

ГІРНИЦТВО

УДК 628.511+622.4+62-784.43

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-6-18>

АНАЛІЗ ВЗАЄМОДІЇ ЛІНІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ СУМІСНОЇ РОБОТИ ПИЛОВЛОВЛЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ ТА СИСТЕМИ МІСЦЕВОГО ПРОВІТРЮВАННЯ У ГІРНИЧІЙ ПРОМИСЛОВOSTІ

Беднюк Олександр Вікторович,

аспірант кафедри охорони праці та цивільної безпеки

Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»

ORCID ID: 0009-0006-3346-9317

Чеберячко Іван Михайлович,

кандидат технічних наук, доцент,

доцент кафедри гірничої справи

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0002-6193-5729

Крамаренко Нікіта Васильович,

аспірант кафедри охорони праці та цивільної безпеки

Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»,

ORCID ID: 0009-0007-3387-4889

Максимова Наталія Миколаївна

кандидат технічних наук, доцент,

доцент кафедри безпеки праці та охорони довкілля

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0003-1684-7479

Левченко Костянтин Анатолійович,

кандидат технічних наук, доцент,

доцент кафедри гірничої справи

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0009-0005-6490-8805

Болібрux Борис Васильович,

доктор технічних наук, професор,

професор кафедри цивільної безпеки

Національного університету «Львівська політехніка»

ORCID ID: 0000-0002-9879-7454

Зменшення запиленості рудникової атмосфери привибійного простору тупикових виробок за рахунок застосування обґрунтованих ефективних параметрів систем вентиляції і пиловловлювання при їх сумісній роботі

У роботі використано аналітичні методи для дослідження процесів аерології та пилової динаміки при сумісній роботі систем вентиляції і пиловловлювання. Встановлено, що при використанні сумісної роботи систем вентиляції і пиловловлювання виникають явища, які можуть призвести до значного зниження ефективності роботи цих систем, і зрештою до аварійних ситуацій, а також підвищити ризик виникнення професійних захворювань фіброгенної дії. На підставі виконаних досліджень розроблено матриці взаємного впливу систем вентиляції і пиловловлювання, що дозволяють визначити діапазон ефективності спільної роботи систем пиловловлювання та вентиляції тупикових гірничих виробок. Науково обґрунтовано фактори взаємного впливу процесів аерології та пилодинаміки, що визначають стан рудникової атмосфери та рівень безпеки у привибійному просторі тупикової виробки; показано, що цей вплив зумовлений параметрами вентиляційних потоків,

що залежать від продуктивності вентиляційного і пиловловлюючого обладнання. Практичне значення отриманих результатів полягає у використанні розроблених матриць впливу сумісної роботи систем вентиляції і пиловловлювання для поліпшення санітарно-гігієнічних умов і підвищення рівня безпеки у привибійному просторі гірничих виробок при їх проведенні механізованим способом.

Ключові слова: пилоутворення, повітряні течії, відбійка гірських порід, умови праці, дрібнодисперсний пил.

Bedniuk Oleksandr, Cheberichko Ivan, Kramarenko Nikita, Maksymova Nataliia, Levchenko Kostiantyn, Bolibrukh Borys. Analysis of the Interaction of Linear Parameters in the Joint Operation of Dust Collection Devices and Local Ventilation System in Mining Industry

Reduction of dustiness in the mine atmosphere of the working face of dead-end workings through the use of reasonable and effective parameters of ventilation and dust collection systems when they work together.

The work uses analytical methods to study aerology and dust dynamics processes during the combined operation of ventilation and dust collection systems. It has been established that when ventilation and dust collection systems work together, phenomena occur that can significantly reduce the efficiency of these systems and ultimately lead to emergency situations, as well as increase the risk of occupational diseases of fibrogenic action. Based on the research, matrices of mutual influence of ventilation and dust collection systems have been developed, which allow determining the range of efficiency of the joint operation of dust collection and ventilation systems in dead-end mine workings. The factors of mutual influence of aerology and dust dynamics processes that determine the state of the mine atmosphere and the level of safety in the near-face space of a dead-end mine have been scientifically substantiated; it has been shown that this influence is determined by the parameters of ventilation flows, which depend on the performance of ventilation and dust collection equipment. The practical significance of the results obtained lies in the use of the developed matrices of the influence of the joint operation of ventilation and dust collection systems to improve sanitary and hygienic conditions and increase the level of safety in the working face of mine workings when they are carried out by mechanised means.

