

## ДОСЛІДЖЕННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ ВИХРОВОЇ ТРУБИ ПРИ ПОДАЧІ В ТРУБУ ДИСПЕРСНОГО ПОТОКУ (ГАЗ-ЧАСТИНКИ ПИЛУ)

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

### 1. Вступ

Сучасна техніка знепилення технологічних та аспіраційних газових викидів базується на комбінованих технологічних схемах газоочищення, які включають сухі та мокрі пиловловлювачі. Газові викиди містять дисперсну фазу (пил) до  $200 \text{ г/нм}^3$ , а також токсичні газоподібні речовини ( $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ ,  $\text{HCl}$  та ін.) в відносно невеликих концентраціях (до  $150 \text{ мг/нм}^3$ ). Вищезначені схеми особливо поширені у випадках якщо технологічні газові викиди мають високу температуру (більше  $373 \text{ K}$ ) [1, 2].

На стадії сухого пиловловлювання в якості апаратів використовують циклони, мотоколони. На стадії мокрого очищення використовують апарати, в яких очищення засновано на промиванні газу рідиною (водою) при більш розвиненій поверхні контакту часток аерозолу з рідиною та інтенсивним змішуванням фаз. До останніх апаратів відносяться: насадкові скрубери, відцентровані скрубери, труби Вентурі, пінні апарати та інші [1, 2].

Недоліки апаратів та процесів очищення газових викидів на кожній стадії відомі [1–3]. Циклони різних конструкцій не спроможні вловлювати частинки пилу менше  $20 \text{ мкм}$  [4, 5]. Важливим є питання про найбільш ефективні форми циклону та його оснастка (бункер, патрубок вводу-виводу газу та інше) вирішуються більше емпіричним шляхом [4, 5]. Щодо другої стадії, то мокрі пиловловлювачі складні конструктивно, потребують значні енергетичні витрати, а також потребують використання води в залежності від типу пиловловлювача до  $10 \text{ л/нм}^3$ . В результаті експлуатації утворюються значні об'єми промислових стоків, які необхідно утилізувати використовуючи додаткове обладнання [1–3].

На даний час, одним з перспективних напрямів досліджень щодо технології і апаратури знепилення технологічних та аспіраційних газових викидів вважається розвиток теорії відцентрованого вловлювання твердих часток з газових викидів. Також перспективним напрямком є розвиток наукових розробок в частині апаратного оформлення [4–7]. Це робиться з метою підвищення ефективності сухого очищення газових викидів. Всі вдосконалення в частині апаратного оформлення можливо розділити на наступні три групи. Перша група – при підводі запиленого потоку в апарат (вхідний патрубок). Друга група – сам корпус апарата (циклон, вихрові труби, вихрові камери, газові центрифуги, що працюють за рахунок дії сил Лоренца, при протіканні радіального електричного току поперек силових ліній магнітного поля). Третя група – при відводі очищеного повітря з апарату (вихідний патрубок чистого повітря) і пил (бункер і вихідний патрубок для виділеного з нього пилу).

Згідно вищенаведеної класифікації очевидно, що основним є тип та конструктивні особливості апарату. Це пов'язано з тим, що останні визначають

умови течії газового потоку (гідродинаміку, термодифузійний розподіл часток в газовому потоці та інше) і відповідно ефективність видалення пилу. Згідно сучасних уявлень та практику, високу ефективність пиловловлювання можливо досягти при використанні відцентрованих інерційних апаратів, в яких реалізуються вихрові закручені потоки [8, 9]. В таких потоках сумарний коефіцієнт розділення газових молекул і часток є наслідком декількох процесів:

- відцентрованого розділення;
- термодифузійного розділення;
- за рахунок збільшення просторової неоднорідності при протіканні хімічної реакції; за рахунок утворення відносно крупних часток (молекулярних кластерів і агломерації пилу) в зоні реакції.

Основну роль при цьому має значення коефіцієнту відцентрованого розділення, який експоненційно залежить від відносної різниці мас і відношення кінетичної енергії обертання до теплової енергії потоку газу – відцентрованого параметру:

$$\theta = Mv/T,$$

де  $M$  – маса молекул і часток в газовому потоці;  $v$  – дрейфова швидкість газового потоку;  $T$  – термодинамічна температура.

Експоненційна залежність свідчить про те, що майже невелике зростання цього параметру призводить до значного збільшення ступеню розділення. Якщо дисперсійний газовий потік обертається інтенсивно, то частки аерозолі (пилу), що мають більшу масу ніж молекули газу несучого осередка, будуть рухатися вздовж стінок апарату. Стосовно більш легких газових молекул – вони будуть знаходитись в центрі робочої камери.

Перерозподіл часток з різними масами – це процес дифузійний і характерний час розділення є обернено пропорційний коефіцієнту дифузії, який змінюється з температурою як  $1/\sqrt{T}$ . Тому градієнти температур, які виникають в вихрових закручених потоках, а також температура несучого осередку будуть впливати на перерозподіл мас по радіусу камери і на коефіцієнт розподілу.

Виходячи з вищезначеного, стає зрозумілим можливість впливу за рахунок протікання хімічних реакцій в потоці і утворення відносно великих часток пилу за рахунок агломерації.

З переліку типів апаратів для процесу сухого очищення вихлопних газів від аерозолі, що наведені раніше по тексту, найбільш ефективним є вихрова труба. Такий висновок зроблено тому, що в ній аеродинамічна ситуація призводить до виникнення ефекту Ранка. Це ефект перерозподілу повної енергії в потоці, що обертається в залежності від відповідної зміни динамічної структури потоку в залежності від енергетичної структури. Вказана аеродинамічна ситуація виникає при рухливості обертаємого двохфазного потоку при  $Re \geq 10^5$  [8, 9].

Дослідження функціонування вихрових труб, в яких робочим тілом є газ-аерозоль (система газ-тверде), в літературних джерелах відсутні, крім загальних вказівок щодо можливості використання вихрових труб для вказаної мети [10].

Викладене вище обумовлює актуальність досліджень процесів «сухого»

пилоочищення і їх теоретичного обґрунтування з урахуванням вищезначених впливових параметрів. До цих параметрів слід віднести:

- геометрію та конструкцію відцентрованого апарату;
- вплив вхідних параметрів газового потоку і хімічного складу часток пилю на їх розподіл в потоці;
- можливість агломерації;
- можливість хімічної взаємодії з газовими компонентами, які входять в склад газового потоку крім часток пилю.

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

Об'єктом дослідження є функціонування вихрової труби при подачі в неї однорідного газу. На основі відомих літературних джерел [11–13] розглянемо ефект енергетичного розділення, характер поля температур, структуру потоків в різних перетинах вихрової труби. На рис. 1 наведена принципова схема вихрової труби.

