#### УДК 613.6.027

DOI 10.33042/2522-1809-2023-1-175-208-220

## О.О. Ченчева<sup>1</sup>, С.Є. Лашко<sup>1</sup>, Д.В. Рєзнік<sup>1</sup>, Ю.І. Чеберячко<sup>2</sup>, І.С. Петренко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Україна <sup>2</sup>Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Україна

### **ДОСЛІДЖЕННЯ АЕРОДИНАМІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИДАЛЕННЯ ВУГЛЕЦЕВОГО ПИЛУ З РОБОЧОЇ ЗОНИ**

У статті досліджується аеродинамічний процес видалення вуглецевого пилу з робочої зони задля створення безпечних і нешкідливих умов праці на виробництві. Доведено виникнення закручування повітряного потоку під час руху запиленого повітря у протяжному відсмоктувачі з тангенціальним входом у систему. Установлено, що найбільші фракції пилу рухатимуться вздовж стінок повітропроводу. Це дає можливість використовувати протяжні відсмоктувачі для видалення грубих фракцій пилу.

**Ключові слова:** вуглецевий пил, аеродинамічний розрахунок, інженерне моделювання, професійні захворювання, охорона праці.

#### Постановка проблеми

Запобігання запиленості повітря робочої зони має першочергове значення в питаннях охорони праці підприємствах оброблювальної на промисловості, так як пил значно впливає на ризик виникнення професійних захворювань y працівників, викликає швидке зношування механізмів устаткування та може навіть призвести до виведення його з ладу [1].

Механічне оброблення вуглецевмісних композиційних матеріалів характеризується значним виділенням пилу, який містить залишки карбонового волокна, нанотрубок, вугільного пилу залишки епоксидної смоли. При цьому та оброблення такого типу матеріалів ручним абразивним інструментом збільшує кількість пилу, що виноситься із зони різання [2]. Такі явища призводять виникнення професійних ло захворювань, особливо за відсутності індивідуального захисту працівника під час контакту з вуглецевими матеріалами. Значну частину професійних захворювань складають пилові захворювання органів дихання. Зростанню захворюваності на пилові захворювання легень сприяють шкідливі та несприятливі чинники, які присутні в робочій зоні дихання: пил, алергени, дратівливі та токсичні речовини у вигляді газів, диму, пари.

Отже, можна констатувати, що проблематика дослідження є вельми актуальною з метою створення безпечних і нешкідливих умов праці на виробництві.

#### Аналіз останніх досліджень і публікацій

У статті [3] розглядається проблема дослідження рівнів ризиків настання страхових нещасних випадків і травматичних подій із використанням компонентного методу. У ході дослідження використовувалися дані фонду України. соціального страхування Показано універсальність компонентного методу визначення рівнів ризиків на підприємствах різних галузей, профілю, рівню автоматизації, обсягів виробництва.

У роботі [4] розроблено рекомендації з вибору протипилових фільтрувальних респіраторів на основі оцінки ризиків, яка передбачає такі основні кроки: ідентифікацію шкідливого фактору, визначення типу небезпеки для працівника та розрахунок експлуатаційного ризику, вибір і обгрунтування моделі захисного пристрою. Крім того, описані типові помилки при виборі й експлуатації засобів індивідуального захисту органів дихання, які можуть значно погіршити рівень захисту користувачів. Надано рекомендації стосовно оцінювання експлуатаційних ризиків протипилового фільтрувального респіратору, які підвищують напруженість роботи.

Результати досліджень [5–8] визначають особливості пилоутворення під час оброблення анізотропного порожнистого середовища, водночас, викликаючи значний інтерес щодо дослідження складу повітря робочого приміщення.

#### Мета статті

Метою цієї роботи є дослідження аеродинамічного процесу видалення вуглецевого

пилу з робочої зони задля створення безпечних і нешкідливих умов праці на виробництві.

#### Виклад основного матеріалу

Аеродинамічний розрахунок протяжного повітропроводу рівномірного всмоктування з тангенціальним входом повітря

Для повітроприймального пристрою можна застосувати рівняння кількості руху, згідно з яким сума проекцій усіх сил, прикладених до струменя на будь-якій ділянці, дорівнює приросту проекції секундної кількості руху на цій ділянці.

Під час аналітичного дослідження прийнято такі припущення: поля швидкостей у поперечних перерізах є рівномірними, форма пилоподібних частинок, які надходять із повітряним потоком, куляста, коефіцієнт опору тертя по всій довжині відсмоктувача прийнято постійним. Розрахункова схема досліджуваного відсмоктувача наведена на рис 1.

Торцеві частини контрольних поверхонь проведені нормально до напрямку потоку. На розглянуті перерізи 1–1 і 2–2 однакової площі F діють сили тиску  $P_1$  і  $P_2$ , спрямовані до поверхонь перпендикулярно. До бічної стінки прикладена сила тертя  $P_{mep}$ , спрямована паралельно потоку, проти нього. Проекція на розглянуту вісь сили тиску на елементарному майданчику  $P_n$ , через який йде підсмоктування повітря всередину протяжного відсмоктування, дорівнює 0.



Рис. 1. Розрахункова схема протяжного відсмоктувача циліндричної форми з тангенціальним входом повітря

Рівняння проекцій на вісь OX рівнодійної зовнішніх сил  $\Sigma Q$  для виділеного об'єму має такий вигляд (рівняння (1), (2)):

$$\sum Q = P_1 F - P_2 F - P_{\text{TII}}, \qquad (1)$$

$$\sum Q = P_1 F - P_2 F - \tau_0 2\pi R dx, \qquad (2)$$

де  $\tau_0$  – дотичне напруження, Па;

dx – відстань між перерізами 1–1 і 2–2, м;

*R* – радіус поперечного перерізу відсмоктування, м.

