газових систем в циклонному пиловловлювачі. Проведені експериментальні дослідження циклонного пиловловлювача та перевірена адекватність розробленої математичної моделі*

*Ключові слова: циклонний пиловловлювач, жалюзійний елемент, пиловловлювання, аеродинамічний опір, фракційна ефективність*

*В данной статье на основе анализа существующих методик оценки пофракционной эффективности улавливания твердых частиц в циклонных аппаратах была развита физическая модель и решена задача математического моделирования процесса очистки неоднородных газовых систем в циклонном пылеуловителе. Проведены экспериментальные исследования циклонного пылеуловителя и проверена адекватность разработанной математической модели*

*Ключевые слова: циклонный пылеуловитель, жалюзийный элемент, пылеулавливание, аэродинамическое сопротивление, фракционная эффективность*

УДК 621.928.93

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ ЗАПИЛЕНИХ ГАЗОВИХ ПОТОКІВ В ЦИКЛОННОМУ ПИЛОВЛОВЛЮВАЧІ

**Д. О. Серебрянський**

Кандидат технічних наук, старший науковий співробітник  
Інститут технічної теплофізики НАН України  
вул. Желябова, 2а, м. Київ, Україна, 03680  
e-mail: fordima@ukr.net

**С. В. Плашихін**

Асистент\*

E-mail: plashihin@rambler.ru

**Ю. О. Безносик**

Кандидат технічних наук, доцент\*

E-mail: yu\_beznosyk@ukr.net

**О. М. Набок \***

\*Кафедра кібернетики хіміко-технологічних процесів  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут»  
пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056  
E-mail: alex2shae@mail.ru

### 1. Вступ

Інтенсивний розвиток різних галузей промисловості в двадцять першому столітті призвів до значного погіршення екологічної обстановки. Одним з основ-

них джерел забруднення атмосфери є пилові викиди цементної, коксохімічної, металургійної, паперової та іншої промисловості. Також значна кількість пилу виділяється при роботі котельень, що працюють на вугіллі та машинобудівному виробництві.

Існуюче технологічне обладнання останнім часом піддається корінній реконструкції з метою інтенсифікації в ньому процесів, підвищення його потужності, зниження енерговитрат, що призводить в багатьох випадках до перевантаження пиловловлюючого обладнання та, як наслідок, до підвищення пиловикидів. Застосування раніше використовуваних відцентрових пиловловлювачів стає неефективним, у зв'язку з чим виникає необхідність в їх заміні на більш ефективні та, як правило, більш енерго- та металоємні.

Технічні, економічні або технологічні розробки, що направлені на підвищення ефективності циклонів, неможливі без вивчення аеродинамічних особливостей процесів, що протікають в циклонах та без оцінки ефективності роботи таких пиловловлюючих апаратів.

В зв'язку з цим постає питання щодо створення математичної моделі розрахунку аеродинамічного опору та ефективності вловлювання твердих часток пилу в циклонному пиловловлювачі нової конструкції.

---

## 2. Аналіз досліджень та публікацій

---

Техніка пилоочистки характеризується великою різноманітністю конструкцій і форм виконання пилоочисного обладнання. Відомо багато типів пиловловлюючих апаратів і всі вони мають свої індивідуальні характеристики. Найважливішими з них, за якими в основному проводять їх вибір, є ефективність пиловловлювання та аеродинамічний опір, що визначають якість очищення та енерговитрат на його досягнення.

Аналіз існуючих методик оцінки пофракційної ефективності уловлювання виконаний раніше у роботах [1, 2]. Він показав, що перевірені багаторічним досвідом рекомендації [3, 4], які базуються на імовірнісному підході до аналізу процесів уловлювання пилу в циклонних пиловловлювачах, не можуть бути використані для оцінювання пофракційної ефективності різних циклонів, оскільки вони розроблені для визначених розмірів циклонів, діапазонів температур та слабкозапиленних потоків.

У методиці [5] робиться спроба врахування особливостей руху потоків всередині апарату, тертя зі стінками, поліфракційності та вхідної концентрації твердих фракцій на характеристики уловлювання частинок у циклонних апаратах.