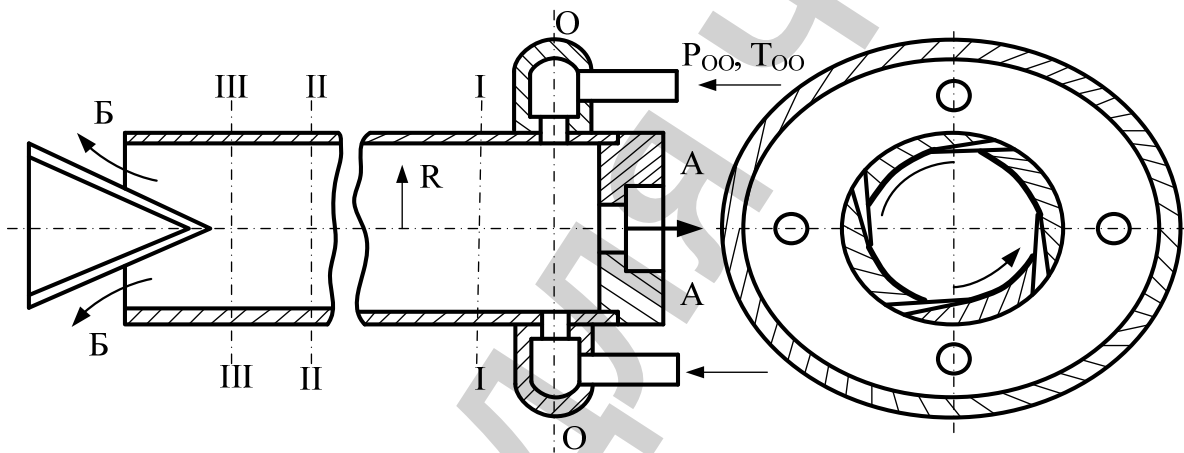


Рис. 1. Принципова схема вихрової труби

До вихрової труби газ підводиться соплами під тиском (перетин 0–0 на рис. 1) і створює в середині труби обертаємий потік. З одного боку (в перетині А–А) потік виходить через отвір, розташований на вісі труби. На протилежному боці труби вихідний отвір виконано у вигляді кільцевої щілини розташованої на периферії (перетин Б–Б). Як показують дослідження, газ, що витікає крізь центральний отвір в перетині А–А, має значно нижчу температуру гальмування, ніж на периферії в перетині Б–Б. Найбільш низька температура гальмування, на вісі відповідає перетину І–І. Отже, в такій трубі проходить температурний розподіл газового потоку, при цьому через центральний отвір виходить охолоджений газ. Профілі швидкостей у різних перетинах показують, що в трубі проходить інтенсивна перебудова потоку: швидкості до периферії інтенсивно зменшуються к перетину Ш–Ш, а в ядрі на вісі декілька зростають. Нерівномірний розподіл швидкостей по радіусу є причиною інтенсивної дисипації механічної енергії, внутрішнього тепло-виділення і нерівномірного розподілу температур гальмування. Питомою холодопродукційністю  $q_x$  при функціонуванні труби вважається кількість тепла, що віднесена до маси протікаючого газу  $M_o$ , яке відняте від холодного потоку  $M_x$  і відповідно передано гарячому потоку  $m_r$ :

$$q_x = BC_p \Delta T_{OX} = (1 - B) C_p \Delta T_r;$$

$$B = \frac{m_x}{m_o} \times \frac{Q_x}{Q_o} \times \Delta T_{OX} = T_{OO} - T_{OX};$$

$$\Delta T_r = T_{Or} - T_{Oo}.$$
(1)

Як видно, функція  $q_x(B)$  має максимум при  $B=0,6$ . Робочим діапазоном вихрових труб, виходячи з літературних даних [11–13], вважається діапазон від 0,2 до 0,8. Для порівняльної оцінки якості вихрових труб при охолодженні газу використовують коефіцієнт температурної ефективності:

$$\eta = \Delta T_{OX} / \Delta T_{OS},$$
(2)

де  $\Delta T_{OS}$  – температурний перепад у процесі ізоентропійного розширення від початкових параметрів до параметрів холодного потоку на виході.

Як відомо з джерел [11–13], в середині вихрової труби спостерігається дві форми закрученої течії. Профіль навколишньої зворотної течії близький до квазітвердого типу обертання (зона I–O–A), а периферійна зона (перетин II–III–B) – до квазіпотенційного типу обертання.

Інтенсивний перерозподіл енергії і температури потоку спостерігається в зоні I–O. В роботах [14, 15] було встановлено, що при введенні в потоці газу аерозолю (часток пилу, або крапель рідини) останні змінюють рівень швидкостей, але не змінюють характер розподілу швидкостей. Крім того, зміна профілей тангенціальних швидкостей практично не впливає на траєкторію руху аерозольної частинки, якщо при цьому остається постійним середній рівень швидкостей [14, 15].

Таким чином, можна вказати, що вищеописані явища, які спостерігаються у вихрових трубах при подачі однорідного газу, будуть спостерігатися і при подачі в неї дисперсного потоку. Тому складений коефіцієнт розділення часток і газових молекул у вихровій трубі може бути значно більшим ніж, наприклад, у циклонах.

### 3. Мета і задачі дослідження

*Мета дослідження* – дослідження процесу пиловловлювання у вихрових трубах і визначення ефективності процесу сухого очищення газів; доцільність використання вихрових труб, як високоефективних пиловловлювачів для сухого очищення газів. Це робиться з метою підвищення ефективності сухого очищення газових викидів.

Для досягнення вказаної мети необхідно:

1. Дослідити процес сухого пилоочищення вихлопних газів виробництва цинкових білил після печей плавлення металічного цинку у вихровій трубі.
2. Експериментально встановити, що у вихровій трубі в зоні квазітвердого обертання, утворення агломерації часток аерозолю.
3. Довести можливість каталітичної деструкції газових домішок ( $CO$ ,  $NO_x$ ,  $SO_2$ ).

4. Довести переваги вихрової труби як сепаратора над циклонами.

#### 4. Дослідження існуючих рішень проблеми

Серед головних напрямків які спрямовані на усунення проблеми знепилення технологічних та аспіраційних газових викидів, які були виявлені в ресурсах світової літератури, можуть бути виділені наступні:

- сучасна техніка знепилення технологічних та аспіраційних газових викидів поширені коли технологічні газові викиди мають високу температуру [1, 2];
- в результаті експлуатації апаратів знепилення утворюються значні об'єми промислових стоків, які необхідно утилізувати використовуючи додаткове обладнання [1–3];
- високу ефективність пиловловлювання можливо досягти при використанні відцентрованих інерційних апаратів [8, 9];
- аеродинамічна ситуація в вихровій трубі призводить до виникнення ефекту Ранка [8, 9].

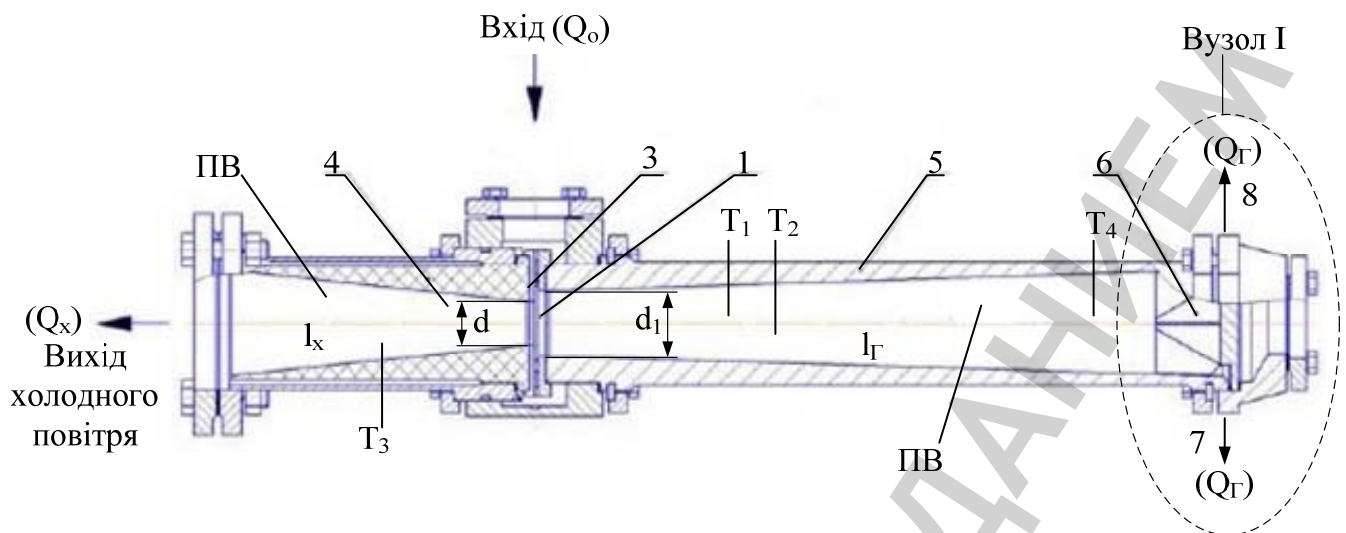
Розглянуто ефект енергетичного розділення, характер поля температур, структуру потоків в різних перетинах вихрової труби [11–13].