Key words: dust formation, air currents, rock breaking, working conditions, fine dust.

Вступ. Об'єктом дослідження є процеси аерології та пилодинаміки у привибійному просторі тупикових виробок при сумісному використанні систем місцевої вентиляції і пиловловлювання в умовах проходки гірничих виробок механізованим способом.

В даний час, проведення тупикових виробок пов'язане з високими темпами їх проходки, що потребує використання прохідницьких комбайнів високої продуктивності. У зв'язку з цим, очищення повітря, що виходить з привибійного простору тупикових виробок набуває великого значення, особливо при роботі комбайнів нового покоління. У цьому випадку утворюється велика кількість вуглепородного пилу, який виноситься із забою, осідає на поверхню виробки і гірниче обладнання, погіршуючи пиловиховбезопасу, а дрібнодисперсний розповсюджується по довжині виробки і далі по загальношахтній вентиляційній системі на поверхню, погіршуючи рудникову атмосферу та екологічну обстановку на поверхні.

Застосування сучасних заходів і засобів зменшення концентрації пилу, при інтенсивному руйнуванні масиву гірських порід, не забезпечує зниження запиленості до нормативних рівнів, що визначається величиною гранично допустимої концентрації. Це зумовлює необхідність подальшого вдосконалення систем знепилювання, контролю та управління процесами пилової динаміки.

При використанні сучасних систем пиловловлювання сумісно з місцевою системою

вентиляції, не враховується їх взаємний вплив, що може призвести до значного зниження ефективності їх роботи і зрештою до аварійних ситуацій, а також підвищити ризик виникнення професійних захворювань фіброгенної дії.

З метою наукового обґрунтування параметрів систем пиловловлювання і місцевої вентиляції при їх сумісній роботі в умовах проведення тупикових виробок механізованим способом, а також адаптації цих систем до сучасних способів і схем провітрювання з урахуванням пилової динаміки, у роботі поставлено завдання розробити спосіб визначення ефективних параметрів сумісної роботи цих систем для поліпшення санітарно-гігієнічних умов і підвищення рівня безпеки у привибійному просторі гірничих виробок при їх проведенні механізованим способом.

Дослідження процесів аерології та пилодинаміки у привибійному просторі тупикових виробок при їх проведенні механізованим способом, є основним завданням при обґрунтуванні ефективних засобів і заходів боротьби з пилом.

Створення ефективної системи для забезпечення умов праці гірників у привибійному просторі тупикових виробок згідно з нормативними актами, базується на виборі оптимальних рішень з сумісної роботи пиловловлювального та вентиляційного обладнання, його розташування відносно джерела пилоутворення.

Дослідженням з аерології та пилової динаміки в тупикових виробках присвячено багато наукових робіт [1-3]

Встановлено, що струмінь свіжого повітря, який подається у привибійний простір тупикової виробки, має максимальний динамічний тиск і відповідно найбільшу кінетичну енергію при виході його з нагнітального повітроводу [4], що призводить до значного впливу вказаних характеристик на роботу допоміжних засобів зниження запиленості. При подальшому русі по привибійному простору, швидкість і величина енергії повітряного потоку зменшуються. При цьому відбувається ефективне перемішування повітря у вибої з пилом, зниження його концентрації і винесення пилоповітряної суміші з вибою в результаті спільної дії конвективного переносу та турбулентної дифузії, що зумовлює діяльність вентиляції. Якщо вільний струмінь не досягає забою, то у привибійній зоні утворюється застійна зона, в якій концентрація пилу залишається високою. Вентиляція у цьому випадку є неефективною, тому що процес зниження концентрації пилу і винесення його з привибійної зони відбувається переважно під дією молекулярної дифузії, що обумовлює високий рівень запиленості на робочому місці машиніста комбайна.

Залежність дальності вентиляційного струменя у привибійному просторі від площі поперечного перерізу виробки виведена на основі формул [5,11].

Провітрювання привибійного простору тупикової виробки ускладнюється також наявністю у ньому руху одночасно двох повітряних потоків (свіжого і забрудненого) в протилежних напрямках. Потік свіжого повітря рухається у бік вибою, а забруднена пилометаноповітряна суміш рухається у бік гирла виробки. Характер їх поширення додатково залежить від зашарованості привибійного простору обладнанням, що сприяє формуванню застійних зон [6,11].

