

ВПЛИВ КОНСТРУКЦІЇ ЗАВИХРЮВАЧА ВХІДНОГО ПОТОКУ НА ГІДРОДИНАМІКУ І ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ

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

1. Вступ

Східний регіон України, як найбільш насичений промисловими підприємствами хімічної, металургійної та будівельної галузей, є великим промисловим регіоном держави, де щільно зосереджені екологічно небезпечні галузі сучасного промислового виробництва. Обсяг викиду пилу в атмосферу з таких підприємств з кожним роком неупинно зростає за рахунок зростання джерел, де утворюються заповишені потоки, що потребують очищення.

Актуальним є створення та розвиток нових високоефективних та більш вдосконалених типів обладнання природоохоронного призначення на основі теоретичного обґрунтування і дослідження процесу розділу фаз, зокрема виділення частинок пилу в системах з обертовими потоками. Зокрема, вдосконалення потребують вихрові апарати із зустрічними закрученими потоками, а також технологічна апаратура з активною гідродинамікою для іншого призначення.

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єкт дослідження – конструкція вихрового пиловловлювача.

Типові конструкції вихрових пиловловлювачів з циліндричною сепараційною камерою для приклада наведені на рис. 1, 2. Перша типова модель [1] являє собою циліндричну сепараційну камеру 1, у верхній частині якої передбачено канал подачі вторинного потоку 4 (L_2), вихідний патрубок 3 для видалення очищеного повітря (L_0). А в нижній частині – канал подачі первинного потоку 5 (L_1), який закручується у завихрювачі 6 і надходить до сепараційної камери у осьовому напрямку на зустріч вторинному потоку. В середині циліндро-конічного пилозбірного бункера 2 передбачений завихрювач первинного потоку 6 з відбійною шайбою 7 і витиснювачем 8, а конічна частина бункера внизу постачена штуцером для видалення накопиченого пилу.

Робота апарату в якості пиловловлювача полягає в тому, що запилений потік у вигляді аерозолі, що подається від джерела утворення пилу, за допомогою тягового вентилятора, надходить до сепараційної камери 1. Одночасно по двом каналам – первинному 5 (L_1) і вторинному 4 (L_2), в яких вони закручуються в один бік вони рухаються назустріч один одному. В результаті їх взаємодії по висоті сепараційної камери 1 утворюється результуючий обертовий потік. Обертовий потік, з якого під дією складної системи сил, переважно відцентрованих та сил лобового опору, частинки пилу відокремлюються від повітря.

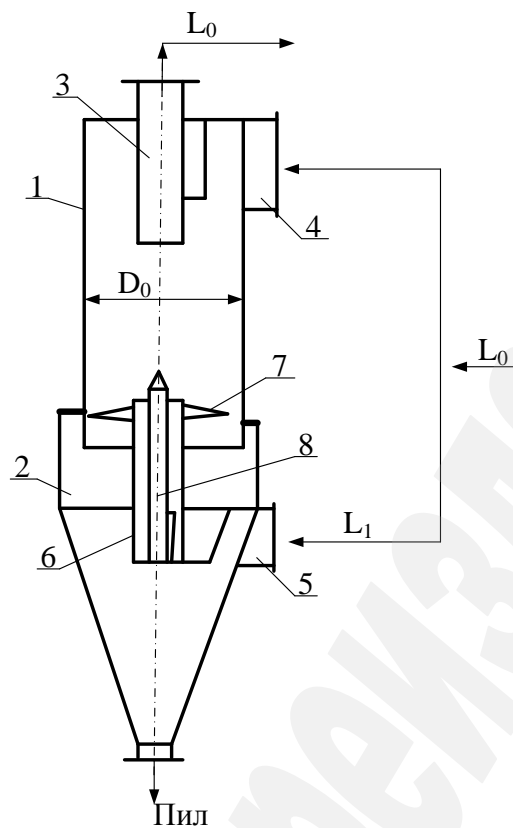


Рис. 1. Конструкція вихрового апарату: 1 – циліндрична сепараційна камера; 2 – пилозбірний бункер; 3 – вихідний патрубок; 4 – канал подачі вторинного потоку; 5 – канал подачі первинного потоку; 6 – завихрювач первинного потоку; 7 – шайба відбійна; 8 – осьовий витискач

Потік рухається в радіальному напрямку від осі обертання до бокової поверхні сепараційної камери, і потім досягає стінки. При цьому уловлений пиломатеріал частково вторинного потоку транспортується вниз до рівня відбійної шайби 7 і крізь кільцевий зазор, утворений між шайбою 7 та сепараційною камерою 1, потрапляє у бункер-накопичувач 2. Низхідний вторинний потік (L_2) на рівні відбійної шайби 7 розвертається на 180° і, поступово зливаючись з висхідним потоком, у вигляді результуючого вихору (L_0) із залишками дрібнодисперсних частинок рухається в гору, де через вихідний патрубок 3 відводиться в атмосферу або у разі необхідності направляється на додатковий ступінь очищення.

Другий тип вихрового пиловловлювача представлений на рис. 2 [2]. Пиловловлювач містить газопровід забрудненого газу 1, розсікач 2, завихрювач основного потоку газу 3 з обтічником 4, корпус 5. Подача додаткового потоку газу виконується за допомогою приладу 6, а вихід чистого газу через патрубок 7. В конусній частині апарату 8 проводиться збір і розвантаження пилу через живильник 9. Конструктивна особливість досліджуваного вихрового апарату полягає в тому, що двофазний потік, закручений за допомогою двох завихрювачів, зберігає обертання в сепараційній зоні апарату. В центральній частині апарату, у режимі закручених в одному напрямку потоків, забезпечується ефективно відокремлення пилу при мінімальному гідравлічному опорі використаних способів закручення потоку.

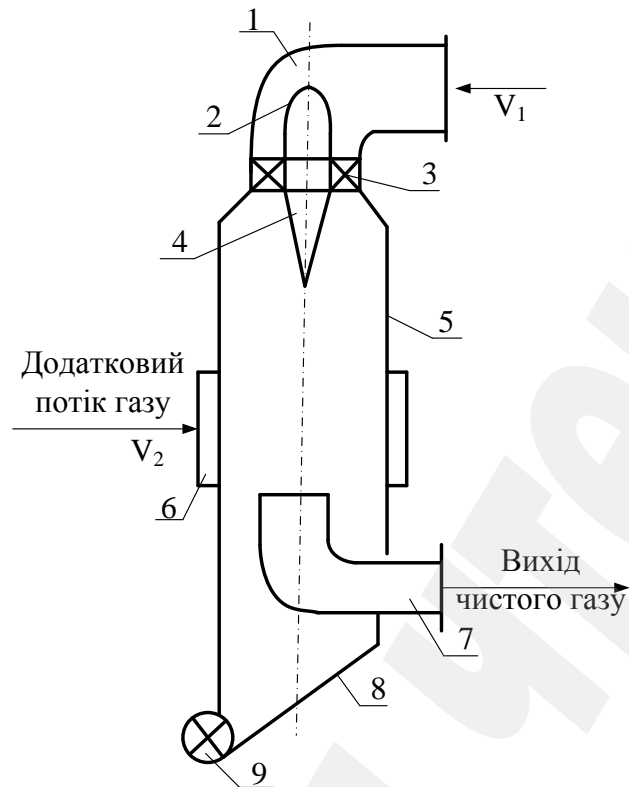


Рис. 2. Схема вихрового пиловловлювача

Дослідження вихрового пиловловлювача проводили в діапазоні $3 \cdot 10^6 < Re < 7 \cdot 10^6$, що відповідає середній швидкості в апараті $8 \div 15$ м/с. Діапазон варіювання факторів – концентрація продуктів в газах, кут нахилу лопаток завихрювала основного потоку обирали за результатами попередніх дослідів та аналізу літературних джерел. Під час експериментів досліджували вплив співвідношення потоків в радіальному напрямі в двох перерізах апарату: безпосередньо після завихрювала і в центральній частині апарату. Встановлено існування критичних режимів, при яких ефективність процесу відокремлення низька і вважається неприпустимою та залежить від коефіцієнту $k = V_1 / (V_1 + V_2)$, який для даного випадку приблизно дорівнює $k = 0,5$.