Підхід, який застосовується у методиках [6, 7] зводиться до визначення мінімального розміру частинок, що вловлюється даним циклоном. Результати експериментів показують, що частинки з медіанним діаметром більшим від  $d_{\min}$  вловлюються в циклоні не повністю. Це пояснюється впливом турбулентності та прийнятими припущеннями. Одночасно частково вловлюються частинки пилу з діаметром меншим  $d_{\min}$ . Це пояснюється тим, що не врахована коагуляція частинок всередині циклона.

В [8] запропонована статистична кореляція для оцінки пофракційної ефективності, що задовільно узгоджується з експериментальними даними для циклонів різної геометрії. Тут також відмічено, що рівняння для пофракційної ефективності [9], широко відоме в літературі, не може бути рекомендовано для низьких величин конструктивного фактору  $K$  та випадків оцінки ефективності циклонів при великих змінах в їх конструкціях.

Зважаючи на вище сказане, слід зауважити, що на сьогодні не створена повна і точна математична модель руху частинки пилу в циклонних пиловловлювачах. Це пояснюється складними аеродинамічними процесами, що відбуваються в циклонах.

---

## 3. Мета і задачі досліджень

---

Метою роботи є розроблення математичної моделі розрахунку аеродинамічного опору та ефективності вловлювання твердих часток пилу в циклонному пиловловлювачі.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступну задачу: дослідити фізичну суть процесу очищення та розділення неоднорідних газових систем в циклонному пиловловлювачі.

---

## 4. Моделювання процесу очищення запиленних газових систем в циклонному пиловловлювачі

---

Для обґрунтування основних параметрів циклонного пиловловлювача важливе значення має аналіз руху пилоповітряного потоку в апараті. В залежності від фізико-хімічних властивостей потоку та конструктивних особливостей пиловловлювача запилений потік повітря може здійснювати як ламінарний так і турбулентний рух. При цьому біля стінок має місце явище приповерхневого шару.

### 4. 1. Фізична модель

Модель руху частинки в циклонному пиловловлювачі під дією відцентрових сил показано на рис. 1.

Запилений потік вводиться у внутрішній корпус апарату, з радіусом  $R_2$ , через вхідний патрубок тангенціально зі швидкістю  $V_{вх}$ . Завдяки тангенціальному введенню, потік набуває обертового руху навколо вихідної труби радіуса  $R_1$  для відведення очищеного повітря. В потоці на частинку, окрім сили тяжіння  $G$ , Архімеда  $A$  і тертя  $S$ , діє відцентрова сила  $F_b$ , що перпендикулярна до дотичної до дуги. Відцентрова сила набагато більша за силу тяжіння.

В полі відцентрових сил частинка рухається до стінки внутрішнього корпусу циклонного пиловловлювача. Частинки, що досягли стінки внутрішнього корпусу циклонного пиловловлювача, в області жалюзійного елемента відводяться у зовнішній корпус апарату. Таким чином відбувається зменшення початкової концентрації пилу в газовому потоці. У зовнішньому корпусі частинки осідають переважно під дією сили тяжіння, так як відбувається різке зменшення тангенціальної швидкості, а отже і зменшення відцентрової сили, що діє на частинку. Частинки, що не потрапили у зовнішній корпус циклонного пиловловлювача, рухаються у сформованому обертовому потоці утворюючи приповерхневий пиловий шар, що опускається по кільцевому простору, утвореному внутрішньою поверхнею циліндричної частини внутрішнього циліндричного корпусу апарату і вихідною трубою, і потрапляє в конусну частину. Частинки пилу під дією відцентрової сили притискаються до стінки корпусу циклону і в нижній частині конусного днища відокремлюються і опускаються через пиловідвідний

отвір у внутрішній бункер пилу з частиною повітря. Потрапивши у внутрішній бункер і звільнившись від пилу, частина повітря повертається в циклонний пиловловлювач через центральну частину пиловідведного отвору, даючи початок внутрішньому вихру очищеного газу, що залишає апарат. По мірі руху цієї частини газу в сторону вихідної труби до неї поступово приєднуються порції газів з основного потоку.