Зміну кількості руху маси d(MV) виділеного об'єму в часі dt у проєкціях на вісь OX слід записати так (рівняння (3)):

$$\frac{d(MV)}{dt} = \rho \overline{V_2^2} F - \rho \overline{V_1^2} F - \rho V_{\Pi} cos\beta dL_{\Pi}$$
(3)

де  $\rho$  – густина повітря, кг/м3;

 $\overline{V_1}$ ,  $\overline{V_2}$  – середні швидкості в перерізах потоку 1–1 і 2–2 відповідно, м/с;

*Vn* – швидкість повітря, що підмішується, м/с;

 $\beta$  – кут між напрямком швидкості повітря, що підмішується до основного потоку, і віссю *OX*, град;  $L_n$  – об'ємна витрата повітря, що підмішується, м<sup>3</sup>/с.

Витрата повітря, що підмішується, дорівнює добутку швидкості всмоктування повітря в щілину  $V_{u_{i}}$  шириною *b* і площі самої щілини. Тоді рівняння зміни кількості руху маси в часі матиме вигляд (рівняння (4)):

$$\frac{d(MV)}{dt} = \rho \overline{V_2^2} F - \rho \overline{V_1^2} F - \rho V_{\Pi} \cos\beta V_{\Pi} b dx \quad (4)$$

Згідно з рівнянням кількості руху рівнодійна зовнішніх сил має дорівнювати зміні кількості руху, тому правильною є рівність (рівняння (5)):

$$P_{1}F - P_{2}F - \tau_{0}2\pi R dx = \rho \overline{V_{2}^{2}}F - \rho \overline{V_{1}^{2}}F - \rho V_{\Pi} cos\beta V_{\Pi} b dx$$
(5)

Стосовно розглянутого об'єму повітря вираз (5) перетворюється таким чином (рівняння (6)):

$$(P_{1} - P_{1})F - 2\pi R \int_{x_{1}}^{x_{2}} \tau_{0} dx = \rho F \left( \overline{V_{2}^{2}} - \overline{V_{1}^{2}} \right) - \rho \int_{x_{1}}^{x_{2}} V_{\Pi} \cos \beta V_{\Pi} b dx)$$
(6)

Дотичне напруження визначається згідно з формулою (7):

$$\tau_0 = \frac{\lambda \rho V_{\rm fip}^2}{8} \tag{7}$$

де  $V_{np}$  – швидкість руху повітря в пристінному шарі відсмоктування, м/с.

 λ – коефіцієнт опору тертя, що залежить від шорсткості стінок повітропроводу.

У разі заміни дотичного напруження у виразі (6) рівняння змінить вигляд (рівняння (8), (9)):

$$(P_{1} - P_{2})F = 2\pi R \int_{x_{1}}^{x_{2}} \frac{\lambda \rho V_{\pi p}^{2}}{8} dx + \rho F \left(\overline{V_{2}^{2}} - \overline{V_{1}^{2}}\right) - \rho \int_{x_{1}}^{x_{2}} V_{\pi} \cos \beta V_{\mu} b dx$$
(8)

$$(P_1 - P_2)F = \frac{\pi R\lambda\rho}{4} \int_{x_1}^{x_2} V_{np}^2 dx + \rho F \left(\overline{V_2^2} - \overline{V_1^2}\right) - \rho \int_{x_1}^{x_2} V_n \cos\beta V_{nn} b dx$$
(9)

У разі ділення правої та лівої частин рівняння (9) на площу поперечного перерізу відсмоктувача *F* втрати тиску в протяжному відсмоктувачі становитимуть (рівняння 10):

$$P_{2} - P_{1} = \frac{\rho}{\pi R^{2}} \int_{x_{1}}^{x_{2}} V_{n} \cos\beta V_{ui} b dx - \frac{\lambda \rho}{4R} \int_{x_{1}}^{x_{2}} V_{np}^{2} dx - \rho \left(\overline{V_{2}^{2}} - \overline{V_{1}^{2}}\right)$$
(10)

Якщо прийняти припущення про сталість швидкості всмоктування в щілину, то вона дорівнюватиме швидкості повітря, що підмішується. Тоді вираз (10) набуде такого вигляду (рівняння (11)):

$$P_{2} - P_{1} = \frac{\rho}{\pi R^{2}} \int_{x_{1}}^{x_{2}} V_{\text{HI}}^{2} \cos\beta b dx - \frac{\lambda \rho}{4R} \int_{x_{1}}^{x_{2}} V_{\text{HP}}^{2} dx + \rho \left(\overline{V_{2}^{2}} - \overline{V_{1}^{2}}\right)$$
(11)

Для протяжного повітропроводу рівномірного всмоктування конічної форми (рис. 2) рівняння кількості руху отримано аналогічно відсмоктувачу постійного перерізу (рівняння (5)). Але на відміну від останнього проекція на вісь  $P_n$  не дорівнює нулю.



Рис. 2. Розрахункова схема протяжного відсмоктувача конічної форми з тангенціальним входом повітря

Перетворене рівняння про кількість руху мас для розглянутого відсмоктування визначається рівнянням (12):

$$P_{1}F - P_{2}F + P_{n}sin\alpha bdx - \tau_{0}2\pi Rdx = \rho \overline{V_{2}^{2}}F - \rho \overline{V_{1}^{2}}F - \rho V_{n}cos\beta V_{u}bdx$$
(12)

де а – кут конуса, град.