Через технологічну складність процесу вловлювання полідисперсного пилу недостатньо розглянуті питання математичного моделювання процесу сепарації частинок пилу в системі зустрічних закручених потоків. Також не досить ретельно розглянуто вплив на процес сепарації фізико-хімічних властивостей пилу, і як наслідок – відсутність надійної інженерної моделі вибору і розрахунку вихрових пиловловлювачів з циліндричною сепараційною камерою. Не досить повно розглянуті питання напрямів конструктивного удосконалення та компоновки раціональної технологічної схеми процесу вловлювання.

3. Мета та задачі дослідження

Мета роботи – розробити удосконалену (нову) конструкцію вихрового пиловловлювача.

Для досягнення вказаної мети необхідно:

1. Дослідити вплив конструкції завихрювача і місця його установки в

газоході на ефективність роботи вихрового апарата.

2. Дослідити аеродинамічні процеси, що обумовлюють той чи інший характер обертання потоку і його течії в газоході після завихрювача, а також конструкцію завихрювача.

3. Встановити характерні режими течії газопилового потоку у газоході після завихрювача.

4. Дослідження існуючих рішень проблеми

Аналіз гідродинамічних досліджень процесів пиловловлювання в типових конструкціях розглянутих пиловловлювачів [1–3] довів, що основна увага при дослідженнях процесу приділена визначенню компонентів швидкостей потоку в сепараційній камері після завихрювача, впливу на ці показники співвідношення конструктивних розмірів і визначенню гідравлічного опору. Без сумніву, вказані результати досліджень є основою для модернізації основних функціональних вузлів вихрових апаратів з циліндричною сепараційною камерою та поліпшення інших параметрів роботи. В роботах [1–3] при значенні коефіцієнта $k=V_1/(V_1+V_2)=0.8$, який вважається найбільш раціональним для пиловидалення для різних компонентів пилу (вхідної концентрації пилу >5 г/нм³):

- шихта скляного виробництва $d_n=(18\div 20)$ мкм;
- мелений доломіт $d_n=(10\div 16)$ мкм;
- мелена крейда $d_n=(6\div 12)$ мкм;
- кварцовий тестовий пил $d_n=(6\div 10)$ мкм, визначена ефективність пиловловлювання, яка в межах розміру частинок від 6 до 10 мкм не перевищує 90 %, а в межах від 12 до 20 мкм складає 91–92 %.

При використанні в якості пиловловлювачів циклонів для таких умов ефективність пиловловлення складає 75–80 % [1–3]. Таким чином, відомі дослідження підтверджують перевагу використання вихрових апаратів для процесу «сухого» очищення газопилового потоку від пилу перед іншими типами апаратів для сухого очищення газопилового потоку. Однак типові конструкції вихрових пиловловлювачів не дозволяють проводити знепилення газів з ефективністю до 99 % для частинок пилу менше 20 мкм, що вимагає на практиці після пиловловлювача встановлювати додаткові апарати мокрої очистки.

Аналіз результатів досліджень, що наведені в роботах [1–3], показує, що розподіл компонентів швидкості потоку в сепараційній камері залежить від кута закрутки потоку в завихрювачі. Кут закрутки потоку, в свою чергу, залежить не тільки від кута нахилу лопаток завихрювача, але в головному від гідродинаміки і характеру обертання потоку в самому завихрювачі та зони близької до нього. В цих зонах згідно теоретичних засад і практики [4] у потоках, що обертаються, спостерігається практично в усіх випадках нерівномірний розподіл швидкостей у в'язкому газі, особливо при великих швидкостях на вході в завихрювач. Нерівномірний розподіл швидкостей по радіусу приводить до інтенсивної дисипації механічної енергії, до внутрішнього тепловидалення і до нерівномірного розподілу температури гальмування. Досягнення останніх умов, в залежності від фізико-

хімічних властивостей часток пилу, може сприяти одночасній коагуляції дрібних частинок пилу з утворенням більш крупних пилових агломератів, що досить швидко осідають. Останнє в тій чи іншій мірі спостерігалось при обробці газового потоку, який утримував до 10 г/нм^3 тонкодисперсного вугільного пилу ($<5 \text{ мкм}$) [5–11]. Використання особливостей гідродинамічного режиму обертання газопилового потоку в зоні завихрювача і відразу після нього для розв'язання задачі підвищення ефективності пилоочищення в вихровому апараті з виявленням особливостей механізму і руйнівних сил процесу є перспективною задачею.

5. Методи дослідження

Розглянемо процес сухого очищення пилогазового потоку у вихровому пиловловлювачі із зосередженим лопатевим вводом газу при різних конструкціях лопатевих завихрювачів.

Схема вихрового пиловловлювача з лопатевим завихрювачем, в якому проводили дослідження представлена на рис. 3.

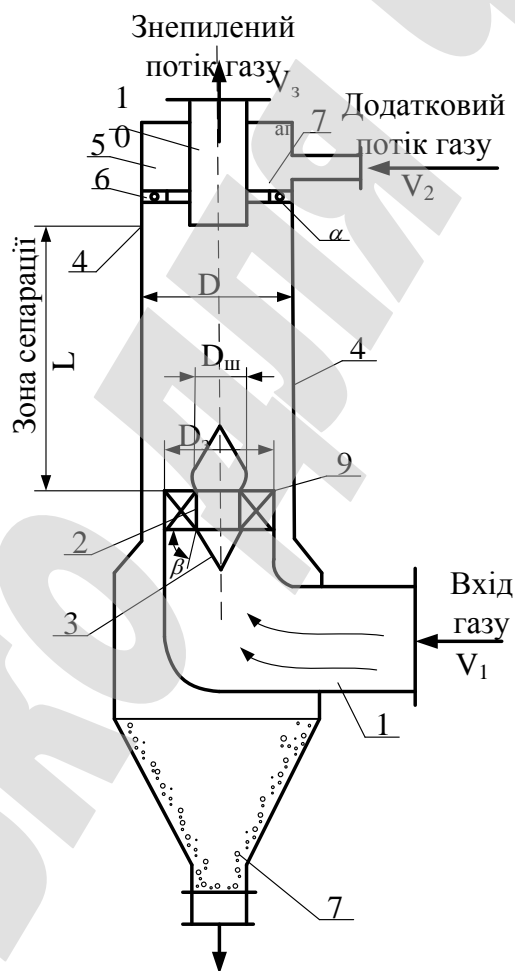


Рис. 3. Схема вихрового пиловловлювача із зосередженим лопатевим введенням газу

У газохід 1 надходить запилений газ і закручується лопатевим завихрювачем 2. Обтічник 3 трохи відтісняє потік до стінки апарата і сприяє плавному обтіканню

газовим потоком втулки лопатевого завихрювала. Під дією відцентрованої сили частинки пилу в закрученому газовому потоці переміщуються до стінок корпусу 4. Одночасно той же запылений або очищений після апарату газ подається в роздавальну камеру 5 і за допомогою завихрювала 6 (виконаний у вигляді шести сопел з нахилом 45°) надходить у робочу порожнину апарату.