Дослідження функціонування вихрових труб, в яких робочим тілом є газ-аерозоль (система газ-тверде), в літературних джерелах відсутні, крім загальних вказівок щодо можливості використання вихрових труб для вказаної мети [10, 18].

Таким чином, явища, які спостерігаються у вихрових трубах при подачі однорідного газу, будуть спостерігатися і при подачі в неї дисперсного потоку. Тому складений коефіцієнт розділення часток і газових молекул у вихровій трубі може бути більшим, ніж у циклонах.

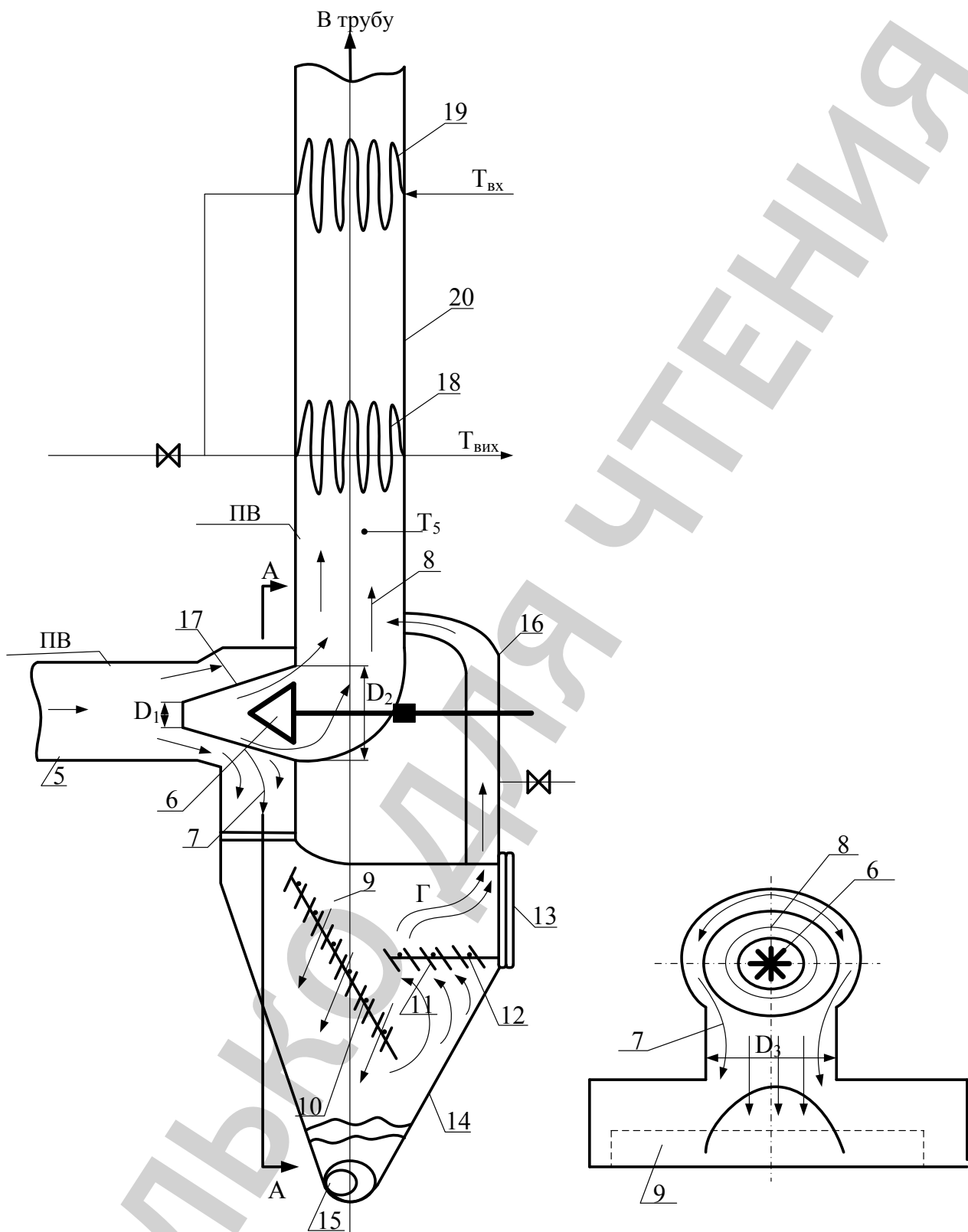
#### 5. Методи досліджень

Експериментальні дослідження щодо процесу пиловловлювання в вихровій трубі проводилися на діючій технологічній лінії виробництва сухих цинкових білил. Спосіб та устаткування виробництва по основним параметрам відповідає відомим технологіям, наприклад [16]. Джерелом загороженості і загазованості вихлопних газоподібних продуктів є муфельна піч для плавлення металічного цинку. Продуктивність по газовим викидам складала 1500–3000  $\text{м}^3/\text{рік}$ . Тиск, під яким вихлопні гази подавалися у вихрову трубу був  $1,2\text{--}1,5 \cdot 10^5$  Па, температура газового потоку на вході складала 793–823 К. Конструкція вихрової труби представлена на рис. 2, а вивід гарячого газу і сепараційна частина представлена на рис. 3. Найбільший діаметр зони 5 (рис. 2) складав 250 мм,  $I_{\Gamma}$  – 3000 мм.



**Рис. 2.** Схема вихрової труби ЧКЗ-ЮГСОН: 1 – кільцевий завихрювач; 2 – зона енергетичного розподілу; 3 – діафрагма; 4 – камера відводу холодного газу ( $Q_X$ ) ( $l_{\Gamma}/d \approx 10$ ); 5 – камера зони квазіпотенційної течії ( $Q_{\Gamma}$ ) ( $l_{\Gamma}/d_1 \approx 10$ ); 6 – дросельний клапан, що регулює співвідношення ( $Q_X/Q_{\Gamma}$ ); 7 – приграничний шар, який насичений аерозолем; 8 – привісний потік чистого газу. ПВ – пробовідбірники,  $T_i$  – міста вимірювання температур

Параметр  $V=Q_X/Q_0$  при дослідженнях змінювали в інтервалі  $0,3 < V < 0,7$ , тобто змінювали величину «d» в камері відводу холодного газу. Значення  $l_{\Gamma}$  було 900 мм. В якості кільцевого завихрювача (рис. 2, поз. 1) використовували змінні кільця з 8-ма тангенціальними прорізами шириною  $0,1 \cdot 10^{-3}$  м, висотою  $1 \cdot 10^{-2}$  м з 16-ма круглими тангенціальними отворами діаметром  $0,3 \cdot 10^{-2}$  м і з 8-ма тангенціальними надзвуковими соплами  $d_{кр} = 0,3 \cdot 10^{-2}$  м. Усі кільця мали діаметр 0,4 м, ширину 0,015 м, прорізи та отвори були рівномірно розподілені по периметру кілець. Вихід з труби очищеного газу (рис. 3, поз. 17) був такий, що площа вихідного отвору ( $D_1$  на рис. 3) була у 10 разів більше складеної площі отвору (d на рис. 1), а площа ( $D_3$  на рис. 3) більше складених площ (d+ $D_1$ ) у 5 разів. На рис. 2, 3 показані точки заміру температур  $T_i$ , а також місця відбору проб газового потоку (samplers).