Після невеликих перетворень виразу (12) втрати тиску в повітропроводі конічної форми дорівнюватимуть (рівняння (13)):

$$P_{2} - P_{1} = \rho \left( \overline{V_{1}^{2}} - \overline{V_{2}^{2}} \right) + \frac{\rho}{\pi R^{2}} \int_{x_{1}}^{x_{2}} V_{\text{III}}^{2} b \cos\beta dx - \frac{b}{\pi R^{2}} \int_{x_{1}}^{x_{2}} P_{\text{II}} \sin\alpha dx - \frac{\lambda \rho}{4R} \int_{x_{1}}^{x_{2}} V_{\text{III}}^{2} dx$$
(13)

Отже, втрати тиску в протяжному відсмоктувачі з тангенціальним входом повітря залежать від швидкості повітря у відсмоктувачі, його радіусу, ширини щілини, кута між швидкістю підмішуваного повітря й осьовою швидкістю, оформлення входу.

У загальному випадку втрати тиску в повітропроводі визначають за рівнянням (14):

$$P_2 - P_1 = \zeta_{\rm BX} \frac{\rho V^2}{2} \tag{14}$$

де  $\zeta_{ex}$  – коефіцієнт місцевого опору відсмоктування, віднесений до швидкості *V*.

Визначивши експериментально коефіцієнт  $\zeta_{ax}$ залежно від параметрів, що впливають на нього з рівнянь (11) і (13), можливо розрахувати параметри відемоктування та визначити його опір.

Ступінь закручування потоку повітря всередині повітропроводу

Ступінь закручування повітряного потоку визначено дослідженням поля швидкостей його руху в пристінному шарі повітропроводу, як у місці з найбільш можливим відкладенням пилу. Обертання затихне в тому випадку, коли швидкість поблизу внутрішньої стінки повітропроводу дорівнюватиме середній швидкості потоку повітря в перехідному повітропроводі протяжним за відсмоктуванням.

Досліджено швидкості в поперечних перерізах протяжного відсмоктувача та перехідного повітропроводу, середня швидкість за всмоктувальним пристроєм  $V_{cep}$  визначена за рівнянням (15).

$$V_{\rm cep} = L/(3600F)$$
 (15)

де L – витрата повітря в системі, м<sup>3</sup>/год;

F – площа поперечного перерізу повітропроводу на виході зі всмоктувального повітропроводу, м<sup>2</sup>.

Обертання повітряного потоку всередині всмоктувального пристрою та протяжного повітропроводу визначено за різної ширини прямокутної щілини та за вхідного каналу, що звужується.

Зведений аналіз отриманих результатів наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Порівняння	розподілу	швидкостей з	а постійної	щілини	відсмокт	ування і	щілини,	що звужу	еться, з
		тан	пенціальни	ім входо	м повітря	Я			

Вид	Ширина щілини	$V_{\scriptscriptstyle Makc}\!\!>\!\!V_{\scriptscriptstyle Cep}$	$V_{\scriptscriptstyle Makc9}/V_{\scriptscriptstyle Makc0}$	$V_{{\scriptscriptstyle M}a\kappa c9}/V_{cep}$	V <sub>Makc15</sub> /V <sub>cep</sub>
щыни	0.1.1	· ·	1 4 4	1.52	1.00
Постійна ширина щілини	0,1d	з торця відсмоктувача	1,44	1,52	1,23
	0,15d	6,5d	2,52	1,35	1,19
	0,2d	7,6d	4,00	1,32	1,13
	0,25d	7,9d	8,15	1,22	1,18
лина, що звужується	при співвідношенні	з торця відсмоктувача	1,30	1,86	1,39
	основ трапеції 1:4				
	при співвідношенні	з торця відсмоктувача	1,27	1,85	1,37
	основ трапеції 1:5				
	при співвідношенні	з торця відсмоктувача	1,95	1,62	1,15
	основ трапеції 1:6				
	при співвідношенні	4,9d	2,55	1,50	1,14
III	основ трапеції 1:7				

Незалежно від способу оформлення щілини спостерігається збільшення максимальної пристінної швидкості по всій довжині всмоктувального пристрою. Швидкість повітряного потоку всередині повітропроводів максимальна на ділянці протяжного відсмоктувача на відстані дев'яти діаметрів від його торцевої стінки за постійної щілини та щілини, що звужується. Середня швидкість потоку повітря за протяжним відсмоктувачем значно нижча за максимальну швидкість уздовж внутрішньої стінки перехідного повітропроводу, що свідчить про сформований стало обертовий потік. Найбільше співвідношення максимальної пристінної швидкості в поперечному перерізі перехідного повітропроводу перед входом у камеру статичного тиску V<sub>макс15</sub> (на відстані 15 діаметрів від торця відсмоктувача) до V<sub>сер</sub> за відсмоктувачем спостерігається за постійної ширини щілини 0,1d та в каналі, який звужується, за співвідношення поперечних сторін 1:4 і 1:5. Максимальні пристінні швидкості повітряного потоку в розглянутих випадках перевищують середню швидкість від торця відсмоктувача. Співвідношення максимальної пристінної швидкості повітряного потоку межі на протяжного відсмоктувача і перехідного повітропроводу V<sub>макс9</sub> (на відстані 9 діаметрів від торця відсмоктувача) та максимальної пристінної швидкості повітряного потоку біля торця відсмоктувача V<sub>макс0</sub> характеризує швидкість зростання швидкості повітряного потоку у всмоктувальному пристрої протягом його довжини. За щілинного отвору шириною 0,25d цей

дорівнює максимальний 8,15. показник i Найплавніший розподіл швидкості отримано для вхідного каналу, що звужується, який являє собою прямокутну трапецію зі співвідношенням основ 1:5, та постійної щілини розміром 0,1d. Згідно з експериментальними даними істотне зниження швидкості в пристінному шарі спостерігається на відстані 10 діаметрів від торця відсмоктувача. На наступних ділянках загасання швидкості потоку повільно знижується, що дає змогу зберегтися закрученню в перехідному повітропроводі на відстані, що дорівнює 10 діаметрам від центру всмоктувальної щілини протяжного відсмоктувача.