Додатковий газовий потік, що виходить із завихрювала 6 підкручує основний потік у ту ж сторону, що й завихрював 2 і одночасно здуває частинки пилу зі стінок у бункер 7. Додатковий потік газу у ході спірального обтікання основного потоку, поступово повністю проникає в нього. Кільцевий простір навколо вхідного патрубку може бути оснащений пиловідбійною шайбою 9, яка призначена забезпечити безповоротний спуск пилу до вивантажувального пристрою (транспортеру). З бункеру пил надходить у ємність готової продукції, а очищений газ через вихлопний патрубок 10 в атмосферу.

Схема стенду для визначення аеродинамічних характеристик наведена на рис. 4.

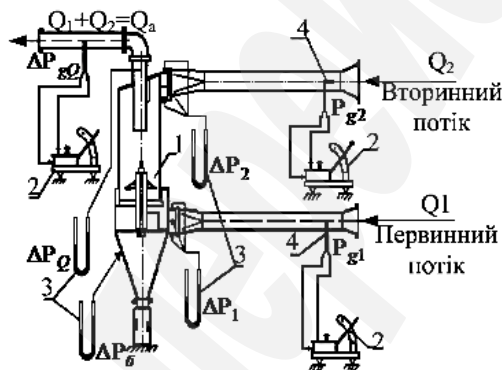


Рис. 4. Схема стенду з визначення аеродинамічних характеристик: 1 – модель рис. 3; 2 – мікроманометри з нахиленою шкалою; 3 – мікроманометри рідинні; 4 – пневмометрична трубка конструкції науково-дослідного інституту промислової і санітарної очистки газів

Схема стенду для визначення загальної ефективності пиловловлення наведена на рис. 5.

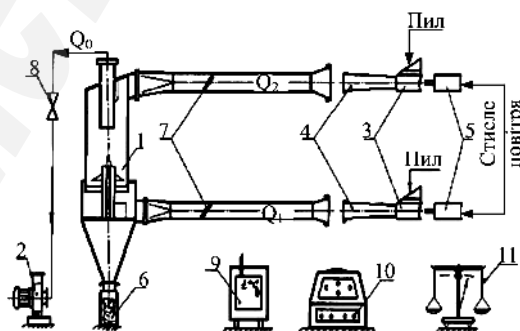


Рис. 5. Схема стенду з визначення загальної ефективності пиловловлення:

- 1 – модель рис. 3; 2 – вентилятор високого тиску ВВТ-5; 3 – система дозування пилу;
- 4 – дифузор; 5 – сопло стислого повітря; 6 – пилозбірник; 7 – регулятор витрати повітря (дросьельна заслінка); 8 – шиберна заслінка загального колектора; 9 – сушильна шафа;
- 10 – пульти керування; 11 – терези лабораторні

При конструюванні моделі рис. 3 розміри вихрового пиловловлювача вибиралися на основі відомих з практики найбільш раціональних параметрів: $L/D = 2.5 \div 3.5$; $D_3/D = 0.6 \div 0.8$; $D_{BT}/D_3 = 0.3 \div 0.5$; $D_{ш}/D = 0.5 \div 0.8$. Кут нахилу лопаток завихрювача $\beta = 30 \div 60^\circ$, кут нахилу сопел вторинного потоку $\alpha = 30 \div 45^\circ$. Було вибрано $D_3 = 5 \cdot 10^{-2}$ м; $D = 8 \cdot 10^{-2}$ м; $D_{BT} = 1.5 \cdot 10^{-2}$ м; $D_{ш} = 6.5 \cdot 10^{-2}$ м; $L = 24 \cdot 10^{-2}$ м.

Схема завихрювача наведена на рис. 6.

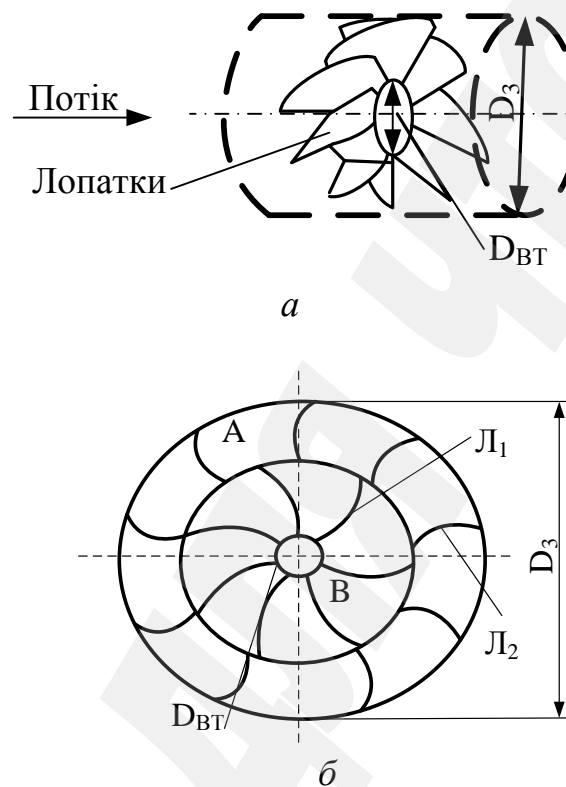


Рис. 6. Схема завихрювача: *a* – виготовленого з листової латуні; *б* – для організації коаксіальних турбулентних потоків закручених у протилежні сторони

Завихрювач виготовлений з листової латуні, товщиною $0.5 \cdot 10^{-3}$ м, кількість лопаток – 8. Другий тип завихрювача (рис. 6, *б* – проекція зверху) передбачав організацію коаксильних турбулентних потоків, закручених у протилежні сторони за рахунок лопаток. Відношення перетинів зовнішнього закручувача *A* та внутрішнього *B* приблизно було $A/B=1$. У газоході 1 рис. 3 завихрювач встановлювався як на торці газоходу на рівні шайби 9, так і нижче торця на відстанях, які вибиралися на основі досліджень відносних швидкостей по довжині циліндричної частини газоходу на рівні торця. На рис. 7 наведена схема замірів параметрів вихрового газового потоку в газоході 1.