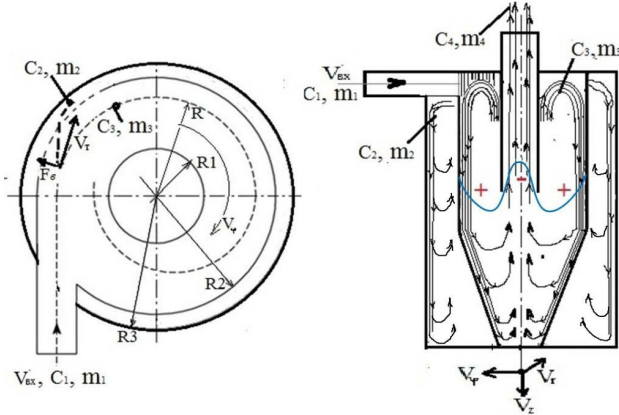


Рис. 1. Рух частинки в циклонному пиловловлювачі в полі відцентрових сил:  $V_{bx}$  – швидкість запиленого потоку на вході в циклон;  $V_t$  – тангенціальна швидкість;  $F_c$  – відцентрова сила;  $V_\phi$  – колова швидкість руху частинки;  $C_1, C_2, C_3, C_4$  – концентрація пилу в газовому потоці на вході в апарат, в газовому потоці що відводиться у зовнішній корпус апарату через жалюзійний елемент, в газовому потоці, що продовжує обертатися у внутрішньому корпусі після проходження області жалюзійного елемента та в газовому потоці на виході з апарату відповідно;  $m_1, m_2, m_3, m_4$  – маса пилу на вході в апарат, що відводиться у зовнішній корпус апарату через жалюзійний елемент, що продовжує обертатися у внутрішньому корпусі після проходження області жалюзійного елемента та на виході з апарату відповідно

У конусній частині потік газу повертається і рухається вгору до вихідної труби, через яку виходить з апарату, утворюючи внутрішній обертовий вихор. Внаслідок дії внутрішнього обертового вихру частина пилу з приповерхневого пилового шару виноситься у вихідну трубу. Причому, чим більша товщина приповерхневого пилового шару, тим більше пилу виноситься у вихідну трубу. Завдяки зменшенню початкової концентрації пилу зменшується й товщина пристінного пилового джгута, відповідно й зменшується винос часток пилу у вихідну трубу.

В циклонному пиловловлювачі вловлений у зовнішньому корпусі пил збирається у зовнішньому бункері, а пил, що вловлюється у внутрішньому корпусі, збирається у внутрішньому бункері. Зовнішній і внутрішній бункери герметично ізольовані один від одного, тим самим запобігається переток газового потоку між корпусами циклонного пиловловлювача.

#### 4. 2. Математична модель

Динаміка руху повітря в циклонних апаратах описана рівняннями Нав'є-Стокса, що можна представити у векторній формі

$$\frac{d\vec{\vartheta}}{dt} = \vec{F} - \frac{1}{\rho} \text{grad}p + \nu \Delta \vec{\vartheta}, \quad (1)$$

де  $\vec{\vartheta}$  – вектор швидкості повітря,  $\vec{F}$  – вектор масової сили,  $\rho$  – густина повітря,  $P$  – тиск повітря у будь-якій точці,  $\nu$  – кінематична в'язкість повітря.

Після складних математичних перетворень та при заданих граничних умовах, що описують конструкцію циклонного пиловловлювача було отримано рівняння для розрахунку тиску повітря в будь-якій точці апарату:

$$P = \rho \nu r \phi \left[ \frac{B \phi Z}{2r} + A (B_0(r) + J_1(Kr)) e^{-KZ} \right], \quad (2)$$

$$\text{де } A = \frac{\psi K \vartheta_{bx} e^{\frac{Kb}{2}}}{J_1(KR_2)} / \left( 1 - \frac{b}{2H} e^{\frac{K(2H-b)}{2}} \right), \quad (3)$$

$$B = \frac{2\psi R_2 \vartheta_{bx} e^{\frac{K(2H+b)}{2}}}{H(\pi - \alpha)} / \left( 1 - \frac{b}{2H} e^{\frac{K(2H-b)}{2}} \right), \quad (4)$$