Визначення рівномірності всмоктування повітря по довжині протяжного відсмоктування

Рівномірне всмоктування повітря можна здійснити зміною ширини цілини по довжині повітропроводу. Форма цілини, що звужується, дає змогу виконати зазначену умову. Досліджено різні співвідношення основ прямокутної трапеції у плані вхідного каналу: 1:3, 1:4, 1:5, 1:6, 1:7, 1:8.

Для кожного типу щілини спостерігається пристінної перевищення швидкості на дні відсмоктувача над осьовою швидкістю. Цe спостереження підтверджує існування закрученого потоку повітря всередині системи. Лінійний розподіл швидкості в пристінному шарі на ділянках протяжного відсмоктування спостерігається y випадку щілинного отвору зі співвідношенням сторін основ трапеції 1:5 та визначається таким рівнянням (16) з достовірністю апроксимації 0,95:

$$V_{\rm np} = \frac{0.3s}{d} + 8.98 \tag{16}$$

де *s* – відстань від торця відсмоктування до розглянутого поперечного перерізу всмоктувального пристрою, м.

Зміну розподілу швидкості у пристінному шарі та за віссю протяжного відсмоктувача за співвідношення сторін основ трапеції 1:5 досліджено за різних витрат повітря в лабораторній установці та графічно зображено на рис. 3.

Згідно з рис 3 рівномірний розподіл швидкості у пристінному шарі з незначним її збільшенням за напрямком руху зберігається за зміни витрати повітря в системі. Також спостерігається лінійна залежність швидкості  $V_{np}$  від співвідношення *s/d*. Вираз лінійного розподілу для витрати повітря 194 м<sub>3</sub>/год наведено у рівнянні (17) з достовірністю апроксимації 0,97, для витрати 220 м<sup>3</sup>/год – у рівнянні (16), для витрати 239 м<sup>3</sup>/год – у рівнянні (18) з достовірністю апроксимації 0,98. Отже, доведено лінійну залежність пристінної швидкості на дні протяжного відсмоктувача від відстані від його торцевої стінки в частках діаметра.

$$V_{\rm np} = 0.31s/d + 9.52 \tag{17}$$

$$V_{\rm np} = 0.22s/d + 8.08 \tag{18}$$



Рис. 3. Зміна швидкостей руху повітря по довжині протяжного відсмоктувача за співвідношення основ сторін прямокутної трапеції 1:5 у плані вхідного каналу

Для найбільш вдалого варіанта виконання щілини вхідного каналу, що звужується, проведено дослідження швидкостей всмоктування на ділянках вхідного отвору через рівні проміжки. На рис. 4 представлено лінійну залежність витрати повітря на ділянках всмоктування по довжині щілинного отвору, що звужується, за співвідношення основ сторін прямокутної трапеції 1:5 у плані вхідного каналу.



Рис. 4. Зміна витрати повітря на ділянках всмоктування по довжині щілинного отвору за співвідношення основ сторін прямокутної трапеції 1:5 у плані вхідного каналу

На рис 4.8 у разі зміни витрати повітря в лабораторній установці витрата повітря на ділянках всмоктування залишається практично постійною з незначним її збільшенням (до 10%) за напрямком pyxy. Біля торцевої стінки протяжного відсмоктування спостерігаються найменші швидкості всмоктування через віддаленість ділянки від вентилятора. Але при цьому ділянка всмоктування має найбільшу площу, тому витрата повітря на ділянці порівнянна з витратами повітря на ділянках, розташованих ближче до спонукача тяги, які мають менші площі всмоктування. Спостерігається лінійна залежність витрати повітря на ділянці всмоктування та довжини ділянки, що розглядається, за довжиною щілинного отвору в частках діаметра відсмоктування. Вираз лінійного розподілу для витрати повітря 187 м<sup>3</sup>/год наведено у рівнянні (19) з достовірністю апроксимації 0,92, для витрати 209 м<sup>3</sup>/год – у рівнянні (20) з достовірністю апроксимації 0,91, для витрати 238 м<sup>3</sup>/год – у рівнянні (21) з достовірністю апроксимації 0,91.

$$L_{\rm yqi} = 0.0001 \frac{s}{d} + 0.0056 \tag{19}$$

$$L_{\rm yqi} = 0.00001 \frac{s}{d} + 0.0073 \tag{20}$$

$$L_{\rm yqi} = 0.00001 \frac{s}{d} + 0.009 \tag{21}$$

Рівномірність розподілу швидкостей по довжині протяжного відсмоктування визначає якість всмоктування забрудненого повітря в аспіраційну Протяжні систему. джерела запилення характеризуються різною інтенсивністю пиловиділення на всій ділянці. Тому для ефективної локалізації викидів пилу необхідно забезпечити видалення запиленого повітря одночасно по всій довжині джерела. Вивчена модифікація форми щілинного отвору всмоктувального пристрою дасть змогу виконати пред'явлену вимогу для локалізації пилового забруднення. Оптимальні розміри щілинного отвору, що звужується, мають місце бути за співвідношення основ сторін прямокутної трапеції 1:5 у плані вхідного каналу.

Факел всмоктування протяжного відсмоктування

Для визначення факела всмоктування проведено дослідження поля швидкостей біля всмоктувальної щілини. У процесі всмоктування підтікання повітря до вхідного каналу відбувається з усіх боків. На рис. 5 представлено поле швидкостей всмоктування у вертикальному перерізі протяжного відсмоктувача відповідно.