У зв'язку зі значним зростанням запиленості в механізованих прохідницьких вибоях в останній

час, широке застосування сумісно з нагнітальним провітрюванням знайшли локально встановлені пиловловлювачі системи [4-5]. Проте питання взаємного впливу систем пиловловлювання та місцевої вентиляції і явища, що пов'язані з цим впливом вивчені недостатньо, тому цей взаємний вплив не враховується при розрахунках. Нині ні методичними, ні нормативними документами не регламентовано параметри сумісної роботи таких систем.

Методи та методики дослідження. При застосуванні пиловловлювача можливо три варіанти провітрювання вибою:

1. продуктивність пиловловлювача менше від витрати повітря, що надходить у вибій (рисунк 1);
2. продуктивність пиловловлювача повітря дорівнює витраті повітря, що надходить у вибій (рисунк 2);
3. продуктивність пиловловлювача більше витрати повітря, що надходить у вибій (рисунк 3).

У варіанті 1 (рис. 1) пиловловлювач забирає частину повітря, що надходить по вентиляційному ставу в забій ($Q_{наг.}$) в зоні пилоутворення I, при цьому в перерізі комбайна (зона II), що становить приблизно половину перерізу виробки, швидкість повітря становить 0,25 м/с і більше, що відповідає вимогам нормативних документів забезпечення швидкості повітря в тупикових вибоях не менше 0,25 м/с [7]. Мінімальна швидкість в зоні II, як видно з рисунку 1, забезпечується за рахунок неочищеного повітря, що потрапляє далі у виробку в зону III, де змішується з очищеним, що виходить з патрубка пиловідділювача.

Даний варіант є прийнятним у частині організації провітрювання та розрідження метану, що виділяється у вибій під час гірничих робіт. При цьому за пиловим фактором цей варіант не є ефективним, тому що у цьому варіанті через пиловловлювач проходить і, отже, очищається частина запиленого

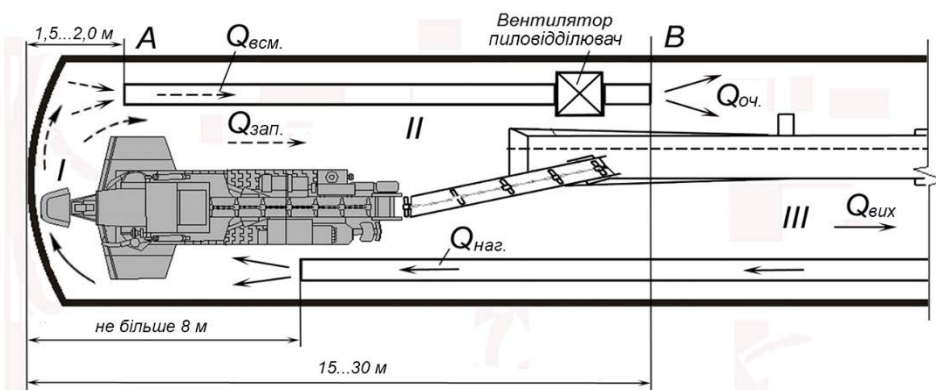


Рис. 1. Напрямок руху вентиляційних струменів при продуктивності пиловловлювача меншим, ніж витрата повітря, що подається у вибій

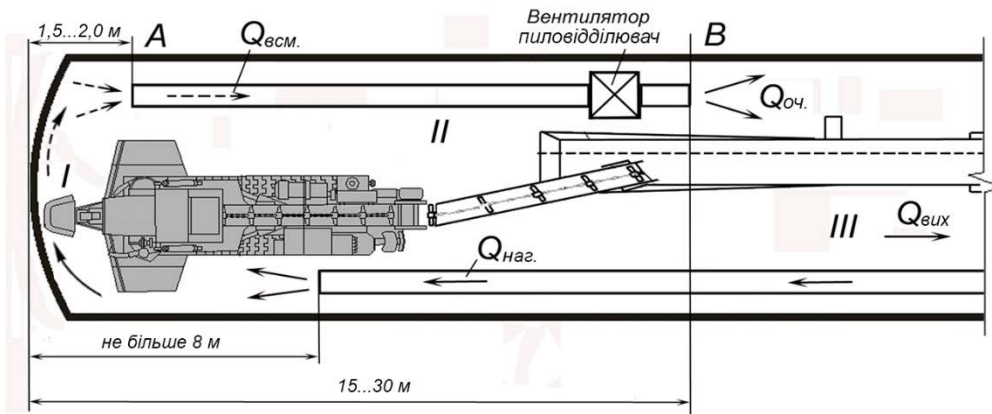


Рис. 2. Напрямок руху вентиляційних струменів при продуктивності пиловловлювача, що дорівнює витраті повітря, що подається у вибій