**Рис. 3.** Схема вузлу (рис. 2, поз. 1): 5, 6, 7, 8 – відповідає позначенням на рис. 1; 9 – блок пластинчатих відбивачів з механізмом 10 для керування кута атаки (поз. 9); 11, 12 – теж. саме, що і 9, 10; 13 – люк для обслуговування; 14 – бункер; 15 – ви грузний шнек; 16 – трубопровід очищеного газу; 17 – конус-трубопровід для відведення чистого газу. ПВ – пробовідбірники,  $T_i$  – міста вимірювання температур газу.

Точки заміру  $T_1$  і  $T_2$  були на відстані 1,8 калібра від стінки вихрової камери (рис. 1), а  $T_4$  на відстані 6,5 калібра. Діаметр робочої частини циліндра для датчиків ( $T_1$  і ВП) складав  $6 \cdot 10^{-3}$  м. Як відомо з [17] вплив датчика на розподіл поля швидкостей незначний, особливо при великих витратах потоку газу, тобто при великих швидкостях. При проведенні експериментальних досліджень вихрова труба (рис. 1) та (рис. 2, поз. 14, 16, 20) була теплоізолювана, температура на поверхні ізоляції при функціонуванні установки не перевищувала 313–323 К.

Визначення концентрації пилу у газовому потоці проводилося пилопробовідбірником ПО-2 (Росія), визначення концентрації газоподібних оксидів виконано універсальним газоаналізатором УГ-2 (Україна). В якості датчиків температури використовували термометри ХА (273–1173 К) (Росія). Тиск газоповітряної суміші перед вводом в трубу визначали приладом НМП-52 (0–40 Мбар) (Росія), швидкість газопилового потоку визначали за допомогою газоаналізатора Тест-350 М/ХЛ № 412 (Росія). Видалений з проби пил досліджувався на дифрактометрі УРС-50ИМ (Росія) з використанням нікелевого фільтру при напрузі 17 кВ та силі току 3,5 мА. Термічний аналіз зразків пилу проводили на дериватографі МОМ Q1500 (Угорщина). Наважка зразка – 100 мг, платинові тиглі тарільчатого типу, швидкість нагрівання 10 град/хв, максимальна температура 1473 К. Заміри розмірів часток пилу та визначення їх структури проводили на електронному мікроскопі УЕМВ-100 (Україна) та на просвітлювальному електричному мікроскопі фірми «Сименс» – «Ельміскоп-1» (Німеччина).

Розподіл часток пилу по розмірам розраховували на основі мультимодальної функції розподілу у вигляді [18]:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n W_i f_i(x), \quad (3)$$

або в розгорнутому вигляді:

$$f(x) = \frac{W(x - x_{\min})^{a_1 m_1} (x_{\max} - x)^{m_1}}{\int_{x_{\min_1}}^{x_{\max_1}} (x - x_{\min_1})^{a_1 m_1} (x_{\max_1} - x)^{m_1} dx} + \frac{(1 - W)(x - x_{\min_2})^{a_2 m_2} (x_{\max_2} - x)^{m_2}}{\int_{x_{\min_2}}^{x_{\max_2}} (x - x_{\min_2})^{a_2 m_2} (x_{\max_2} - x)^{m_2} dx}, \quad (4)$$

де  $x$  – абсолютний розмір;  $x_{\min}$ ,  $x_{\max}$  – найменший та найбільший розміри, індекси (1, 2) відносяться до мілкої і крупної фракції,  $W$  – масова доля мілких часток ( $1 - W$ ) – масова доля грубої фракції.

При проведенні дослідження відбір проб та аналіз димових газів у повітрявідводах до і після вихрової труби виконувала центральна заводська лабораторія (ЦЗЛ) підприємства.



## 6. Результати досліджень

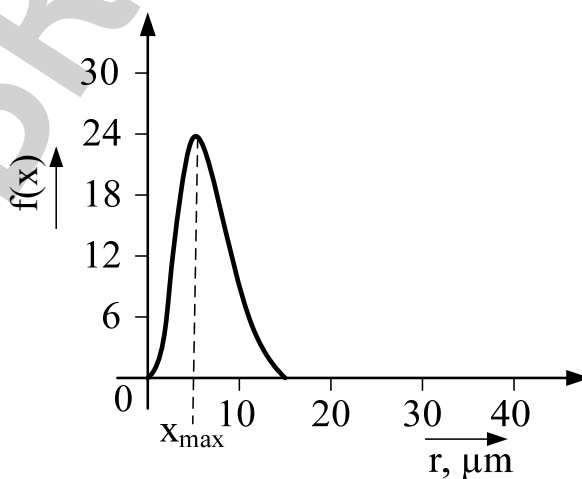
На вході у вихрову трубу при проведенні досліджень були зафіксовані наступні показники (табл. 1).

**Таблиця 1**

Показники кількості пилу і концентрації токсичних речовин в потоці газу після печей плавлення на вході у вихрову трубу

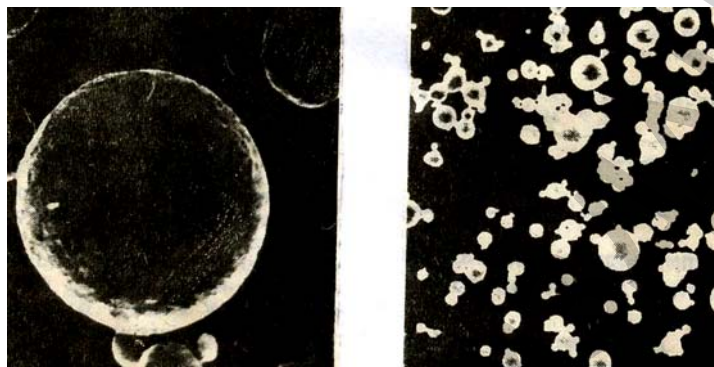
№	Токсична речовина	Концентрація речовини на вході, мг/м <sup>3</sup>	Продуктивність по газу, м <sup>3</sup> /год	Пил	Концентрація пилу в потоці, мг/м <sup>3</sup>
1	CO	100	1500,0	Суміш часток пилу Zn і ZnO	1829,0
		110			2714,0
		120			2905,0
		118	3000,0		4470,0
		95			2762,0
		120			2435,0
2	SO <sub>2</sub>	80	1500,0		—
		21			—
		36			—
		38	3000,0		—
		28			—
		50			—
3	NO <sub>x</sub>	70	—	—	—
		69	—	—	—
		65	—	—	—
		70	—	—	—
		70	—	—	—
		70	—	—	—

На рис. 4 наведені криві розподілу по розмірам часток пилу на вході у вихрову трубу.