Однакові швидкості всмоктування об'єднані у вигляді сімейства кривих.

Напрямок руху потоку повітря до вхідного отвору перпендикулярний кривим рівних 7,5*x/b* швидкостей. На відстані від центру всмоктувального отвору за швидкості всмоктування повітря у вхідний отвір, що дорівнює 0,15 м/с, зберігається можливість уловлювання частинок пилу. У зв'язку з тим, що швидкості всмоктування швидко зменшуються (на відстані 5х/в швидкість всмоктування дорівнює 10% швидкості всмоктування в центрі всмоктувального отвору), протяжний відсмоктувач слід максимально наближати до джерела запилення.

Визначення коефіцієнта місцевого опору відсмоктування

Подальші дослідження проведено за методом багатофакторного аналізу. Цей спосіб вивчення дає більш-менш повне уявлення про характер досліджуваного опору відсмоктування.



Рис. 5. Спектр швидкостей у протяжного відсмоктувача у вертикальному перерізі

Під час потрапляння повітря у всмоктувальний поздовжній канал відсмоктувача виникають втрати тиску, які слід враховувати під час розрахунку аспіраційної системи.

Метод багатофакторного аналізу передбачає послідовне вивчення впливу чинників, зазначених як змінні у функціях. Після визначення залежності коефіцієнта місцевого опору відсмоктування від першої складової (критерію Рейнольдса) досліджується відношення ( $\zeta_{ax}/Re$ ) залежно від наступного множника й так далі.

Визначення впливу сил інерції та в'язкості на опір місцевого відсмоктування

Обробка отриманих експериментальних даних спрощується, якщо виконується умова автомодельності газодинамічних процесів. Це поняття тісно пов'язане з критерієм Рейнольдса *Re* (рівняння (22)):

$$Re = \frac{V_{\rm cep}}{\nu} \tag{22}$$

де V<sub>cep</sub> – середня швидкість руху потоку повітря в поперечному перерізі повітропроводу безпосередньо за протяжним відсмоктувачем, м/с;

v — кінематичний коефіцієнт в'язкості середовища, м<sup>2</sup>/с (дорівнює за умов проведення експерименту 15,3·10<sup>-6</sup> м<sup>2</sup>/с);

*d* – визначальний розмір, в експерименті прийнятий рівним діаметру протяжного відсмоктувача.

Для визначення середньої швидкості руху потоку за відсмоктувачем використано рівняння (15).

Значення витрати повітря в лабораторній установці *L* отримано з рівняння (23) за середньої швидкості в колекторі *V*<sub>сер.к.</sub>, у якому в період експерименту визначався динамічний тиск.

$$L = 3600 F_K V_{\rm cp.\kappa.} \tag{23}$$

де  $F_K$  – площа поперечного перерізу патрубка колектора, м<sup>2</sup>.

Величина середньої швидкості в колекторі визначена таким чином (рівняння 24):

$$V_{\rm cp.\kappa.} = \sqrt{\frac{2p_{\rm дин}}{\zeta_K \rho}} \tag{24}$$

де *р*<sub>дин</sub> – динамічний тиск у колекторі, Па;

*ζК* – коефіцієнт місцевого опору колектора;

 $\rho$  – густина повітря, кг/м<sup>3</sup>.

Вхідна частина колектора виконана за формою лемніскати, що мінімізує втрати місцевого опору. Значення  $\zeta_K$  згідно з довідковими матеріалами дорівнює 0,97.

За *Re*>7000 у течії повітря домінують сили інерції, вплив сил в'язкості втрачається. Така течія є автомодельною, тобто використання критерію Рейнольдса стає формальним.

За результатами експерименту залежність коефіцієнта місцевого опору всмоктувального пристрою  $\zeta_{ex}$  від значень *Re* представлено на рис. 6.



Рис. 6. Графік залежності  $\zeta_{ex} = f_1 (Re)$  за різних висот вхідного щілинного отвору

Як випливає з графіка, умову автомодельності процесу для розглянутої моделі відсмоктування виконано. Зі збільшенням середньої швидкості руху потоку в аспіраційній системі значення показника  $\zeta_{sx}$  залишаються постійними.

Виходячи з отриманих результатів, найкращі показники отримано за висоти щілини 0,05d. У цьому випадку рівняння лінійної залежності розглянутих змінних (25) з достовірністю апроксимації 0,80 має такий вигляд:

$$\zeta_{\rm BX} = -10^{-6} Re + 9.34 \tag{25}$$

Визначення залежності відношення ширини вхідного отвору до діаметра повітропроводу на опір місцевого відсмоктування

3 урахуванням отриманої залежності (рівняння (25)) з використанням методу багатофакторного

аналізу досліджено таке співвідношення (рівняння 26):

$$\frac{\zeta_{\text{BX}}}{f_1(Re)} = f_2(\frac{b}{d}) \tag{26}$$

де b – ширина всмоктувальної щілини протяжного відсмоктувача, м.

Залежність (26) набуває експоненціального розподілу (рис. 7) з достовірністю апроксимації 0,98 за постійної ширини вхідної щілини, що визначається формулою (27). У разі збільшення ширини щілинного отвору коефіцієнт місцевого опору відсмоктування зменшується.

$$\frac{\zeta_{\rm BX}}{-10^{-6}Re+9.34} = 1.598e^{-8.94b/d}$$
(27)



Рис. 7. Графік залежності  $\zeta_{ex}/f_1$  (*Re*) =  $f_2(b/d)$  за постійної ширини щілини

Вираз (26) також вивчено для форми щілинного отвору, що звужується, який у плані має форму прямокутної трапеції. Залежність також має експоненціальний характер із достовірністю апроксимації 0,97 (рис. 8).