де  $a$  – ширина вхідного патрубку, м;  $b$  – висота вхідного патрубка, м;  $H$  – висота циклонного пиловловлювача, м;  $R_2$  – радіус внутрішнього корпусу циклонного пиловловлювача, м;  $\psi$  – коефіцієнт живого перерізу жалюзійної сітки;  $\vartheta_{bx}$  – середня вхідна швидкість, м/с;  $\alpha$  – центральний кут жалюзійної стінки, рад;

Загальний аеродинамічний опір циклонного пиловловлювача розраховується за формулою:

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2, \quad (5)$$

де  $\Delta P_1 = P \left( R_2 - \frac{a}{2}; 0; \frac{b}{2} \right) - P \left( R_1, \frac{\pi - \alpha}{2}, H_0 \right)$  – падіння тиску від вхідного патрубка до торця вихідної труби,

$P = (r, \phi, Z)$  визначається за формулою (4);  $\Delta P_2 = \frac{\lambda H_0 \rho Q^2}{4\pi^2 R_1^5}$  –

падіння тиску в вихідній трубі,  $H_0$  – висота вихідної труби,  $R_1$  – радіус вихідної труби,  $Q$  – витрати повітря,  $\lambda$  – коефіцієнт гідравлічного тертя в вихідній трубі.

Алгоритм розрахунку аеродинамічного опору циклонного пиловловлювача представлений на рис. 2.

Фракційна ефективність вловлювання твердих часток в циклонному пиловловлювачі розраховується за формулою:

$$\eta(\delta) = n \cdot \text{Stk}^m \cdot K^l, \quad (6)$$

де  $\text{Stk} = \frac{d_p^2 \cdot v_n \cdot \rho_p}{D \cdot \mu}$ , ( $\rho_p$  – густина частинки, кг/м<sup>3</sup>;  $D$  –

діаметр апарату, м;  $\mu$  – динамічна в'язкість повітря, Па·с;  $v_n$  – швидкість в перетині апарату, м/с);

$K = \frac{C}{\rho_p}$ , ( $C$  – концентрація частинок в пилогазовій суміші, кг/м<sup>3</sup>);  $n, m, l$  – безрозмірні коефіцієнти, що

визначаються експериментальним шляхом.

Повна ефективність циклонного пиловловлювача розраховується за формулою:

$$\eta = \sum_{i=1}^{i=n} \eta_i(\delta) \phi_i(\delta), \tag{7}$$

де  $\phi(\delta)$  – густина вірогідності розподілу розмірів часток пилу.

Алгоритм розрахунку ефективності вловлювання твердих часток в циклонному пиловловлювачі представлений на рис. 3.

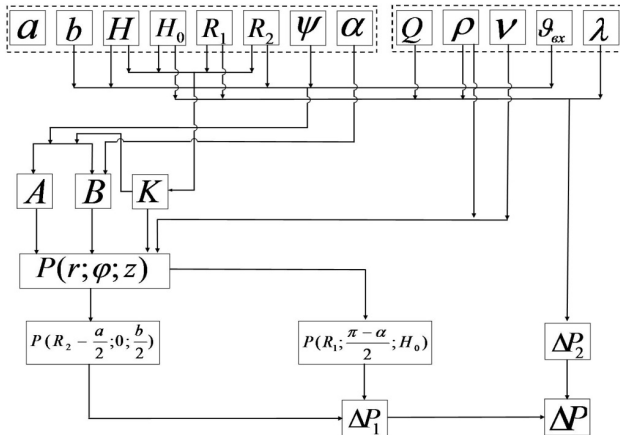


Рис. 2. Алгоритм розрахунку аеродинамічного опору циклонного пиловловлювача

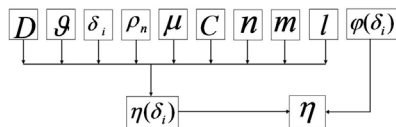


Рис. 3. Алгоритм розрахунку ефективності вловлювання твердих часток в циклонному пиловловлювачі

Ймовірність потрапляння частинки певного розміру у зовнішній корпус циклонного пиловловлювача розраховується наступним чином.