**Рис.4.** Криві розподілу по розмірам часток пилу на вході у вихрову трубу

Як видно з графіків на рис. 4, основна маса часток пилу має розмір в інтервалі від 5 до 10 мкм. Рентгенофазовий аналіз зразків пилу на вході, а також термографічний аналіз диференційний термічний аналіз (ДТА), диференційний термогравіметричний (ДТГ) свідчать про те, що основна маса часток пилу представляє собою порошок Zn, в деяких випадках ці частинки цинку вкриті оксидною плівкою. Мікрофотографії цинкового порошку наведено на рис. 5.

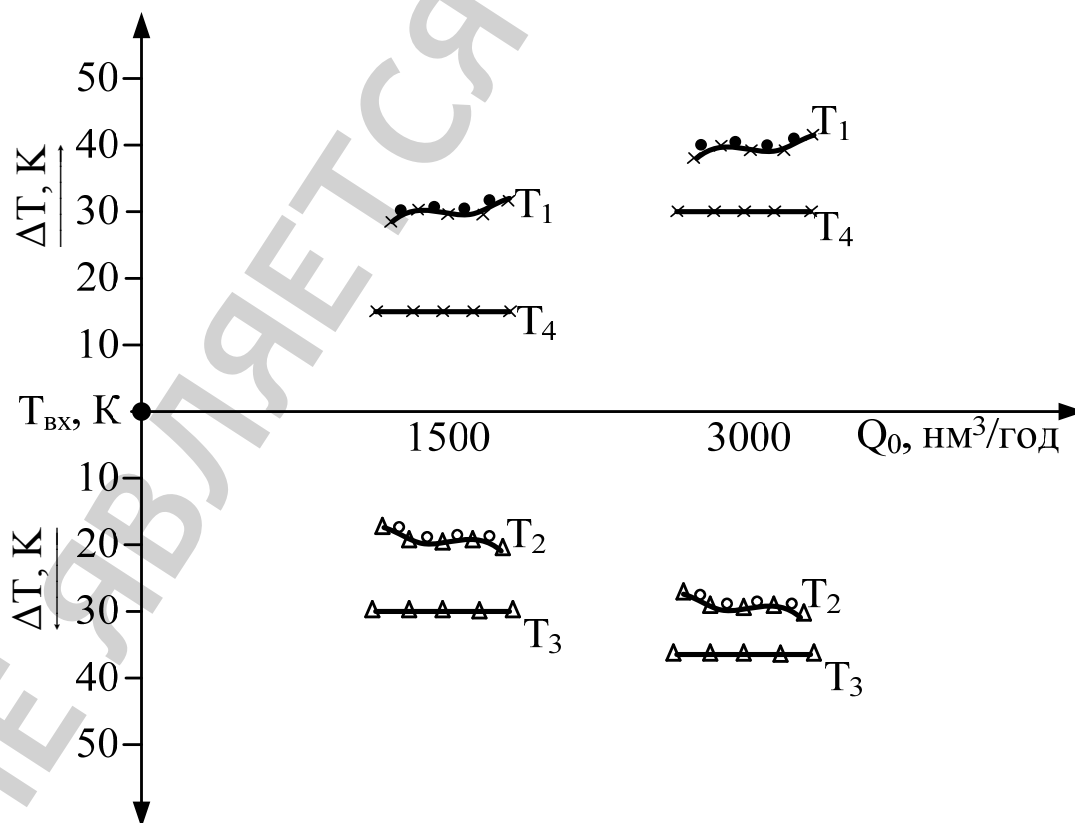


**Рис. 5.** Мікрофотографії цинкового порошку на вході у вихрову трубу

Як видно з фотографій на рис. 5 частинки пилу на вході у вихрову трубу представлені у вигляді кульок з розмірами від 5 до 10 мкм.

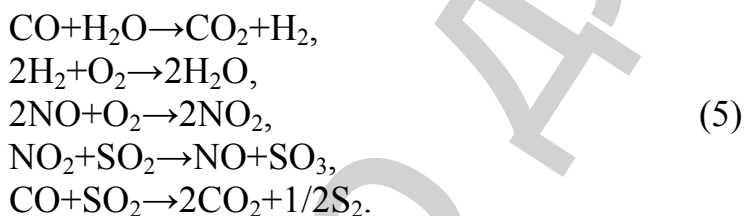
Питома поверхня цинкового порошку, яка визначалася по методу «БЭТ», складала від 2 до 3 м<sup>2</sup>/г.

Далі на рис. 6 наведені результати спостережень за функціонуванням вихрової труби по зміні температури газового потоку згідно точок заміру (рис. 2, 3).



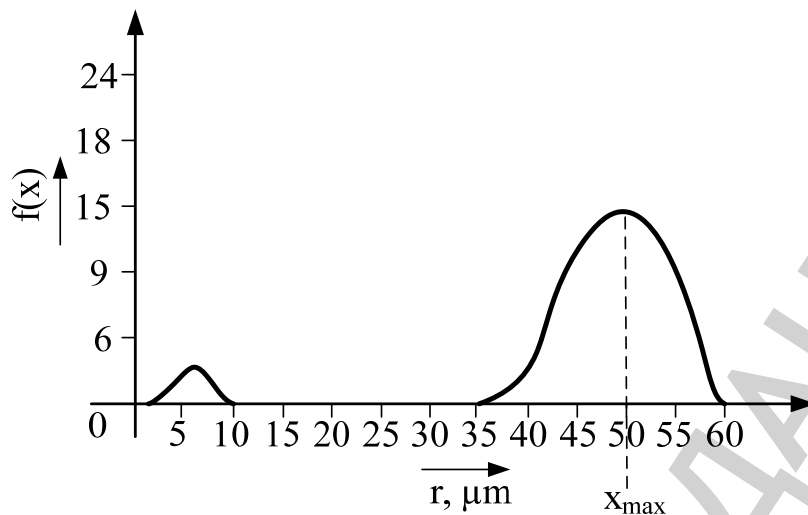
**Рис. 6.** Результати заміру температур при рухливості дисперсного потоку у вихровій трубі:  $T_1, T_2, T_3, T_4$  – відповідність точкам заміру на рис. 2;  $\bullet, \circ$  точки  $T_1, T_2$  при умовах, коли на вхід газового потоку додається стиснена водяна пара в кількості, що відповідає співвідношенню  $M_{H_2O}/\Sigma M_T (CO, NO_x, SO_2) \approx 10$  при тиску  $2 \cdot 10^5$  Па,  $T_{in} = 513$  К

Як свідчать результати заміру температур (рис. 6), спостерігається розподіл температур гальмування на межі кільцевого на різних відстанях від завихрювала та при різних витратах  $Q_0$ , тобто непрямій інтенсивності закрутки потоку. Так різниця температур в зоні квазітвердого закрученого потоку ( $T_1, T_2$ ) досягає при витратах  $Q_0 = 1500$   $\text{м}^3/\text{год}$  близько  $35$   $^\circ\text{C}$ . При подальшому віддаленні від завихрювала ( $T_4$ ) профіль гальмування температур стає стабільним і в точці  $T_4$  різниці досягає біля  $18$   $^\circ\text{C}$ . При витратах  $Q_0 = 3000$   $\text{м}^3/\text{год}$  відповідно різниця досягає від  $40$  до  $45$   $^\circ\text{C}$ , а  $T_4 = 25$   $^\circ\text{C}$ . Ці результати свідчать про нерівномірний розподіл швидкостей по радіусу труби, що приводить до інтенсивної дисипації механічної енергії, внутрішнього тепловиділення та розподілу температури гальмування. Аналогічні залежності спостерігаються при умовах (рис. 6), коли у вхідний потік газу додавалася водяна пара. Кількість водяної пари брали виходячи з співвідношення маси водяної пари (мг) до складеної маси газових токсикантів ( $CO; NO_x; SO_2$ ) мг (табл. 1) = 10. Маса токсикантів складала приблизно  $220$  мг, тобто витрата  $H_2O$  складала приблизно  $2200\text{--}3000$   $\text{мг}/\text{м}^3$ . Водяна пара додавалася в потік газу з метою забезпечити можливі гомогенні реакції, в яких пари води є каталізаторами:



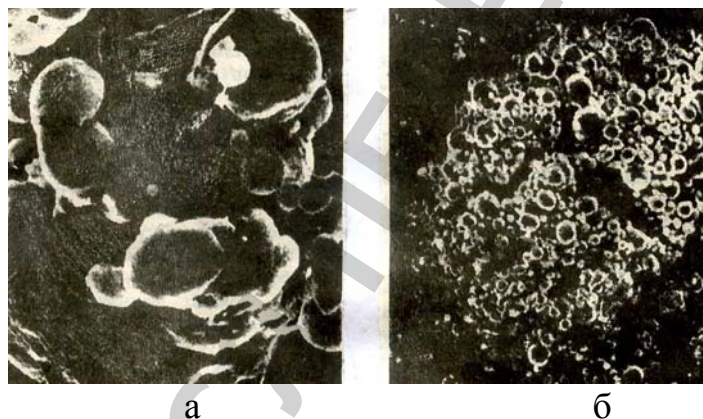
Розрахунки  $\Delta G$  вказаних реакцій по методиці [19] довели, що такі реакції можуть протікати при температурах більше  $693$  К в присутності парів води.

На рис. 7 наведена крива розподілу по розмірам часток пилу на виході з вихрової труби 5 і перед входом в форбункер 14 на рис. 3.



**Рис. 7.** Криві розподілу по розмірам часток пилу на виході з вихрової труби

Як видно з рис. 7 основна маса часток пилу має розмір в інтервалі від 45 до 55 мкм. Мікрофотографії порошку наведені на рис. 8.



**Рис. 8.** Мікрофотографії порошку на виході з вихрової труби: а – зона квазітвердої течії газового потоку; б – зона квазіпотенційної течії газового потоку

З рис. 8 видно, що в зоні квазітвердої течії газового потоку після завихрювача і далі в зоні квазіпотенційної течії газового потоку до виходу з труби (гарячий кінець) при дисипації енергії проходить агломерація часток пилу. Це відбувається за рахунок високошвидкісних зіткнень часток між собою, при цьому створюються агломерати з розмірами близько 50 мкм. При цьому основна маса агломератів зосереджена коло стінок труби, а більшість газових молекул в центрі робочої камери. Тому запилений потік газу, що рухається вздовж стінок труби, виходить крізь кільцевий отвір між корпусом труби 5 та корпусом 17 (рис. 3). Після цього, потрапляє в форбункер 14, в якому встановлені блоки відбивачів поз. 10, 12. За рахунок різкого зміння напрямку потоку, проходить інтенсивна сепарація з видаленням часток пилу. Очищений газ, що рухається по центру вихрової труби 5 (рис. 3) через отвір в корпусі 17 та кільцевий отвір між корпусом 17 і дроселем витікає в камеру 20, в цю ж камеру поступає очищений газ з форбункера 14 по трубопроводу 16. В камері 20 встановлені теплообмінні

пристрої 18, 19 для утилізації тепла очищеного газу перед подачею газу в трубу для викиду в атмосферу.

В табл. 2 показано кількості пилу та концентрації токсичних речовин в потоці газу на виході з вихрової труби після форбункера.

**Таблиця 2**

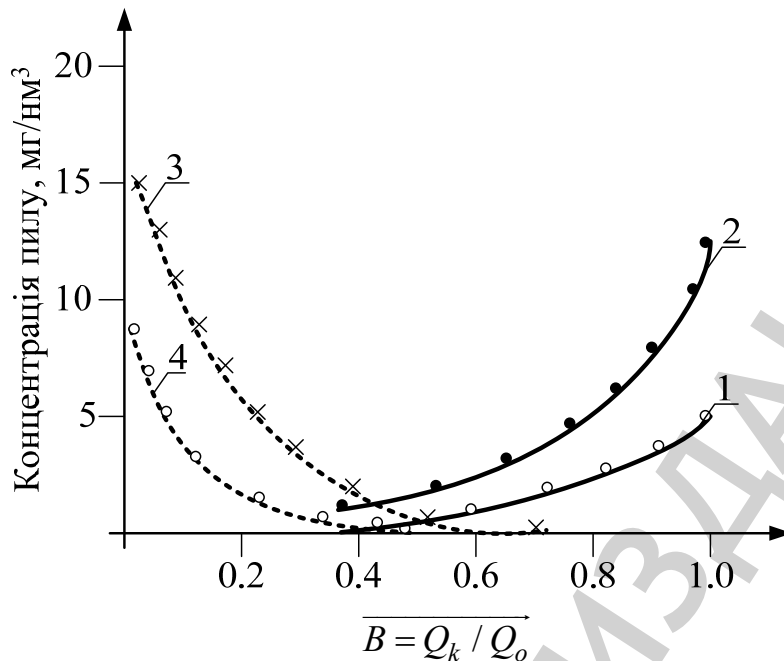
**Показники якості очищення вихлопних газів у вихровій трубі**

Токсична речовина	Концентрація токсичної речовини, мг/нм <sup>3</sup>	Продуктивність по газу на вході в трубу, Nm <sup>3</sup> /hour	Ефективність очищення, %відносно табл. 1	Пил	Концентрація пилу в потоці, мг/нм <sup>3</sup>	Ефективність очищення, %відносно табл. 1
CO	11,0	1500,0	89,5	Частинки	58,0	97,0
	9,0	3000,0	90,4		19,0	99,9
SO <sub>2</sub>	3,0	1500,0	92,1	ZnO з домішками цинку	-	-
	2,0	3000,0	99,6		-	-
NO <sub>x</sub>	13,0	1500,0	81,5		-	-
	11,0	3000,0	83,1		-	-

**Примітка:** ефективність очищення наведена як середнє значення за період експлуатації за даними ЦЗЛ.

Як видно за даними наведеними в табл. 2, при реалізації процесу очищення вихлопних газів у вихровій трубі спостерігається не тільки процеси агломерації пилу, а також деструкція газових токсикантів. Як і раніше, значення показників ефективності залежить від інтенсивності закрутки потоку.

На рис. 9 представлені характеристики зміни концентрації аерозолів на виході охолодженого газу (камера 4 на рис. 2) і на виході підігрітого потоку (5, ПВ на рис. 3) при різних режимах функціонування вихрової труби в залежності від параметру «В» (рівняння (1)).