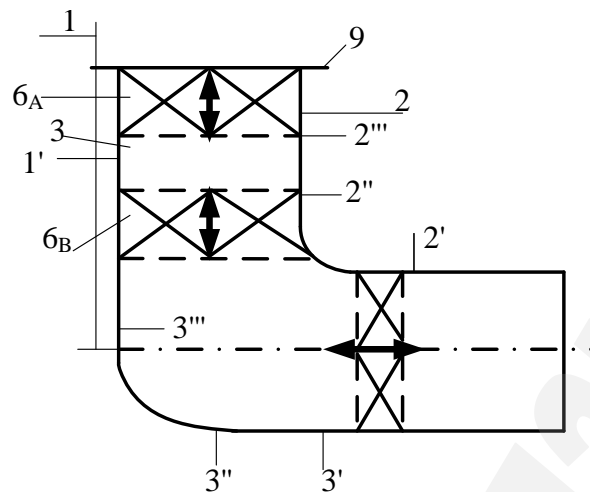


Рис. 7. Схема замірів параметрів вихрового газового потоку в газоході 1 в залежності від положення завихрювача: 6_A – завихрювач встановлений на торці вхідного газоходу на рівні шайби 9; 6_B – одно з можливих положень завихрювача 6, який встановлено нижче торця вхідного патрубка.

Позиції 1; 1'; 2'; 2''; 2'''; 3'; 3''; 3''', де встановлювалися датчики

Параметри вихрового потоку вимірювалися за допомогою трьох датчиків: двотрубчастий датчик з кутом нахилу зрізу трубок 70° для вимірювання двохмірного поля швидкостей; більшість вимірів проведено за допомогою циліндричного датчика, як найбільш простого при таруванні і роботі. Діаметр робочої частини датчика складав $3 \cdot 10^{-3}$ м. Для вимірювання трьохмірного поля швидкостей використовувався шарів п'ятиканальний датчик з діаметром шарика $5 \cdot 10^{-3}$ м. Тарування усіх датчиків проведено відповідно методикам, що наведені в [6]. Як відомо [1–4], закручений газовий потік після завихрювача є складним тримірним. Вектор швидкості потоку розкладається в циліндричній системі координат на три складові: основу, тангенціальну (обертальну) та радіальну. Наявність обертальної складової саме і приводить до виникнення в потоці відцентрованих сил і утворенню радіального градієнту статичного тиску. Для виконання проектних розрахунків необхідно знати кутову швидкість обертання потоку в довільному перерізі сепараційної камери на певній висоті у внутрішньому шарі. Рівняння моменту кількості руху газу визначається залежністю [1–4]:

$$M_1(Z) = \int_0^r \rho \cdot V_{s1} \cdot 2\pi \cdot r \cdot dr \cdot \omega_1(L) \cdot r^2. \quad (1)$$

Після інтегрування і відповідних перетворень здобуто рівняння для визначення кутової швидкості обертання потоку в сепараційній камері:

$$\omega(Z) = \frac{2M_{BX} \cdot r^2}{\rho(L_1 + L_2) \cdot r^4}, \quad (2)$$

де L_1, L_2 – витрати первинного та вторинного потоків, $\text{м}^3/\text{с}$;

$$L_1(Z) = L_1 + L_2 \left[1 - \left(1 - \frac{Z}{H} \right)^{k-1} \right];$$

$$L_2(Z) = L_2 \left[1 - \left(1 - \frac{Z}{H} \right)^{k+1} \right];$$

$$M_{BX} = 0,5 \cdot \pi \cdot \rho \cdot V_z \cdot V_\varphi \cdot r_0;$$

де K – емпіричний коефіцієнт (при $K=0$ радіальна швидкість розподіляється так як описано в теорії [1–4]; при $K \geq 0$ радіальна швидкість наростає до низу камери; а при $K \leq 0$ радіальна швидкість зменшується до низу камери);

r_0 – радіус сепараційної камери, розділення потоків;

V_z, V_φ, V_r – осьова, тангенціальна, радіальна швидкості руху потоків, м/с.

При цьому, треба відзначити, що в формулі для визначення M_{BX} швидкість V_φ відповідає тангенціальній складовій обертаємого потоку, яка спостерігається зразу за завихрювачем і в перетині близько до нього. Таким чином при інших рівних умовах значення $w(Z)$ залежить від складової V_φ , яка в свою чергу однозначно залежить від гідродинамічних умов в зоні завихрювача і зразу після нього. Останнє додатково обґрунтовує актуальність і мету дослідження. При проведенні дослідження під час холодних продувок чистим повітрям газоходу (який представляє собою трубу з оргскла з прямою ділянкою від торця до коліна та дорівнює 0,6 м) вимірювання проводилося після завихрювача у трьох перетинах:

$$I - 1,6 h_i/D_3; \quad II - 3 \cdot h_i/D_3; \quad III - 4,5 \cdot h_i/D_3,$$

де h_i – відстань від завихрювача до торця газоходу. При дослідженнях двофазного потоку в моделі пиловловлювача (рис. 3) було прийнято наступні припущення:

– частинки пилу є твердими, можуть взаємодіяти між собою за рахунок інтенсивного зіткнення і розвинутої питомої поверхні часток тільки в зоні завихрювача, де спостерігаються максимальні значення V_φ та V_r і спостерігається квазітверде обертання пилогазового потоку;

– після області (зони) завихрювача частинки не взаємодіють між собою;

– частинка, що торкнулася до стінки корпусу сепараційної камери, вважається вловленою;

– на вході в пиловловлювач потік пилогазового потоку має рівномірне поле швидкостей;

– розподіл частинок пилу по перерізу вхідного патрубку пиловловлювача є рівномірним;

– опір руху частинок у газовому середовищі описується законом Стокса;

– тангенціальна складова швидкості частинок співпадає з тангенціальною і осьовою складовими швидкості обертання газового потоку,

радіальні швидкості у наслідок дії сил інерції є різними.

При цьому виділяються два безрозмірних параметри:

– ступінь початкової закрутки потоку:

$$\eta = V_{\varphi 0} / z_{\varphi},$$

де $V_{\varphi 0}$ – характерна тангенціальна швидкість на виході з завихрювача ($V_{\varphi 0} \geq 0$), при цьому в ядрі потоку що виходить з завихрювача (В, рис. 6, б) $\omega = V_{\varphi 0}$, а на виході з завихрювача (А, рис. 6, а) $\omega = -V_{\varphi 0}$;

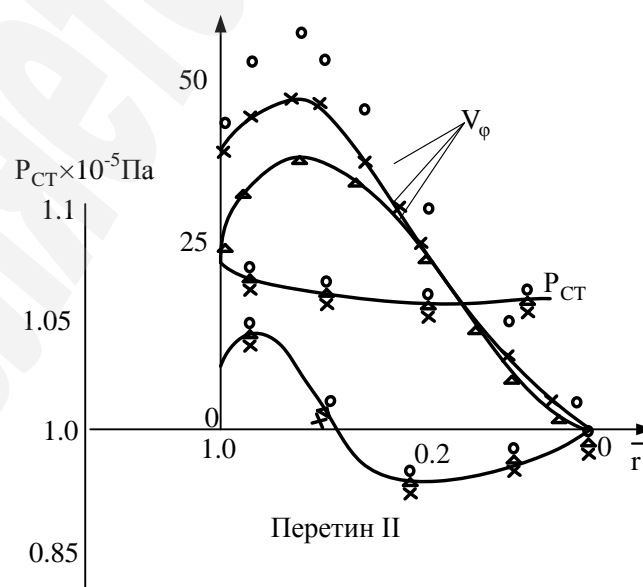
– ступінь завантаження каналу $\varphi = D_{BT}/D$. Початковими умовами є характеристики повітряного середовища та пилу: температура повітря 293 К, середній діаметр частинок пилу: вапно (CaO) – $2 \div 20$ мкм; гідрат оксиду кальцію $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ – $0,5 \div 10$ мкм; оксид цинку (ZnO) – $0,5 \div 15$ мкм. Густина: повітря – $1,205 \text{ кг/м}^3$, CaO – 3360 кг/м^3 , $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – 2240 кг/м^3 , ZnO – 2850 кг/м^3 .