Частинка з діаметром  $\delta$ , що має початкові координати:  $r_0 (R_1 < r_0 < R_2)$ ,  $\phi_0 = 0$ ,  $Z_0 (0 < Z_0 < b)$ , за час  $\tau$  отримає нові координати:  $r_\tau = r_0 + \vartheta_r \tau$ ;  $Z_\tau = Z_0 + \vartheta_z \tau$ ;

$$\phi_\tau = \frac{\vartheta_\phi \tau_\phi}{R_1 + R_2}.$$

Для того, щоб частинка потрапила на поверхню жалюзійного елемента, необхідно виконання нерівностей

$$r_0 + \vartheta_r \tau_r > R_2; \vartheta_z \tau_z < b; \frac{\vartheta_\phi \tau_\phi}{R_1 + R_2} < \alpha.$$

Звідси знаходимо  $\tau_r = \frac{R_2 - r_0}{\vartheta_r}$ ;  $\tau_z = \frac{b}{\vartheta_z}$ ;  $\tau_\phi = \frac{\alpha(R_1 + R_2)}{\vartheta_\phi}$ .

Так як  $\min r_0 = R_1$ , то  $\tau_r = \frac{R_2 - R_1}{\vartheta_r}$ .

Запишемо початкові координати частинки, яка досягає жалюзійного елемента циклонного пиловловлювача:

$$\begin{aligned} r^* &= R_1 + \vartheta_r \tau_{\min}; \\ \phi^* &= 0; \\ Z^* &= \vartheta_z \tau_{\min}. \end{aligned} \tag{8}$$

Ймовірність потрапляння частинки на поверхню жалюзійного елемента циклонного пиловловлювача дорівнює

$$F_1 = \frac{r^* \cdot Z^*}{ab}. \tag{9}$$

Ймовірність потрапляння частинки всередину зовнішнього корпусу циклонного пиловловлювача за умови, що вона знаходиться на поверхні жалюзійного елемента, дорівнює

$$F_2 = 0.5 \psi. \tag{10}$$

Ця рівність пояснюється тим, що жалюзійний елемент обмежує застійну зону, на межі якої відбуваються пульсації швидкостей, що рівномірні по амплітуді і знаку.

По теоремі множення ймовірно залежних подій знаходимо ймовірність осідання частинок усередині зовнішнього корпусу циклонного пиловловлювача

$$F = F_1 \cdot F_2 = \frac{\psi Z^* r^*}{2ab}. \tag{11}$$

Алгоритм розрахунку ймовірності потрапляння частинки певного розміру у зовнішній корпус циклонного пиловловлювача представлений на рис. 4.

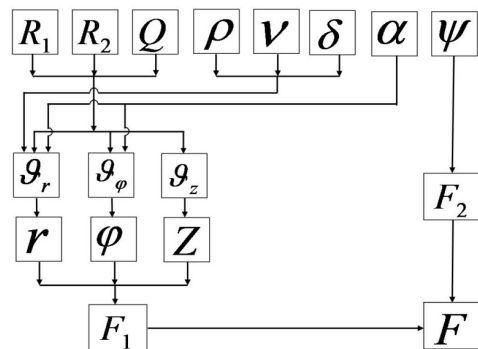


Рис. 4. Алгоритм розрахунку ймовірності потрапляння частинки певного розміру у зовнішній корпус циклонного пиловловлювача

Аеродинамічний опір та ефективність вловлювання твердих часток в циклонному пиловловлювачі розраховувалися для апарату діаметром 170 мм, при нормальних умовах ( $T=20$  °C, густина повітря = 1,2 кг/м<sup>3</sup>). В якості пилу було взято цементний пил ( $\rho=3160$  кг/м<sup>3</sup>).

За результатами розв'язання математичної моделі були отримані залежності аеродинамічного опору апарату (рис. 5) та повної ефективності вловлювання (рис. 6) від витрат приведеної швидкості в перетині апарата.

Також отримали залежність фракційної ефективності вловлювання цементного пилу від медіанного діаметра часток для різних приведених швидкостей в перетині апарату (рис. 7) та ймовірність потрапляння частинки певного розміру у зовнішній корпус циклонного пиловловлювача (рис. 8).