**Рис. 9.** Характер зміни концентрації аерозолію на виході вихрової труби при різних значеннях параметру «В»: 1, 4 – при продуктивності по газу 3000 нм<sup>3</sup>/год; 2, 3 – при продуктивності по газу 1500 нм<sup>3</sup>/год; 1, 2 – концентрація пилу охолодженого газу; 3, 4 – концентрація пилу гарячого газу

Як свідчать дані, наведені на рис. 9, з зростанням параметру «В» вихідна пило концентрація охолодженого потоку (криві 1, 2) збільшується. При цьому найменші концентрації пилу в холодному потоці спостерігаються при максимальних значеннях витрат  $Q_o$ , тобто витрат газу на вході в трубу. Щодо гарячої дільниці, то тут з ростом параметру «В» спостерігається зниження концентрації аерозолію, суттєве зниження концентрації аерозолію також спостерігається при максимальних значеннях  $Q_o$ .

Наведені дані на рис. 9 є важливими для практики при використанні вихрових труб як сепараторів аерозолів, тому що дозволяють вибрати необхідний режим видалення зольних часток від несучого осередку. Мінімальний вихід аерозолію спостерігається в інтервалі параметру «В» від 0,3 до 0,6. Мінімальне значення вихідної концентрації аерозолію досягається при «В»=0,4. Треба також відмітити, що середній розмір часток пилу, що виходить з холодним потоком, складає менше 5 мкм.

Ефективність використання вихрової труби як сепаратора аерозолів можливо визначити по формулі:

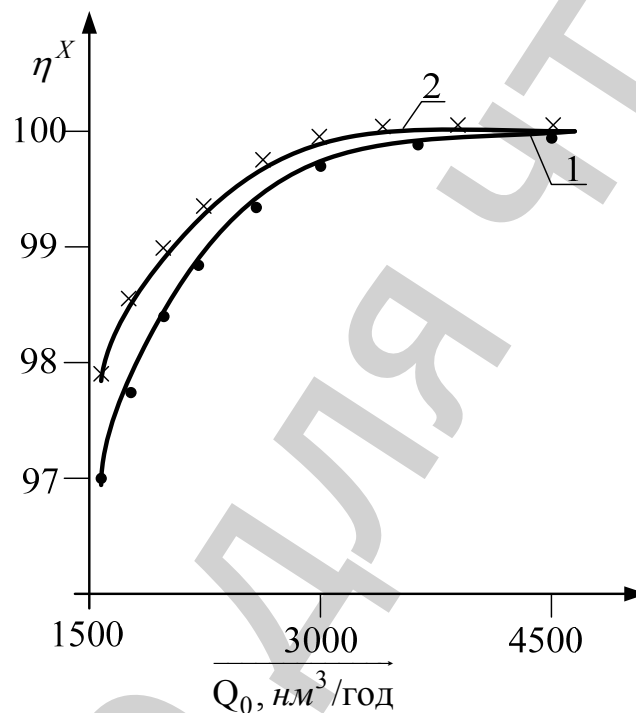
$$\eta^* = \left\{ 1 - \left[ \frac{Z_1}{Z_0} B - \frac{Z_2}{Z_0} (1 - B) \right] \right\} \cdot 100, \quad (6)$$

де  $Z_0$  – вхідна концентрація аерозолію, мг/нм<sup>3</sup>;  $Z_1$  – концентрація аерозолію на виході холодного потоку, мг/нм<sup>3</sup>;  $Z_2$  – концентрація аерозолію на виході гарячого потоку, мг/нм<sup>3</sup>.

При вхідній концентрації  $Z_0=3000$  мг/нм<sup>3</sup>,  $V=0,45$ .  $Z_1$  та  $Z_2$  відповідно (рис. 9) при продуктивності по газу 1500 та 3000 нм<sup>3</sup>/год відповідно складає близько 97,9 % та 99,96 %, що корелюється з даними наведеними в табл. 2.

При дослідженнях продуктивності по газу 1500 та 3000 нм<sup>3</sup>/год на вході, перед подачею у завихрювач відводили (рис. 3, поз. 16) частину очищеного газу після бункеру 14. Кількість газу становила 10–20 % від об'єму газового потоку, який виходив з бункера, з метою визначення впливу рециркуляції гарячого потоку на процес пиловловлювання.

На рис. 10 наведена залежність ефективності очищення від загальної витрати по газу і витрат по газу з рециркуляцією.



**Рис. 10.** Залежність ефективності очищення від загальної витрати по газу і витрат по газу з рециркуляцією: 1 – без рециркуляції, 2 – рециркуляція 20%

Як свідчать дані на рис. 10, рециркуляція гарячого газу підвищує ступінь ефективності очищення при низькій продуктивності вихлопних газів на вході в вихрову трубу. Це явище очевидно пов'язане з зростанням складеного потоку  $Q_0$ .

Аналіз здобутих результатів досліджень процесу пиловловлення у вихрових трубах свідчить про доцільність використання таких апаратів як високоефективних пиловловлювачів для сухого очищення газів та використання їх бросової теплової енергії. Останнє наведено в роботі схематично, тому що вибір теплообмінного обладнання (рис. 3, поз. 18–20) і його розрахунки досить повно розглянуті в роботах [20, 21]. Наведені експериментальні дослідження у вихрових трубах у порівнянні з найкращим із існуючих апаратів – центробіжним циклоном ЦН-11 (Україна) дозволяє стверджувати про значне (до 6–9 %) підвищення ефективності уловлення дрібнодисперсного пилу у запропонованій системі пило очищення. Це відкриває перспективи для впровадження вихрових труб і вихрових камер та дозволяє знизити промисловий негативний вплив на

атмосферу. Немаловажним є питання щодо зменшення загрози глобальних наслідків для майбутніх поколінь шляхом проведених інженерних рішень з попередженням викидів дрібнодисперсних аерозолів.

## 7. SWOT-аналіз результатів досліджень

*Strengths.* Аналіз здобутих результатів досліджень процесу пиловловлення у вихрових трубах свідчить про доцільність використання таких апаратів як високоефективних пиловловлювачів для сухого очищення газів та використання їх бросової теплової енергії.

При реалізації процесу очищення вихлопних газів у вихровій трубі спостерігається не тільки процеси агломерації пилу, а також деструкція газових токсикантів.

*Weaknesses.* В роботі були розглянуті різні методи знесилення газових потоків. Було виявлено наступне:

– циклони різних конструкцій не спроможні вловлювати частинки пилу менше 20 мкм;

– мокрі пиловловлювачі складні конструктивно, потребують значні енергетичні витрати, а також потребують використання води в залежності від типу пиловловлювача;

– в результаті експлуатації утворюються значні об'єми промислових стоків, які необхідно утилізувати використовуючи додаткове обладнання.

*Opportunities.* Відкриваються перспективи для впровадження вихрових труб і вихрових камер та можливість зниження промислового негативного впливу на атмосферу. Немаловажним є питання щодо зменшення загрози глобальних наслідків для майбутніх поколінь шляхом проведених інженерних рішень з попередженням викидів дрібнодисперсних аерозолів.

*Threats.* Досліджено, що у вихрових трубах у порівнянні з існуючим центробіжним циклоном ЦН-11 спостерігається значне (до 6–9 %) підвищення ефективності уловлення дрібнодисперсного пилу. Це відкриває перспективи для впровадження вихрових труб і вихрових камер та дозволяє знизити промисловий негативний вплив на атмосферу. Підприємству знадобиться збільшити капітальні витрати на встановлення нового очисного обладнання. Капітальні витрати на впровадження пиловловлювача одноразові.

## 8. Висновки

1. Досліджено процес сухого пило очищення вихлопних газів виробництва цинкових білил після печей плавлення металічного цинку у вихровій трубі при аеродинамічній ситуації, що призводить до виникнення ефекта Ранка. Доведено, що поведінка дослідженого газодисперсного потоку при течії у вихровій трубі така ж, як і газового потоку без аерозолу. Тобто, спостерігається два види течії газодисперсного потоку після його закрутки вздовж труби в залежності від зони, що розглядається. Також спостерігається ефект перерозподілу повної енергії у обертаємому потоці і відповідно зміна динамічної структури потоку.