Граничні умови:

1) середньо-витрачальна швидкість V_{BX} пилу повітряного потоку на вході в пиловловлювач стабільна і підтримувалася в інтервалі $40 \div 80$ м/с, що відповідало витратам повітря відповідно: $G = 13,4 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$ та $G = 55,0 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$. При вказаних витратах та швидкостях число Рейнольдса (Re) складало $Re \approx 10^5 \div 10^6$.

Порівнюючи завихрювачі з різними кутами нахилу лопатей (рис. 6), треба відмітити, що при дослідженні V_{BX} швидкість $V_{\varphi}(r)_{max}$ розширюється для різних кутів нахилу лопатей і досягає максимуму, коли V_{BX} найбільша.

На рис. 8, б показано розподіл $V_{\varphi}(r)$, $V_z(r)$, $P_{cm}(r)$ для різних витрат газу при зберіганні швидкості входу в завихрювач. З рис. 8, б добре видно, що аеродинамічні характеристики течії з кутом нахилу $\beta = 45^\circ$ покращується. Так відношення для кута $\beta = 45^\circ$ складає $V_{\varphi}(r)_{max}/V_{BX} \approx 0,73$, а для $\beta = 30^\circ$ це відношення дорівнює $V_{\varphi}(r)_{max}/V_{BX} \approx 0,46$, розрідження по центру відповідно $0,87 \cdot 10^5$ і $0,97 \cdot 10^5$ Па.



а

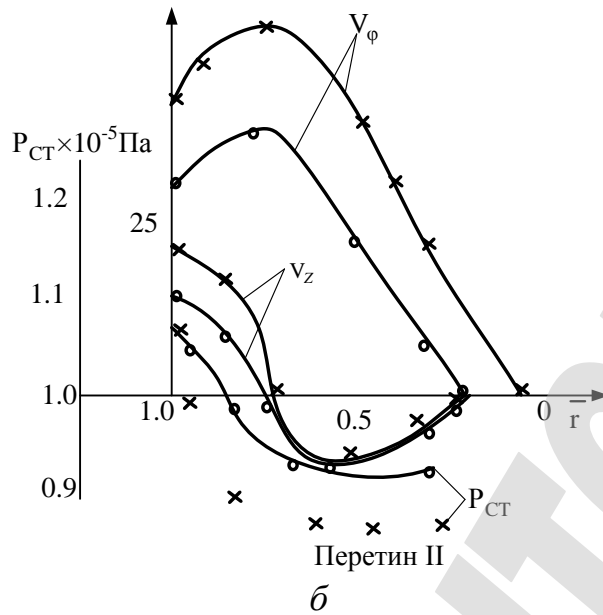


Рис. 8. Розподіл $V_\varphi(r)$, $V_z(r)$, $P_{cm}(r)$ в залежності від кута нахилу лопаток завихрювача для витрати повітря: $a - G=40 \cdot 10^{-3}$ кг/с; $\times - \beta=60^\circ$; $\circ - \beta=45^\circ$; $\blacktriangle - \beta=30^\circ$; $b - G=13.5 \cdot 10^{-3}$ кг/с; $\times - \beta=45^\circ$; $\circ - \beta=30^\circ$

На рис. 9 представлені типові розподіли $V_\varphi(r)$, $V_z(r)$, $P_{cm}(r)$ для витрат газу $G=40 \cdot 10^{-3}$ кг/с для різних перетинів по довжині каналу.

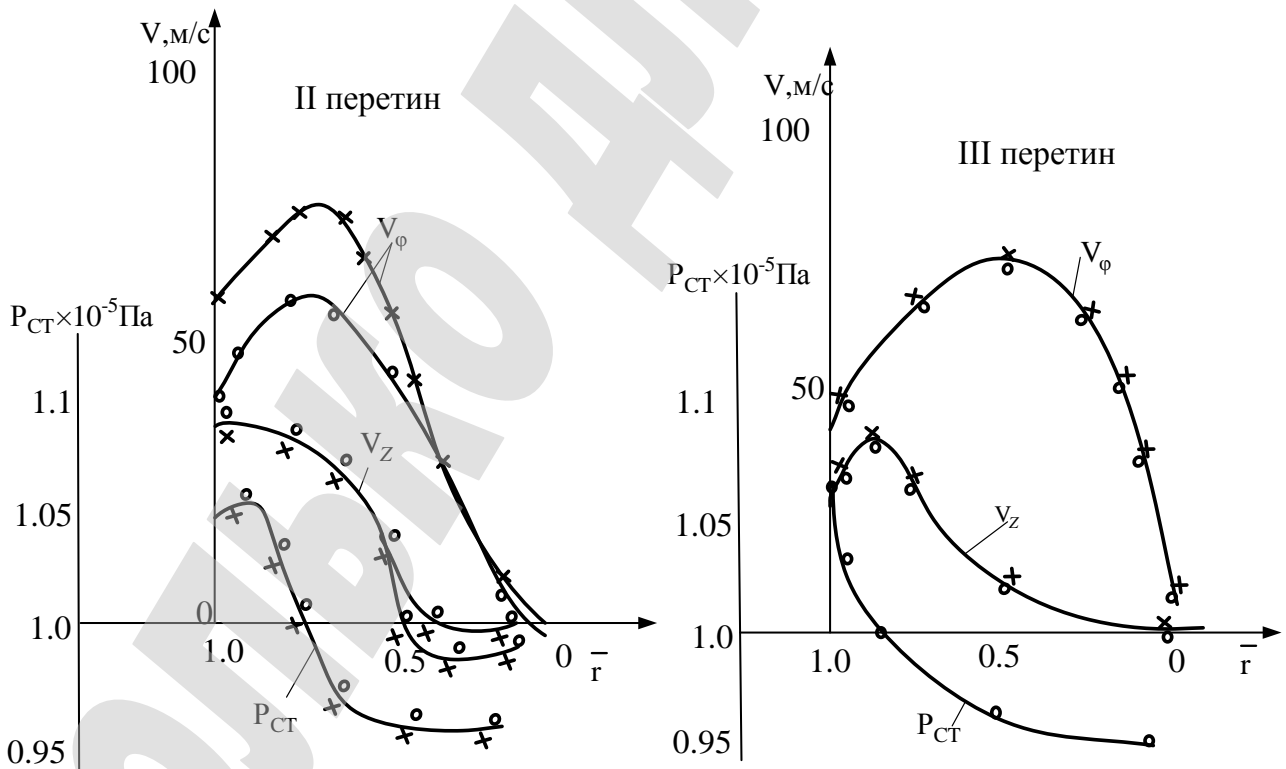


Рис. 9. Розподіл $V_\varphi(r)$, $V_z(r)$, $P_{cm}(r)$ у різних перетинах $G = 40 \cdot 10^{-3}$ кг/с; $\times - \beta=45^\circ$; $\circ - \beta=30^\circ$