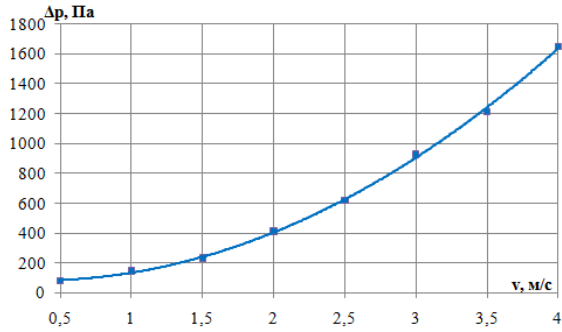


Рис. 5. Залежність аеродинамічного опору апарату від приведеної швидкості в перетині циклонного пиловловлювача

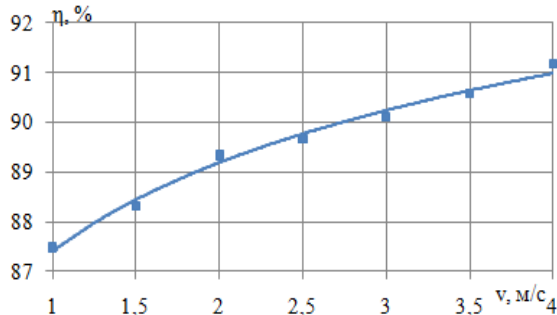


Рис. 6. Залежність повної ефективності вловлювання від приведеної швидкості в перетині апарату

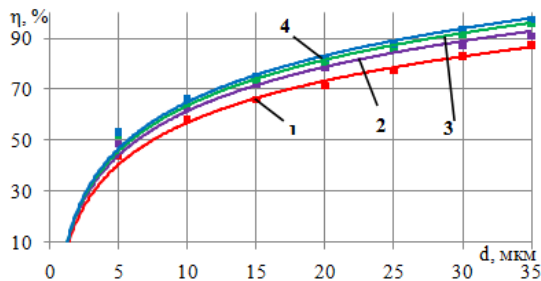


Рис. 7 Залежність фракційної ефективності вловлювання від медіанного діаметру часток пилу при різних швидкостях газového потоку в перетині циклонного пиловловлювача:

1 –  $v=1$  м/с; 2 –  $v=2$  м/с; 3 –  $v=3$  м/с; 4 –  $v=4$  м/с

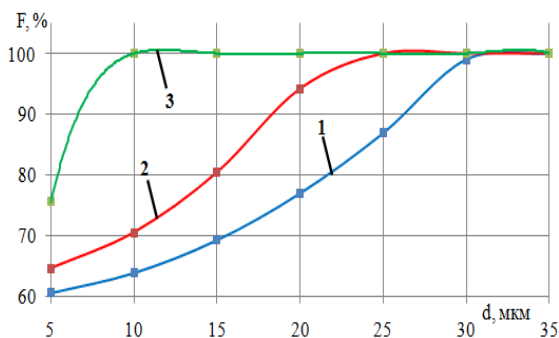


Рис. 8. Ймовірність потрапляння часток певного діаметру у зовнішній корпус циклонного пиловловлювача при різних відстанях цих часток від осі апарату:  
1 –  $R_1 = 0.076$  м, 2 –  $R_1 = 0.080$  м, 3 –  $R_1 = 0.084$

### 5. Експериментальне дослідження циклонного пиловловлювача. Перевірка адекватності математичної моделі

Дослідження фізичної моделі циклонного пиловловлювача проводилися на експериментальному стенді [10–12], схема якого представлена на рис. 9.

Робочою ділянкою виступав циклонний пиловловлювач з діаметром внутрішнього циліндричного корпусу 170 мм. Циклонний пиловловлювач спроектований за конструктивними розмірами циклона ЦН-15 з кутом нахилу вхідного патрубку  $0^\circ$ , але має конструктивні зміни у вигляді жалюзійного елемента та додаткового зовнішнього корпусу.

Експериментальні дослідження проводилися в ізотермічних умовах. Витрати газу на вході в апарат змінювалися в межах  $81\pm 327$  м<sup>3</sup>/год, що відповідає приведений швидкості газového потоку в перетині циклонного пиловловлювача 1–4 м/с відповідно, концентрація пилу в газovém потоці змінювалася в межах 5–40 г/м<sup>3</sup>. В якості пилу використовувався цементний пил ( $d_{50}=20$  мкм,  $\rho=3200$  кг/м<sup>3</sup>).

Проведені експериментальні дослідження аеродинаміки та ефективності апарату дають можливість оцінити адекватність математичної моделі.