2. Експериментально встановлено, що у вихровій трубі в зоні квазітвердого обертання, де спостерігається найбільш інтенсивний перерозподіл енергії і температури, спостерігається агломерація часток аерозолу за рахунок високошви-



дкісних зіткнень часток. Утворені агломерати майже в 10 разів більше часток пилу, що зафіксовані на вході у вихрову трубу. Досягнута ефективність очищення становить 97,8–99,9 % в залежності від витрат газу на вході в трубу.

3. Не менш важливим результатом досліджень є те, що доведена можливість каталітичної деструкції газових домішок (CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>) при додаванні у газовий потік на вході в трубу водяної пари в якості каталізатора. В результаті чого ступінь очищення становить: CO=90,0 %, SO<sub>2</sub>=92,0–99,0 %, NO<sub>x</sub>=81,0 %.

4. Досліджено залежність ефективності використання вихрової труби як сепаратора від різних факторів, таких як рециркуляція очищеного гарячого газу та його долі, параметру «В»= $Q_x/Q_0$ , та інших показників. Доведено переваги вихрової труби як сепаратора над циклонами. Дослідження у вихрових трубах у порівнянні з найкращим із існуючих апаратів – центробіжним циклоном ЦН-11 дозволяє стверджувати про значне (до 6–9 %) підвищення ефективності уловлення дрібнодисперсного пилу у запропонованій системі пило очищення. Це відкриває перспективи для впровадження вихрових труб і вихрових камер та дозволяє знизити промисловий негативний вплив на атмосферу.

Загалом, вищезначене дозволяє зробити висновок, що мета поставлена у роботі досягнута. Здобуті дані можуть бути використані при дослідженнях аналогічних дисперсних систем.

### Література

1. Zlygostev, A. S. Metody ochistki i obezvrezhivaniia ventiliatsionnyh i tehnologicheskikh vybrosov [Electronic resource] / A. S. Zlygostev // Zelenaiia planeta. – 2010. – 20 p. – Available at: \www/URL: <http://ecologylib.ru/>

2. Chekalov, L. V. Zashchita atmosfernogo vozduha ot vybrosov pyli, aerozolei i tumanov [Text] / L. V. Chekalov. – Yaroslavl: Rus, 2004. – 424 p.

3. Zaretskii, A. D. Promyshlennye tehnologii i innovatsii [Text] / A. D. Zaretskii, T. E. Ivanova. – St. Petersburg: Piter, 2014. – 480 p.

4. Batluk, V. A. Zalezhnist efektyvnosti pylovlennia vidtsentrovoinertiinykh aparativ vid konstruktsii bunkera [Text] / V. A. Batluk, M. V. Basov et al. // Promyslova hidravlika i pnevmatyka. – 2009. – Vol. 3, No. 25. – P. 40–43.

5. Batluk, V. A. Zalezhnist efektyvnosti pylovlennia vidtsentrovoinertiinykh aparativ vid konstruktsii bunkera [Text] / V. A. Batluk, O. V. Melniko, O. V. Mirus // Promyslova hidravlika i pnevmatyka. – 2011. – Vol. 2, No. 32. – P. 44–47.

6. Liapkov, A. A. Tehnika zashchity okruzhaiushchei sredy [Text]: Handbook / A. A. Liapkov, E. I. Ionova. – Ed. 2. – Tomsk: Tomsk Polytechnic University, 2008. – 317 p.

7. Aslamova, V. S. Avtomatizirovannaia sistema issledovaniia tsiklonov i skrubberov [Text] / V. S. Aslamova, A. A. Zhabei // Izvestiia Tomskogo politehnicheskogo universiteta. Inzhenering georesursov. – 2010. – Vol. 3016, No. 1. – P. 71–76.

8. Kutepov, A. M. Vihrevye protsessy dlia modifikatsii dispersnyh sistem [Text] / A. M. Kutepov, A. S. Latkin. – Moscow: Nauka, 1999. – 270 p.

9. Gao, J. Simulations of gas-liquid-solid 3-phase flow and reaction in FCC riser reactors [Text] / J. Gao, C. Xu, S. Lin, G. Yang, Y. Guo // *AIChE Journal*. – 2001. – Vol. 47, No. 3. – P. 677–692. doi:[10.1002/aic.690470315](https://doi.org/10.1002/aic.690470315)
10. Veretennikov, S. V. Experimental investigation of heat transfer in energy separation chambers of the vortex tube [Text] / S. V. Veretennikov, S. N. Barinov // *VESTNIK of the Samara State Aerospace University*. – 2015. – Vol. 14, No. 2. – P. 44–51. doi:[10.18287/2412-7329-2015-14-2-44-51](https://doi.org/10.18287/2412-7329-2015-14-2-44-51)
11. Luo, G. Numerical simulation of gas-particle flows with different swirl numbers in a swirl burner [Text] / G. Luo, R. Li, L. Zhou // *Tsinghua Science and Technology*. – 2000. – Vol. 5, No. 1. – P. 96–99.
12. Deich, M. E. *Tekhnicheskaya gazodinamika* [Text] / M. E. Deich. – Ed. 3. – Moscow: Energiia, 1974. – 592 p.
13. Molochko, F. I. O sushchnosti vihevogo efekta Ranka-Hil'sha [Text] / F. I. Molochko // *Problemy zahalnoi enerhetyky*. – 2015. – Vol. 4, No. 43. – P. 58–60.
14. Burov, O. O. Dedusting gas emissions drying plant [Text] / O. O. Burov, A. I. Burov, L. V. Vinogradenko // *Ahrarnyi visnyk Prychornomia*. – 2014. – Vol. 74. – P. 140–143.
15. Maslov, V. E. *Pylekotsentratory v topochnoi tekhnike* [Text] / V. E. Maslov. – Moscow: Energiia, 1977. – 285 p.
16. Piralishvily, S. A. Vortex effect and intensification of heat and mass transfer in cell energy technology [Text] / S. A. Piralishvily, S. V. Veretennikov // *VESTNIK of Samara University. Aerospace And Mechanical Engineering*. – 2011. – No. 3–1 (27). – P. 241–247.
17. Pitak, I. V. Issledovanie mokrogo protsessa ulavlivaniia pyli v rotnom vihevom apparate [Text] / I. V. Pitak // *Bulletin of the National Technical University «KhPI» Series: New solutions in modern technologies*. – 2010. – No. 17. – P. 135–140.
18. Civan, F. *Reservoir Formation Damage* [Text] / F. Civan. – Ed. 3. – Elsevier, 2016. – 1042 p. doi:[10.1016/c2014-0-01087-8](https://doi.org/10.1016/c2014-0-01087-8)
19. Karapetiants, M. H. *Himicheskaya termodinamika* [Text] / M. H. Karapetiants. – Moscow: Himiya, 1975. – 584 p.
20. Rotary mass-exchange apparatus [Electronic resource]: Patent UA 29985 U, МПК (2006) B01D 3/00 / Pitak I. V., Troshyn O. H., Moiseiev V. F., Shaporev V. P. – Appl. No. u200708025; Filed 16.07.2007; Publ. 11.02.2008. – Available at: \www/URL: <http://uapatents.com/2-29985-rotornijj-masoobminnijj-aparat.html>
21. 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.