Провівши аналіз кривих розподілу, що наведені на рис. 8, 9, можна стверджувати, що після завихрювача в газоході майже до II перетину обертання потоку проходить як квазітверде. Тобто виконується закон $V_\varphi = Cr$, і тільки біля самої стінки газоходу розвивається досить тонкий прикордонний шар. Спостерігаються також зони зворотних течій, при чому в перетині близькому до завихрювача вони мають кільцеподібний вигляд. Далі по потоку розподіл $V_\varphi(r)$ стає іншим, зона квазітвердого обертання скорочується, зменшується абсолютна величина $V_\varphi(r)$ за рахунок тертя потоку газу о стінки і внутрішнього тертя між шарами газу, зростає прикордонний шар. Дещо змінюється і характер розподілу аксіальної швидкості $V_z(r)$. Осьовий потік в перетинах після завихрювача притиснутий до стінки, і основна маса газу тече на $1/3$ радіусу. Далі по ходу потік розширюється, займає вже $2/3$ радіусу. Розподіл статичного тиску $P_{cm}(r)$ в перетині II суттєво відрізняється від розподілу $P_{cm}(r)$ в перетині III. В той же час, в перетині II спостерігається досить велика зона постійного зниження тиску, яка займає майже половину діаметра. Далі по потоку в перетині III ця зона звужується і займає вже $1/5$ частину діаметру. Таке звужування, а також малий прокольний градієнт по негативному тиску в центрі, певно, і є причиною виникнення зворотних течій. Перехід $P_{cm}(r)$ через нульову лінію, завжди відповідає точці, де V_φ має максимальне значення.

На рис. 10 показано розподіл $V_\varphi(r)$, $V_z(r)$, $V_r(r)$, $P_{cm}(r)$ в двох перетинах по довженні газоходу після завихрювача, що виміряні шаровим датчиком.

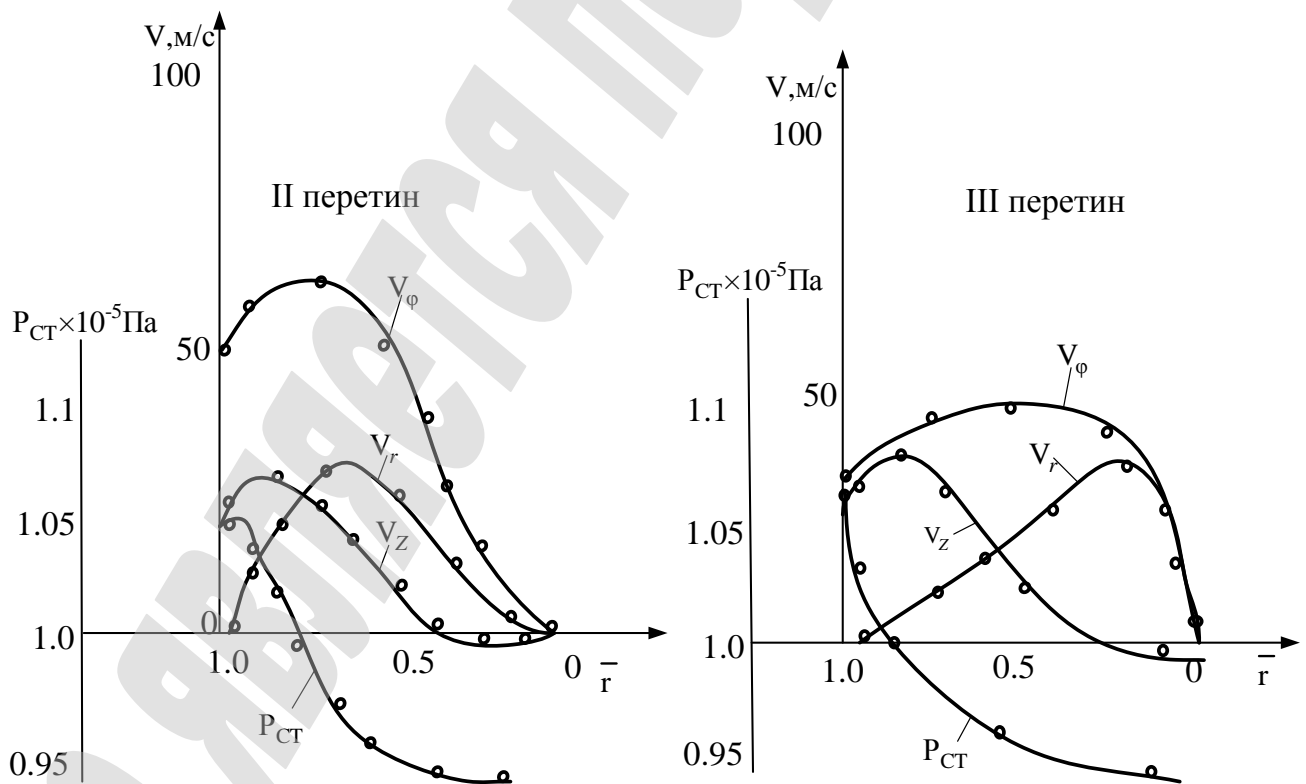
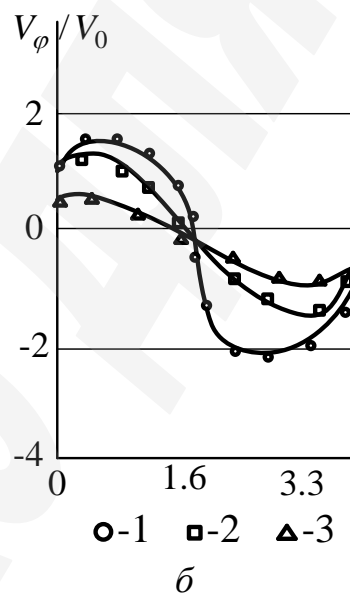
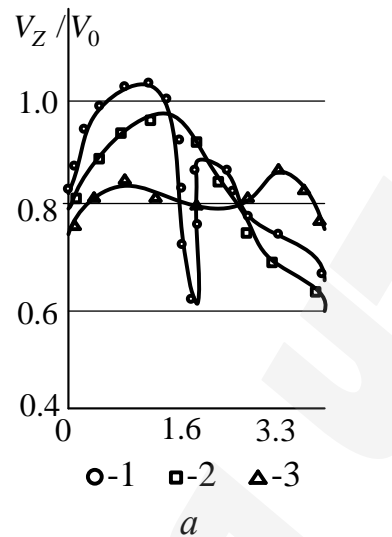


Рис. 10. Розподіл $V_\varphi(r)$, $V_z(r)$, $V_r(r)$, $P_{cm}(r)$ по довженні каналу газоходу після завихрювача: $G = 40 \cdot 10^{-3}$ кг/с, $V_{ВХ} = 80$ м/с, шарів датчик, $\beta = 45^\circ$

На рис. 11 в якості прикладу наведені результати вимірів осереднених осьової та тангенціальної складових швидкості і пульсаційної складової, при використанні завихрювача (рис. 6, б) з установкою лопаток завихрювачів по внутрішньому та зовнішньому контурах відповідно на кути $\beta_1=45^\circ$ і $\beta_2=45^\circ$. Середні кути закрутки потоків на вході в робочу частину були при цьому на 10–15 % більше.