Рис. 8. Графік залежності  $\zeta_{ex}/f_1$  (*Re*) =  $f_2(b/d)$  за щілини, що звужується

Як основне рівняння залежності коефіцієнта місцевого опору всмоктувального пристрою від відношення ширини вхідного отвору до діаметру повітропроводу прийнято вираз (27) через більшу вірогідність відповідності результатів експериментів з експоненціальною залежністю досліджуваних параметрів. Подальший аналіз залежних змінних у рівнянні (28) передбачає аналіз відношення площ всмоктувального отвору до поперечного перерізу перехідного повітропроводу.

Залежність співвідношення площ вхідної щілини та поперечного перерізу перехідного повітропроводу на опір місцевого відсмоктування

Подальше вивчення коефіцієнта місцевого опору протяжного відсмоктувача проведено з урахуванням отриманої залежності (27), яке для подальших експериментів набуває вигляду (рівняння (28)):

$$\frac{\zeta_{\text{BX}}}{f_1(Re)f_2\left(\frac{b}{d}\right)} = f_3(F_{\text{BX}}/F_o)$$
(28)

де  $F_{ex}$  – площа вхідного отвору у протяжний відсмоктувач, м<sup>2</sup>;

*F<sub>o</sub>* – площа поперечного перерізу перехідного повітропроводу на виході із протяжного відсмоктувача, м<sup>2</sup>.

У цій серії дослідів варіювалася ширина вхідної щілини та спосіб її оформлення. Досліджено різні розміри щілинного отвору за постійної ширини щілини на всій довжині всмоктувального пристрою, а також за звужуваної форми щілинного отвору, що в плані має форму прямокутної трапеції. Найкращий результат отримано при зміні параметрів щілини, що звужується. Залежність співвідношення площ щілини поперечного вхідної та перерізу повітропроводу на опір місцевого відсмоктування має експоненціальний характер (рис. 9) is достовірністю апроксимації 0,93.



Рис. 9. Графік залежності  $\zeta_{ex}/(f_1(Re) f_2(b/d)) = f_3 (F_{ex}/F_o))$  за щілини, що звужується

Також як у випадку залежності коефіцієнта місцевого опору відсмоктування від ширини щілинного отвору, у випадку зростання площі поперечного перерізу вхідної щілини  $\zeta_{ax}$  зменшується. Вираз має такий вигляд (29):

$$\frac{\zeta_{\rm BX}}{(-10^{-6}Re+9.34)*(1.5e^{-8.94b/d})} = 2.38e^{-0.65F_{\rm BX}/F_0} (29)$$

Вплив довжини щілинного отвору на коефіцієнт місцевого опору відсмоктування

Під час визначення залежності протяжності вхідної щілини на коефіцієнт місцевого опору всмоктувального пристрою використано вираз (29), який у наступній серії дослідів набуває вигляду (рівняння 30):

$$\frac{\zeta_{\text{BX}}}{f_1(Re)f_2\left(\frac{b}{d}\right)f_3(F_{\text{BX}}/F_O)} = f_4(l/d) \tag{30}$$

Рівняння (30) має степеневий розподіл (рисунок 10) із достовірністю апроксимації 0,99. Що більша довжина щілинного отвору, то більший коефіцієнт місцевого опору відсмоктування.



Рис. 10. Графік залежності  $\zeta_{ex}/(f_1(Re) f_2(b/d)) = f_3 (F_{ex}/F_o))$  за постійної ширини щілини

Залежність коефіцієнту місцевого опору протяжного відсмоктування від протяжності вхідної щілини відображено в такому вигляді (рівняння (31)):

$$\frac{\zeta_{\text{BX}}}{(-10^{-6}Re+9.34)(1.59e^{-8.94b/d})(2.39e^{-0.65F_{\text{BX}}/F_0})} = 1.01e^{0.14l/d}$$
(31)

Вираз (31) дав змогу отримати остаточну формулу (32) для визначення коефіцієнта місцевого опору протяжного відсмоктувача з тангенціальним входом повітря:

$$\zeta_{\rm BX} = (-10^{-6}Re + 9.34)(1.59e^{-\frac{8.94b}{d}})(2.39e^{-\frac{0.65F_{\rm BX}}{F_o}})(1.01e^{0.14l/d}) (32)$$

У результаті проведених досліджень розроблено основи для розрахунку повітроприймальних пристроїв у системі аспірації для видалення повітря від протяжних джерел пилу. Коефіцієнт місцевого опору відсмоктування необхідний для розрахунку втрат тиску при вході повітря в систему аспірації. Отриманий вираз дає змогу розрахувати ці втрати незалежно від способу оформлення щілини у протяжному відсмоктувачі: за постійної ширини щілинного отвору та трапецієподібної його форми.

Ефективність всмоктування частинок пилу протяжним відсмоктувачем із тангенціальним входом повітря

На основі проведених досліджень спектра всмоктування протяжного відсмоктувача з тангенціальним входом повітря (рис. 5) пилинка може бути захоплена на відстані 7,5x/b, де x – відстань точки вимірювання від площини всмоктування, м; b – ширина щілинного отвору відсмоктувача, м. Отже, визначено відстань, на якій може бути захоплена вуглецева пилинка певного розміру (рис. 11).

Для більш точного аналізу відстані, на якій може бути розміщений протяжний відсмоктувач із тангенціальним входом повітря відносно джерела запилення, необхідно провести дисперсний аналіз пилу. Для ефективного захоплення конкретного пилу розрахунки варто грунтувати на тому розмірі пилинок, який займає більшу частку в розподілі фракцій. Що дрібніша частинка пилу, то далі може бути розташований всмоктувальний пристрій.