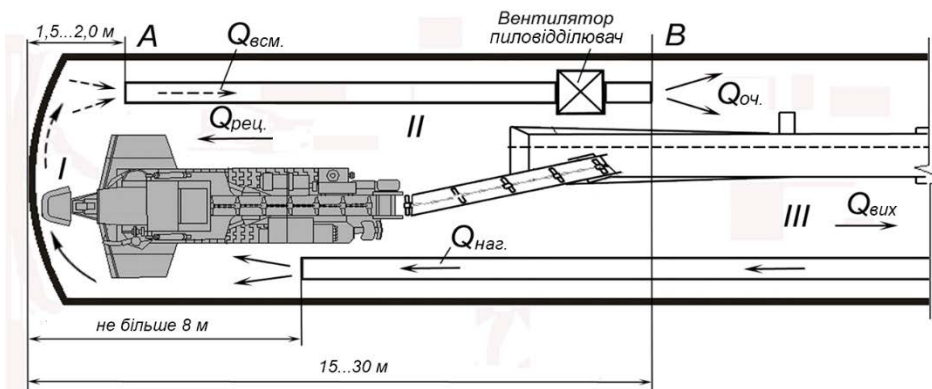


Рис. 3. Напрямок руху вентиляційних струменів при продуктивності пиловловлювача, що перевищує витрату повітря, що надходить у вибій

повітря. Навіть при заявленій 99% ефективності пиловловлювача з очищення повітря, що проходить через нього від пилу, в цілому по виробці зменшення кількості дрібнодисперсного пилу, що витає, складе не більше ніж 50%.

У варіанті 2 (рис. 2) за аналогією з варіантом 1 можна дійти невтішного висновку, що швидкість повітря у перерізі комбайна в зоні II становитиме від 0 до 0,25 м/с. У зв'язку з наближенням до нульової швидкості в перерізі комбайна можливе утворення застійних зон з підвищеною концентрацією метану (утворення місцевих, шарових скупчень) в зоні, де є електроенергія і відсутній контроль метану стаціонарними датчиками системи АГК. По пиловому чиннику можна дійти висновку, що ефективність очищення повітря від зваженого у ньому дрібнодисперсного пилу становитиме більше ніж у першому варіанті і може сягати до 99%.

У варіанті 3 у зв'язку з продуктивністю пиловловлювача, що перевищує витрату повітря, що надходить по вентиляційному ставу, буде відбуватися рециркуляція повітря у вибої в перерізі комбайна - між вибоєм і вихлопним патрубком

пиловловлювача в зоні II. У цьому випадку знепилювання повітря становитиме 100%, але за рахунок явища рециркуляції, у зоні II, може бути підвищеною концентрація метану.

На рисунку 4 наведена матриця взаємного впливу продуктивності пиловідсмоктувача і свіжого повітря, що надходить у вибій. У клітинках матриці наведена швидкість і напрямок вентиляційного струменя у привибійній зоні АВ при сумісній роботі вентиляційної системи і пиловідсмоктувача.

$Q_{\text{наг}}, \text{м}^3/\text{с}$						
Витрата повітря у вибої	8	0,71	0,57	0,43	0,28	0,14
	7	0,57	0,43	0,28	0,14	0,0
	6	0,43	0,28	0,14	0,0	-0,14
	5	0,28	0,14	0,0	-0,14	-0,28
	4	0,14	0,0	-0,14	-0,28	-0,43
	3	0,0	-0,14	-0,28	-0,43	-0,57
		Продуктивність пиловідсмоктувача				
		3	4	5	6	7 $Q_{\text{всм}}, \text{м}^3/\text{с}$

Рис. 4. Матриця впливу продуктивності пиловідсмоктувача на кількість повітря, що надходить у вибій

Значення швидкості повітря зі знаком «мінус» вказує на рециркуляцію повітря, що може спричинити накопичення метану до небезпечної кількості. Червона зона матриці вказує на недоцільне використання співвідношення витрати повітря у вибої та продуктивності пиловідсмоктувача з точки зору вимог безпеки. Жовта зона матриці вказує на неефективне використання співвідношення параметрів системи вентиляції і пиловідсмоктувача.