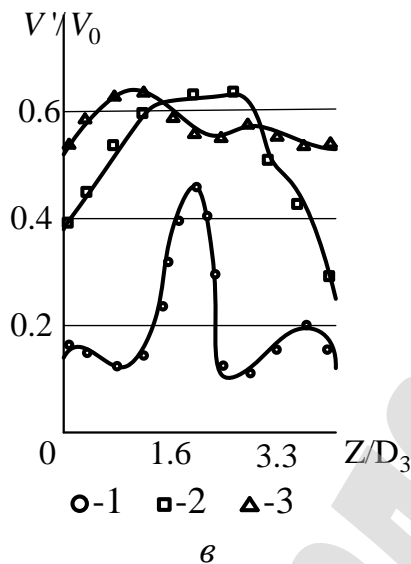


Рис. 11. Експериментальні профілі: *a* – вісьової V_z ; *б* – тангенціальної V_φ ; *в* – пульсаційної V' складових швидкості в перетинах I–III, $V_0 = V_{BX}$

Виміри проводилися відповідно по перетинам:

I перетин $Z/D_3 = 0$ (тобто зразу за завихрювачем);

II перетин $Z/D_3 = 1,6$ $Z = 0,08$ м;

III перетин $Z/D_3 = 3,3$ $Z = 0,165$ м.

При цьому швидкість $V_{BX} = 50$ м/с, $G = 26 \cdot 10^{-3}$ кг/с, $Re \approx 10^5$.

З рис. 11 видно, що на відстані близько $Z/D_3 = 3,3$ ($0,165$) від завихрювача потоки практично повністю змішані, що відображено вирівнюванням профілю вісьової складової швидкості і суттєвим затуханням тангенціальної складової. Генерація турбулентних пульсацій проходить близько межі розділу потоків, що можна пояснити наявністю радіального градієнта тангенціальної складової, осередненої швидкості. Максимальне значення турбулентних пульсацій швидкості досягається на відстані $Z/D_3 = 2,5$ від завихрювача і складає приблизно 20 % від максимальної різниці тангенціальної компоненти швидкості.

Для порівняння ефективності завихрювачів що розглядаються (рис. 6, *a*, *б*) з точки зору генерації максимальної величини енергії турбулентності K_m , яка визначається:

$$K_m = 0,04 \cdot \frac{V_z}{\alpha^2}; \quad \frac{K_{ma}}{K_{mb}} \leq \frac{1}{4 \cdot (1 - \alpha)^2}, \quad (3)$$

де $\alpha = F_1/F_2$; F_1 – сумарна площа отворів між лопатками.

Провівши аналіз формули (3), можна стверджувати, що при $\beta = 45^\circ$ ($\alpha < 0,5$) і однакових втратах максимальна величина енергії турбулентності вище при використанні завихрювача (рис. 6, *б*).

6. Результати досліджень

Наведені експериментальні дані по гідродинаміці при використанні двох типів завихрювачів (рис. 6, *a*, *б*) дозволяють передбачити, що в зоні максимальних швидкостей V_φ і V_r після завихрювачів можливе протікання

процесу агломерації часток пилу за рахунок інтенсивного їх зіткнення.

Крім того, щоб здобути максимальне значення кутової швидкості обертання газового потоку в сепараційній камері вихрового пиловловлювача (2) необхідно використовувати завихрювачі з $\beta=45^\circ$ і встановлювати його нижче торця газоходу (або шайби 9, рис. 3) на відстані $Z/D_3 = 1.6$, $Z \approx 0.08$ м. Ця зона квазітвердого обертання потоку, тобто зона, де досягається максимальне значення $V_\phi(r)$, $V_r(r)$ і максимальний коефіцієнт швидкості $K=V_{\phi_{max}}/V_{BX}$. Саме при вказаних параметрах на моделі (рис. 3) з використанням стенду (рис. 5) визначалася загальна ефективність пиловловлювання з використанням в якості пилу вище вказаних речовин. Дозування вказаних речовин в потік повітря було приблизно постійним і дорівнювало концентрації часток пилу в потоці на рівні $7 \div 8$ г/м³.

В табл. 1 наведені осереднені результати досліджень по ефективності пиловловлення вихровим апаратом, який модернізований згідно рекомендацій наведених вище.

Таблиця 1

Ефективність пиловловлення вихровим апаратом з завихрювачем (рис. 6, а, б)

№	Витрати газопилового потоку на вході, кг/с 10^{-3}	Тип пилу та концентрація на вході, г/м ³	Характеристика пилу на вході			Показники на виході з апарату			
			Густина, кг/м ³	Питома поверхня, м ² /г	Дисперсність, мкм, (середній розмір, мкм)	Середній розмір часток на вході, мкм	Концентрація пилу на виході г/м ³	ГДК санітарно-захисної зони, долі	Ефективність пиловловлювача, %
Завихрювач (рис. 6, а)									
1	40,0	Ca(OH) ₂ , 7 г/м ³	2240	8,0	0,5–10,0 (5,0)	35±2	0,21	0,43	97,0
2	40,0	CaO, 7 г/м ³	3360	3,0	2,0–20,0 (10,0)	20±5	0,30	0,62	96,0
3	40,0	ZnO, 7 г/м ³	2850	10,0	0,5–15,0 (5,0)	50±5	0,14	0,29	98,0
Завихрювач (рис. 6, б)									
1	40,0	Ca(OH) ₂ , 7 г/м ³	2240	8,0	0,5–10,0 (5,0)	42±3	0,10	0,2	98,5
2	40,0	CaO, 7 г/м ³	3360	3,0	2,0–20,0 (10,0)	22±1	0,07	0,14	99,0
3	40,0	ZnO, 7 г/м ³	2850	10,0	0,5–15,0 (5,0)	55±2	0,06	0,1	99,2

Як видно з даних, наведених в табл. 1, прогнозуємо результати відносно підвищення ефективності вихрового пиловловлювача за рахунок агломерації частинок пилу. Досягнення максимальних значень складових швидкостей $V_\phi(r)$, $V_r(r)$ на виході з завихрювача підтверджуються при експлуатації модернізованого вихрового апарату.