Для візуалізації отриманих експериментально результатів було виконане моделювання у програмному середовищі FlowVision у відповідності з математично розрахованими вихідними даними (рис. 12).



Рис. 11. Залежність розмірів всмоктуваних вуглецевих частинок від відстані до площини всмоктування протяжного відсмоктувача



Рис. 12. Моделювання руху запиленого повітря у протяжному відсмоктувачі з тангенціальним входом

Під час моделювання руху запиленого повітря у протяжному відсмоктувачі з тангенціальним y систему доведено виникнення входом закручування повітряного потоку. За рахунок цього формування найбільші фракції пилу рухатимуться вздовж стінок повітропроводу. Це дає можливість використовувати протяжні відсмоктувачі для видалення грубих фракцій пилу, що містяться в забрудненому повітрі, організовуючи видалення повітря, шо рухається поблизу стінок повітропроводу.

#### Висновки

У результаті виконаного комплексного дослідження зроблено аеродинамічний розрахунок протяжного повітропроводу рівномірного всмоктування з тангенціальним входом повітря. Визначено ступінь закручування потоку повітря всередині повітропроводу, а також рівномірність всмоктування повітря по довжині протяжного відсмоктування. Установлено низку чинників впливу на процес пиловидалення, як-то: факелу всмоктування протяжного відсмоктування; коефіцієнта місцевого опору відсмоктування; сили інерції та в'язкості на опір місцевого відсмоктування. Визначено залежності відношення ширини вхідного отвору діаметра ло повітропроводу на опір місцевого відсмоктування, залежність співвідношення площ вхідної щілини та поперечного перерізу перехідного повітропроводу на опір місцевого відсмоктування, а також вплив довжини щілинного отвору на коефіцієнт місцевого опору відсмоктування. Доведено ефективність всмоктування частинок пилу протяжним відсмоктувачем із тангенціальним входом повітря.

#### Література

1. Ченчева О.О. Вплив пилоутворення при механічному обробленні карбон-карбонових композитів на ризик

виникнення професійних захворювань. [Текст] / О.О. Ченчева, Н.Б. Бурдейна, Є.Є. Лашко, В.Г. Шевченко, І.С. Петренко // Проблеми охорони праці в Україні. – №38(3–4). – 2022. С. 25–33. https://doi.org/10.36804/ nndipbop.38-3-4.2022.25-33

2. Salenko A. Effect of slime and dust emission on microcutting when processing carbon-carbon composites. [Text] / A. Salenko, O. Chencheva, V. Glukhova, V. Shchetynin, M.R.F. Budar, S. Klimenko, E. Lashko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – Vol. 3 No. 1 (105). – 2020. pp. 38–51. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020. 203279

3. Губачов О.І. Комплексне оцінювання ризиків настання страхових нещасних випадків і травматичних подій з використанням компонентного методу. [Текст] / О.І. Губачов, С.В. Сукач, О.О. Ченчева, Н.Н. Цибульник // Комунальне господарство міст. – №4(164). – 2021. С. 178–190. https://doi.org/10.33042/2522-1809-2021-4-164-178-190

4. Чеберячко С.І. Удосконалення процедури вибору фільтрувальних протипилових респіраторів на основі оцінки ризиків. [Текст] / С.І. Чеберячко, О.В. Дерюгін, Т.О. Негрій, О.О. Ченчева // Вісті Донецького гірничого інституту. – №1(50). – 2022. С. 146–147. https://doi.org/10.31474/1999-981X-2022-1-146-157

5. Ченчевой В.В. Дослідження параметрів гідроаероіонного складу повітря робочого приміщення з ультразвуковою іонізацію. [Текст] / В.В. Ченчевой, С.В. Сукач, О.О. Ченчева, Н.С. Федорова, Д.С. Григор'єва // Вісті Донецького гірничого інституту. – №2(47). – 2020. С. 168–174. https://doi.org/10.31474/1999-981x-2020-2-168-175

6. Salenko A. Forming a defective surface layer when cutting parts made from carbon-carbon and carbon-polymeric composites. [Text] / A. Salenko, O. Chencheva, E. Lashko, V. Shchetynin, S. Klimenko, A. Samusenko, A. Potapov, I. Gusarova // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – Vol. 4 No. 1 (94). – 2018. pp. 61–72. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.139556

7. Bayraktar S. Investigation of the cutting forces and surface roughness in milling carbon fiber reinforced polymer composite material. [Text] / S. Bayraktar, Y. Turgut // Materiali in Tehnologije. – Vol. 50 (2016) 4. – 2016. pp. 591– 600. https://doi.org/10.17222/mit.2015.199

8. Sukach S. Studying and substantiation of the method for normalization of airionic regime at industrial premises at the ultrasonic ionization of air. [Text] / S. Sukach, T. Kozlovs'ka, I. Serhiienko, O. Khodakovskyy, I. Liashok, O. Kipko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – Vol. 4/10 (94). – 2018. pp. 36–45 https://doi.org/10.15587/36-45 1729-4061.2018.141060

#### References

1. Chencheva, O., Burdeina, N., Lashko, Y., Shevchenko, V., & Petrenko, I. (2022). Influence of dust formation during mechanical processing of carbon-carbon composites on the risk of occupational diseases. *Labour Protection Problems in Ukraine*, 38(3–4), 25–33. https://doi.org/10.36804/nndipbop. 38-3-4.2022.25-33

2. Salenko, A., Chencheva, O., Glukhova, V., Shchetynin, V., Budar, M. R. F., Klimenko, S., & Lashko, E. (2020). Effect of slime and dust emission on micro-cutting when processing carbon-carbon composites. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(1(105), 38–51. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.203279

3. Hubachov, O., Sukach, S., Chencheva, O., & Tsybulnyk, N. (2021). Investigation of risks of insurance of accidents and traumatic events using the component method.