Таким чином, найбільш доцільним (і відповідним вимогам нормативних документів) є варіант, коли продуктивність пиловідсмоктування становитиме приблизно 50...75% від витрати повітря, що надходить у вибій (зелена зона матриці). При цьому застосування пиловідсмоктувача, встановленого у вибої, дозволить при організації провітрювання за першим варіантом забезпечити зниження запилення повітря в 2 рази, при забезпеченні заявленої ефективності пиловідсмоктування.

На рисунку 5 наведено матрицю взаємного впливу якості пилоочищення відпрацьованого повітря в прохідницькому вибої на продуктивність пиловідсмоктування та кількість повітря, що подається у вибій.

$Q_{\text{наг}}, \text{м}^3/\text{с}$						
Витрата повітря у вибої	8	38%	50%	63%	75%	88%
	7	43%	57%	71%	86%	100%
	6	50%	67%	83%	100%	100%
	5	60%	80%	100%	100%	100%
	4	75%	100%	100%	100%	100%
	3	100%	100%	100%	100%	100%
		3	4	5	6	7
		$Q_{\text{всм}}, \text{м}^3/\text{с}$				
		Продуктивність пиловідсмоктувача				

Рис. 5. Матриця взаємного впливу якості пилоочищення відпрацьованого повітря на продуктивність пиловідсмоктування та кількість повітря, що надходить у вибій

У зв'язку з цим постає питання про організацію як ефективного провітрювання, так і ефективного видалення пилу. Витрата повітря, що подається у вибій тупикової виробки, не повинна набагато перевищувати розрахункове повітря, необхідне для провітрювання, а продуктивність пиловловлювача повинна налаштуватися і складати близько 50% від витрати повітря, що подається у вибій.

У гірничих виробках з інтенсивним виділенням пилу, доцільно застосовувати схеми, які виключають потрапляння запиленого повітря на робочі місця. Локалізація джерел пилоутворення

в привибійному просторі, при використанні таких схем, досягається за рахунок розосередженої подачі повітря у вибій [8] (рис. 6).

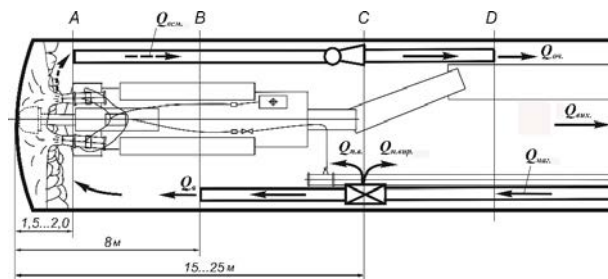


Рис. 6. Схема розосередженої подачі свіжого повітря у вибій: $Q_{\text{наг}}$ – витрата повітря, що подається у виробки по нагнітальному трубопроводу; $Q_{\text{всм}}$ – повітря, що відсмоктується пилеуловлювальною установкою; $Q_{\text{в}}$ – повітря, що подається у вибій, $Q_{\text{п.в.}}$ – повітря, що подається для підсвіження в привибійну частину; $Q_{\text{п.вир.}}$ – подається для підсвіження повітря у виробці

Згідно з [5,9], привибійна частина виробки провітрюється вільним турбулентним струменем (25% від $Q_{\text{наг}}$), а частина повітря (75% від $Q_{\text{наг}}$) випускається через регульовані отвори в нагнітальному трубопроводі на відстані 15...25 м від вибою. Продуктивність пиловловлювальної установки складає 60...70% від $Q_{\text{наг}}$. Таким чином надлишок подачі становить 30...40%.

$Q_{\text{наг}}, \text{м}^3/\text{с}$						
Витрата повітря у вибої	8	0,14	0,29	0,43	0,57	0,71
	7	0,18	0,32	0,46	0,6	0,75
	6	0,21	0,36	0,5	0,64	-0,79
	5	0,25	0,39	0,54	-0,68	-0,82
	4	0,29	0,43	-0,57	-0,71	-0,86
	3	0,32	-0,46	-0,6	-0,75	-0,89
		3	4	5	6	7
		$Q_{\text{всм}}, \text{м}^3/\text{с}$				
		Продуктивність пиловідсмоктувача				

Рис. 7. Матриця впливу продуктивності пиловідсмоктувача на кількість повітря, що надходить у вибій при використанні схеми розосередженої подачі свіжого повітря у вибій