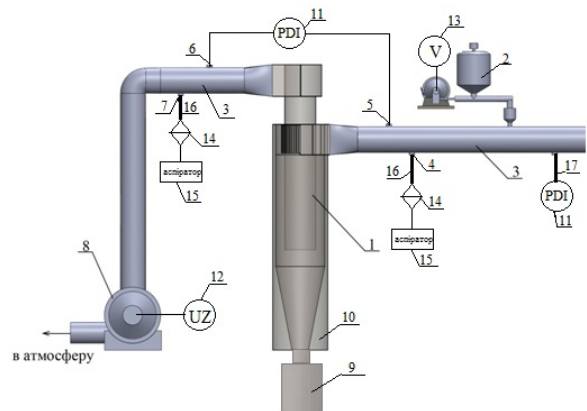


Рис. 9. Експериментальний стенд: 1 – циклонний пиловловлювач; 2 – дозатор-живильник; 3 – з'єднувальний трубопровід; 4 та 7 – місця відбору пилових проб; 5 та 6 – місця виміру тисків; 8 – відцентровий вентилятор; 9 – внутрішній бункер; 10 – зовнішній бункер; 11 – диференціальний мікроманометр «TESTO 435»; 12 – частотний перетворювач; 13 – вольтметр; 14 – алонж з фільтром АФА; 15 – аспіратор М-822; 16 – пиловідбірна трубка; 17 – трубка НДІОГАЗ

На рис. 10 наведено залежності аеродинамічного опору апарату, отримані в результаті розрахунку математичної моделі та експериментальних досліджень, від приведеної швидкості в перетині апарату.

На рис. 10 можна побачити що криві, побудовані за результатами розрахунку математичної моделі та експериментальних досліджень мають, схожий характер. Похибка між даними, отриманими в результаті розрахунку математичної моделі, та експериментальними даними становить 13,9 %.



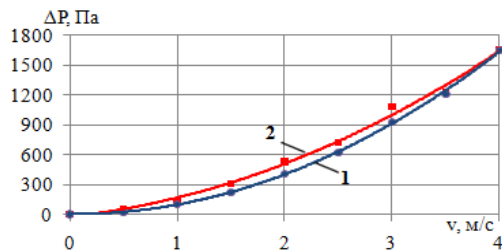


Рис. 10. Залежність аеродинамічного опору від приведеної швидкості в перетині циклонного пиловловлювача: 1 – математична модель; 2 – експериментальні дані, отримані в результаті лабораторних випробувань

На рис. 11 наведено залежність повної ефективності апарата, розрахованої за експериментальними та теоретичними даними, від приведеної швидкості в перетині апарата.

Як видно з рис. 11, криві, що побудовані за даними розрахунку математичної моделі та експериментальних досліджень мають подібний характер. Похибка між даними, отриманими в результаті розрахунку математичної моделі, та експериментальними даними становить 1,06 %.

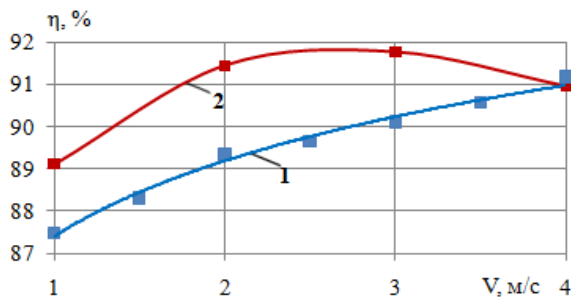


Рис. 11. Залежність повної ефективності апарата від приведеної швидкості в перетині циклонного пиловловлювача: 1 – Математична модель (пил цементу:  $\rho=3200 \text{ кг/м}^3$ ,  $d_{50}=20 \text{ мкм}$ ,  $\sigma=5,48$ ); 2 – експериментальні дані, отримані в результаті лабораторних випробувань (пил цементу:  $\rho=3200 \text{ кг/м}^3$ ,  $d_{50}=20 \text{ мкм}$ ,  $\sigma=5,48$ )

## 6. Висновки

1. Розроблено математичну модель розрахунку аеродинамічного опору та ефективності пилоочищення газового потоку для циклонного пиловловлювача, яка враховує геометричні розміри та кут розкриття жалюзійного елемента створеного пиловловлювача.