Municipal Economy of Cities, 4(164), 178–190. https://doi.org/10.33042/2522-1809-2021-4-164-178-190

4. Cheberiachko, S., Deryugin, O., Nehrii, T., & Chencheva, O. (2022). Improvement of the procedure for selection of dust filter respirators on the basis of risk assessment. *Journal of Donetsk Mining Institute*, 1(50), 146–157. https://doi.org/10.31474/1999-981X-2022-1-146-157

5. Chenchevoy, V., Sukach, S, Chencheva, O, Fjodorova, N, & Hryhorieva, D. (2020). Study of parameters of hydroaero-ionic composition of working room air with ultrasonic ionization. *Journal of Donetsk Mining Institute*, 2(47). 168–174. https://doi.org/10.31474/1999-981x-2020-2-168-175

6. Salenko, A., Chencheva, O., Lashko, E., Shchetynin, V., Klimenko, S., Samusenko, A., Potapov, A. & Gusarova, I. (2018). Forming a defective surface layer when cutting parts made from carbon-carbon and carbon-polymeric composites. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(1 (94), 61–72. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.139556

7. Bayraktar, S. & Turgut, Y. (2016). Investigation of the cutting forces and surface roughness in milling carbon fiber reinforced polymer composite material. *Materiali in Tehnologije*, 50 (2016) 4, 591–600. https://doi.org/10.17222/mit.2015.199

8. Sukach S., Kozlovs'ka T., Serhiienko I., Khodakovskyy O., Liashok I., & Kipko O. (2018). Studying and substantiation of the method for normalization of airionic regime at industrial premises at the ultrasonic ionization of air. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(10 (94), 36–45 https://doi.org/10.15587/36-45 1729-4061.2018.141060

Рецензент: доктор технічних наук. доцент, директор навчально-наукового інституту механічної інженерії, транспорту та природничих наук В.С. Бахарєв, Кременчуцький національний університет Михайла Остроградського, імені Україна.

#### Автор: ЧЕНЧЕВА Ольга Олександрівна

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри цивільної безпеки, охорони праці, геодезії та землеустрою

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

E-mail – chenchevaolga@gmail.com

ID ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5691-7884

#### Автор: ЛАШКО Євгеній Євгенович

кандидат технічних наук, доцент кафедри цивільної безпеки, охорони праці, геодезії та землеустрою Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

E-mail – evgeny.lashko.lj@gmail.com

ID ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9691-4648

#### Автор: РЄЗНІК Дмитро Володимирович

кандидат технічних наук, доцент кафедри цивільної безпеки, охорони праці, геодезії та землеустрою Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

*E-mail* – <u>2411dimareznik@gmail.com</u> *ID ORCID:* <u>https://orcid.org/0000-0003-1258-6136</u>

#### Автор: ЧЕБЕРЯЧКО Юрій Іванович

доктор технічних наук, професор, професор кафедри охорони праці та цивільної безпеки Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» E-mail – <u>cheberiachko.yu.i@nmu.one</u> ID ORCID: <u>https://orcid.org/0000-0001-7307-1553</u>

#### Автор: ПЕТРЕНКО Іван Сергійович

асистент кафедри цивільної безпеки, охорони праці, геодезії та землеустрою Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського E-mail – <u>ivanpetrenko95@outlook.com</u> ID ORCID: <u>https://orcid.org/0000-0002-9846-3737</u>

# RESEARCH OF THE AERODYNAMIC PROCESS OF CARBON DUST REMOVAL FROM THE WORKING ZONE

O. Chencheva<sup>1</sup>, Ye. Lashko<sup>1</sup>, D. Rieznik<sup>1</sup>, Yu. Cheberiachko<sup>2</sup>, I. Petrenko<sup>1</sup> <sup>1</sup>Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Ukraine

<sup>2</sup>Dnipro University of Technology, Ukraine

The purpose of this work is research of the aerodynamic process of carbon dust removal from the working zone in order to create safe and harmless working conditions at the production site.

As a result of the research, an aerodynamic calculation of a long air duct of uniform suction with tangential air intake was performed. The degree of twisting of the air flow inside the air duct, as well as the uniformity of air suction along the length of the long suction, were determined. A number of factors affecting the dust removal process have been established, such as suction torch long suction; coefficient of local suction resistance; forces of inertia and viscosity on the resistance of local suction. The dependence of the ratio of the width of the entrance hole to the diameter of the air duct on the local suction resistance, the dependence of the ratio of the areas of the entrance gap and the cross section of the transitional air duct on the local suction resistance, as well as the effect of the length of the entrance slot on the coefficient of local suction resistance were determined. The efficiency of suction of dust particles with an extended suction unit with tangential air entry has been proven.

For a more accurate analysis of the distance at which an extended extractor with tangential air intake can be placed relative to the dust source, it is necessary to conduct a dispersed dust analysis. For effective capture of specific dust, calculations should be based on the size of the dust, which occupies a larger share in the distribution of fractions. The smaller the dust particle, the further the suction device can be located.

To visualize the experimentally obtained results, simulation was performed in the FlowVision software in accordance with the mathematically calculated initial data.

During the simulation of the movement of dusty air in an extended extractor with a tangential entry into the system, the occurrence of swirling of the air flow has been proven. Due to this formation, the largest fractions of dust will move along the walls of the air duct. This makes it possible to use extended extractors to remove coarse fractions of dust contained in polluted air, organizing the removal of air moving near the walls of the air duct.

*Keywords:* carbon dust, aerodynamic calculation, engineering simulation, occupational diseases, occupational health.