Із порівняння матриці, зображеної на рисунку 4 з матрицею на рисунку 7 видно, що застосування схеми розосередженої подачі свіжого повітря у вибій, значно покращує стан рудникової атмосфери на робочих місцях. Це пов'язано з тим, що при застосуванні такої схеми провітрювання,

створюється повітряна завіса за рахунок свіжого повітря, що надходить в виробку через бічний отвір в нагнітальному трубопроводі. Пристрій, що має бічний випуск повітря в виробку [10, 11], виконано у вигляді ланки труби довжиною ~ 1 м. У середині ланки розміщений шибер, що дозволяє ділити потік повітря, що набігає на дві нерівні частини, одна з яких проходить прямо по трубі і випускається поблизу вибою, а друга частина направляється через бокове вікно трубопроводу у виробку. Цей пристрій називається розподільником повітря або дільником потоку. Для підсвіження потоку повітря в перерізі B подача ВМП повинна бути на 30% більше. При розосередженому розподілі повітря гірники знаходяться на свіжому струмені. При цьому очищене повітря використовується раціонально, що важливо в умовах його дефіциту в протяжних тупикових виробках. У напрямку вибою переміщається потік повітря, що створює аеродинамічну завісу. При такій схемі руху повітря знижується пило-відкладення у виробці, що покращує ситуацію з пиловиховобезпекою. Крім того, за рахунок турбулізуючої дії свіжого струменя, що виходить з нагнітального трубопроводу в 8 м від забою, зменшується ймовірність утворення місцевих скупчень метану.

Для забезпечення максимальної ефективності даного способу за пиловим чинником необхідно, щоб продуктивність пиловловлювальної установки перевищувала витрату подаваного до забою повітря. У зоні А концентрація пилу збільшиться за рахунок надходження сюди пилового потоку. Для зменшення пилоутворення в зоні А можуть бути вжиті такі заходи як зниження швидкості обертання виконавчого органу, що призводить, в свою чергу, до меншого повторного дроблення і розкиду гірської маси. Крім того, збільшення швидкості руху повітря до 0,4...0,5 м/с приводить до зниження концентрації пилу в забої завдяки розрідженню пилової хмари. При збільшенні швидкості провітрювання до критичної (швидкість, при якій спостерігається явище здійсання осілого пилу), запиленість повітря підвищується.

Ефективність пиловловлювання в зоні роботи виконавчого органу комбайна (ділянка виробки АВ) практично дорівнює нулю, про що свідчать розрахунки за виразом [8, 12-14]:

$$\eta = \frac{(k_{\kappa} - 1)\varepsilon}{1 - \varepsilon}$$

де k_{κ} – відношення концентрації пилу в повітрі яке відсмоктується до середньої концентрації пилу в перерізі повітрязабору (перетин А);
 ε – кратність відсмоктування.

Тому для зниження концентрації пилу в цій зоні необхідно застосовувати пилопригнічення піною.

Піна має значно більший обсяг, ніж рідина, з якої вона утворена. Це дозволяє збільшити поверхню взаємодії рідини з пилом, заповнити простір близько виконавчих органів виїмкових машин, екранувати джерело пилоутворення і перешкодити переходу пилу у зважений стан. Піна краще змочує пил, так як розчин піноутворювача в порівнянні з водою має більш низький поверхневий натяг, а тривалість взаємодії шару піни з запиленою поверхнею завжди більше часу контакту краплі розчину зі зваженими в повітрі порошинами. При нанесенні піни на запилену поверхню спостерігається її чистка за рахунок втягування пилинок всередину шару піни.

Розроблені матриці впливу дозволяють підібрати загальні співвідношення параметрів роботи системи пиловловлювача при застосуванні різних схем провітрювання привибійного простору. Для обліку можливих режимів провітрювання та роботи пиловловлювача необхідно розробити більш універсальний і складний спосіб обліку більшої кількості факторів, що впливають. Для цього можна використовувати системний підхід, що базується на тривимірному моделюванні. Для його застосування необхідно розробити критерії оцінки ефективності роботи систем пиловідсмоктувача з урахуванням організації провітрювання прохідницької ділянки.

Висновки. Розглянуто вплив роботи пиловловлювача на процес провітрювання. Встановлено, що при сумісній роботі систем пиловловлювання та вентиляції можуть виникати небезпечні явища: рециркуляція повітряних потоків та застійні зони з наближенням до нульової швидкості повітря, що сприяє підвищенню концентрації метану в місцях скупчення електрообладнання.