2. Обробка експериментальних даних дозволила визначити безрозмірні коефіцієнти  $n$ ,  $m$ ,  $l$ , що входять до складу рівняння для визначення фракційної ефективності пиловловлювання в створеному пиловловлювачі у вигляді:  $\eta(\delta) = 0.857 \cdot Stk^{0.158} \cdot K^{0.006}$

3. В результаті проведеного аналізу отриманих даних розрахунку математичної моделі та експериментальних досліджень підтверджена адекватність математичної моделі. Встановлено, що похибка між отриманими даними по розрахунку аеродинамічного опору циклонного пи-

ловловлювача становить 13,9 % та повної ефективності вловлювання твердих часток становить 1,06 %.

## Література

1. Пацков, В. П. Существующие методы оценки эффективности циклонных аппаратов [Текст] / В. П. Пацков, А. И. Топал, А. В. Крицкий и др. // Промышленная теплотехника. – 2007. – Т. 29, № 7. – С. 194–200.
2. Шиляев, М. И. Энергетический принцип сравнения и универсальный метод расчета инерционных пылеуловителей [Текст] / М. И. Шиляев, А. М. Шиляев // Качество внутреннего воздуха и окружающей среды: Мат. II международ. науч. конф., 15-19 сент. 2003 г., Волгоград: Изд-во Волг. гос. архит.-строит. ун-та, 2003. – С. 98-105.
3. Биргер, М. И. Справочник по пыле- и золоулавлианию [Текст] / М. И. Биргер, А. Ю. Вальдберг, Б. И. Мягков и др.; Под общ. ред. А. А. Русанова. – 2-е изд., пер. и доп.. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 312 с.
4. Приемов, С. И. Метод расчета циклонных пылеуловителей [Текст] / С. И. Приемов // Промышленная теплотехника. – 1996. – Т. 18, № 4. – С. 49 – 52.
5. Muschelknautz, E. Druckverlust and Abscheidengrad in Cyclon [Text] / E. Muschelknautz, M. Trefz // VDI. – Warmenatlas. – В. 6. – 1991. – Lj. 1–8.
6. Теверовский, Е. Н. Перенос аэрозольных частиц турбулентными потоками [Текст] / Е. Н. Теверовский, Е. С. Дмитриев. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 160 с.
7. Шиляев, М. И. К фракционному методу расчета инерционных пылеуловителей [Текст] / М. И. Шиляев, А. М. Шиляев, И. В. Гормолысова, И. Б. Оленев // Известия вузов. Строительство. – 2006. – № 1. С. 62-67.
8. Santana, J. D. A. M. Performance of Cylindrical-conical cyclone with different geometrical configurations [Text] / J. D. A. M. Santana, S. Armosti, J. R. Coury et al. // Braz. Journ of Chem. Eng., 2001. – Vol. 18, No. 3. – P. 1–14.
9. Leith, D. The Collection efficiency on cyclone type particles collectors – a new theoretical approach [Text] / D. Leith, W. Lich // AIChE Journal, 1972. - Vol. 68, № 126. – P. 196 – 206.
10. Плашихин, С. В. Экспериментальні дослідження циклофільтра в процесі вловлювання цементного пилу [Текст] / С. В. Плашихин., Д. А. Серебрянский, Ю. А. Безносик // Вестник НТУ «ХПИ»: Новыє рішення в сучасних технологіях. – 2010. – № 57. – С. 3–6.
11. Серебрянский, Д. О. Стендові випробування відцентрового фільтра і циклофільтра при уловлюванні золи твердопаливного котла [Текст] / Д. О. Серебрянский, С. В. Плашихин // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2011. – № 5(79). – С. 89–94.
12. Серебрянский, Д. А. Сравнительные испытания центробежного фильтра и циклофильтра [Текст] / Д. А. Серебрянский, С. В. Плашихин // XIX международная научно-практическая конференция (6-10 июня 2011 г., г. Щелкино, АР Крым) «Инновационные пути решения актуальных проблем базовых отраслей, экологии, энерго- и ресурсосбережения». Сборник трудов том 3. Харьков, 2011 – С. 109–112.