7. SWOT-аналіз результатів досліджень

Strengths. Перспективним є створення та розвиток нових

високоєфективних та більш вдосконалених типів газоочисного обладнання на основі теоретичного обґрунтування і дослідження процесу розділу фаз, виділення частинок пилу в системах з обертовими потоками. Аналіз здобутих результатів досліджень конструкції завихрювача вхідного потоку на гідродинаміку і ефективність роботи апарату та на процес пиловловлення свідчить про доцільність використання вихрових апаратів як високоєфективних пиловловлювачів для сухого очищення газів. Показано, що при реалізації процесу очищення вихлопних газів для лопатевого завихрювача традиційної конструкції з закруткою потоку в одну сторону, найбільш ефективний кут нахилу лопаток відповідає 45° . Завихрювач слід встановлювати в газоході від торцевого виходу в сепараційну камеру нижче на $1,4 \div 1,6$ діаметра завихрювача.

Weaknesses. В роботі були досліджено гідродинаміку і ефективність роботи вихрового апарату та процес пиловловлення. Через технологічну складність процесу вловлювання полідисперсного пилу недостатньо розглянуті питання математичного моделювання процесу сепарації частинок пилу в системі зустрічних закручених потоків. Також не досить ретельно розглянуто вплив на процес сепарації фізико-хімічних властивостей пилу, і як наслідок – відсутність надійної інженерної моделі вибору і розрахунку вихрових пиловловлювачів з циліндричною сепараційною камерою. Не досить повно розглянуті питання напрямів конструктивного удосконалення та компоновки раціональної технологічної схеми процесу вловлювання. Пиловловлювач містить газопровід забрудненого газу і як результат експлуатації утворюються значні об'єми дрібнодисперсного пилу, які необхідно утилізувати використовуючи додаткове обладнання.

Opportunities. Впровадження вихрових апаратів в якості очисного обладнання на промислових підприємствах дозволить знизити промисловий негативний вплив на навколишнє природне середовище, а саме на атмосферу. Немаловажним є питання щодо зменшення загрози глобальних наслідків шляхом впровадження інженерних рішень з метою очищення викидів дрібнодисперсних аерозолів.

Threats. Запропонована принципова конструкція вихрового пиловловлювача, яка дозволяє підвищити ефективність очистки за допомогою вихрового апарату до 98–99 %, буде містити капітальні затрати на розробку, математичний аналіз, і на матеріали для апарату, але капітальні затрати для підприємства будуть одноразові.

8. Висновки

1. Досліджено вплив конструкції завихрювача і місця його установки в газоході подачі газопилового потоку на ефективність роботи вихрового апарату для вихрових пиловловлювачів з циліндричною сепараційною камерою. Показано, що аеродинамічні процеси, що обумовлюють характер обертання потоку і його течії в газоході після завихрювача, досягає максимально можливої для даної конструкції кутової швидкості обертання газового потоку в сепараційній камері. Ця швидкість однозначно пов'язана з максимально можливими значеннями складових $V_\phi(r)$, $V_r(r)$ швидкостей, які досягаються в зоні завихрювача.

2. Встановлено, що лопатевий завихрювач, який передбачає організацію в

газоході коаксильних турбулентних потоків, закручених в протилежні сторони дозволить проводити більш ефективну агломерацію часток пилу. За результатами досліджень розроблена принципова конструкція вихрового пиловловлювача, яка дозволяє підвищити ефективність очистки за допомогою вихрового апарату до 98–99 %.

3. Встановлено характерні режими течії газопилового потоку у газоході зразу після завихрювача в залежності від його конструкції. Показано, що для лопатевого завихрювача традиційної конструкції з закруткою потоку в одну сторону, найбільш ефективний кут нахилу лопаток відповідає 45° , а його установка в газоході необхідна від торцевого виходу в сепараційну камеру нижче на $1,4\div 1,6$ діаметра завихрювача. В цих умовах перед виходом газопилового потоку в сепаратор проходить агломерація часток пилу і на виході газопилового потоку з торця газоходу в сепараційний простір, який має максимально можливі компоненти $V_\phi(r)$ і $V_r(r)$, що забезпечують максимальне значення кутової швидкості потоку в сепараторі.

Література

1. Halich, R. V. Konstruktivnoe usovershenstvovanie vihrevykh apparatov so vtorichnymi zakruchenniami potokami [Text] / R. V. Halich, R. V. Yakuba, V. I. Sklabinskii, V. Ya. Storozhenko // Khimichna promyslovist Ukrainy. – 2013. – No. 3. – P. 75–83.
2. Akhesmeh, S. Numerical Study of the Temperature Separation in the Ranque-Hilsch Vortex Tube [Text] / S. Akhesmeh, N. Pourmahmou, H. Sedgi // American Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2008. – Vol. 1, No. 3. – P. 181–187. doi:10.3844/ajeassp.2008.181.187
3. Halich, R. V. Vplyv vykhidnykh prystroiv na hidrodynamiku i efektyvnist vykhrovykh pylovlovliuvachiv [Text]: PhD thesis / R. V. Halich. – Sumy, 2014. – 27 p.
4. Pourmahmound, N. Numerical investigation of the termal separation in a vortex tube [Text] / N. Pourmahmound, S. Akhesmeh // Proceedings of world academy of science, engineering and technology. – 2008. – Vol. 33. – P. 409–415.
5. Pavlychenko, A. V. Rozrobka sposobiv znyzhennia rivnia ekolohichnoi nebezpeky vid pylovykh vykydiv v vuhilnykh shakhtakh [Text] / A. V. Pavlychenko, V. Ye. Kolesnyk // Geo-Technical Mechanics. – 2016. – No. 127. – P. 141–150.
6. Nezhad, H. Numerical three-dimensional analysis of the mechanism of flow and heat transfer in a vortex tube [Text] / H. Nezhad, R. Shamsoddini // Thermal Science. – 2009. – Vol. 13, No. 4. – P. 183–196. doi:10.2298/tsci0904183n
7. Kolesnyk, V. Ye. Sposoby i zasoby pidvyshchennia ekolohichnoi bezpeky skydu shakhtnykh vod v poverkhnevi vodoimy [Text]: Monograph / V. Ye. Kolesnyk, T. I. Dolhova, D. V. Kulikova, A. V. Pavlychenko. – Dnipro: Litohraf, 2016. – 132 p.
8. Halich, R. V. Razrabotka i vnedrenie vihrevykh pileulovitelei so vstrechnymi zakruchennymi potokami [Text] / R. V. Halich, A. R. Yakuba, V. I. Sklabinskii, V. Ya. Storozhenko // Himicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie. – 2014. – No. 3. – P. 12–15.

9. Kolesnyk, V. E. Sposoby i zasoby pidvyshchennia ekolohichnoi bezpeky masovykh vybukhiv v zalizorudnykh karierakh za pylovym chynnykom [Text] / V. E. Kolesnyk, A. A. Yurchenko, A. A. Lytvynenko, A. V. Pavlychenko. – Dnipropetrovsk: Litohraf, 2014. – 112 p.

10. Zuikov, A. L. Raspredelenie azimutal'nyh skorostei v laminarnom kontrvihrevom techenii [Text] / A. L. Zuikov, G. V. Orehov, V. V. Volshanik // Vestnik MGSU. – 2013. – No. 5. – P. 150–161.

11. Kalashnik, M. V. Tsiklotroficheskoe prispoblenie v zakruchennykh gazovykh potokakh i vihrevoi effekt Ranka [Text] / M. V. Kalashnik // ZhETF. – 2008. – Vol. 133, No. 4. – P. 935–947.