Розроблено матриці впливу сумісної роботи систем, що дозволяють визначити діапазон ефективності спільної роботи. Найбільш безпечним та доцільним є співвідношення, коли продуктивність пиловідсмоктування становить 50...75% від витрати повітря, що надходить у вибій при традиційній нагнітальній схемі.

Застосування схеми розосередженої подачі свіжого повітря у вибій значно покращує рудникову атмосферу на робочих місцях, створюючи аеродинамічну завісу і зменшуючи ризики, пов'язані з пиловиховобезпекою та місцевими скупченнями метану.

Для забезпечення максимальної ефективності знепилювання в особливо запилених

зонах (поблизу виконавчого органу комбайна) необхідно застосовувати додаткові заходи, зокрема пилопригнічення піною.

Для обліку всіх можливих режимів провітрювання та роботи пиловловлювача, а також для

точного визначення ефективних параметрів в умовах конкретної виробки, необхідно використовувати системний підхід, що базується на чисельному (тривимірному CFD) моделюванні аерологічних та пилодинамічних процесів.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Batur M., Babii K. Spatial assessment of air pollution resulting from mining and industrial activities: The case of Kryvyi Rih, Ukraine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. 970, Article 012004. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/970/1/012004>
2. Chernykh I. A., Lind E. V., Udaltsov E. A. Reducing worker exposure to dust in surface coal mining. *Interexpo GEO-Siberia*. 2022. Vol. 3. P. 42–48. <https://doi.org/10.33764/2618-981x-2022-3-42-48>.
3. Das M., Salinas V., LeBoeuf J., Khan R., Jacquez Q., Camacho A., Hovingh M., Zychowski K., Rezaee M., Roghanchi P., Rubasinghege G. A toxicological study of the respirable coal mine dust: assessment of different dust sources within the same mine. *Minerals*. 2023. Vol. 13, no. 3. Art. 433. <https://doi.org/10.3390/min13030433>.
4. Dong H. Research on dust generation mechanism and dust reduction of tidal shotcrete in underground coal mine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 693, no. 1. Art. 012081. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/693/1/012081>.
5. Hajizadehmotlagh M., Fahimi D., Singhal A., Paprotny I. Wearable resonator-based respirable dust monitor for underground coal mines. *IEEE Sensors Journal*. 2023. Vol. 23, no. 7. P. 6680–6687. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3241601>.
6. Liu C., Yin Z., He Y., Wang L. Climatology of dust aerosols over the Jiangnan Plain revealed with spaceborne instruments and MERRA-2 reanalysis data during 2006–2021. *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14, no. 17. Art. 4414. <https://doi.org/10.3390/rs14174414>.
7. Mine dust. Dictionary geotechnical engineering. Springer, 2014. P. 871. https://doi.org/10.1007/978-3-642-41714-6_131838.
8. Mukha O., Cheberiyachko Y., Sotskov V., Kamulin A. Studying aerodynamic resistance of a stope involving CAD packages modeling. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 123. Art. 01048. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912301048>.
9. Nascimento P., Taylor S. J., Arnott W. P., Kocsis K. C., Wang X. L., Firouzkouhi H. Development of a real time respirable coal dust and silica dust monitoring instrument based on photoacoustic spectroscopy. *Mine ventilation*. 2021. P. 233–241. <https://doi.org/10.1201/9781003188476-24>.
10. Otgonnasan A., Yundendorj G., Tsogtbayar O., Erdenechimeg Z., Ganbold T., Namsrai T., Damiran N., Erdenebayar E. Respirable dust and respirable crystalline silica concentration in workers of copper mine, Mongolia. *Occupational Diseases and Environmental Medicine*. 2022. Vol. 10, no. 3. P. 167–179. <https://doi.org/10.4236/odem.2022.103013>.
11. United States Department of Labor. Mine Safety and Health Administration. Respirable dust sampling requirements. Washington, 1994.
12. Wippich C., Breuer D., Rissler J., Koppisch D. Estimating respirable dust exposure from inhalable dust exposure. *Annals of Work Exposures and Health*. 2023. Vol. 67, Supplement 1. P. i20–i21. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxac087.053>.
13. Wippich C., Rissler J., Koppisch D., Breuer D. Estimating respirable dust exposure from inhalable dust exposure. *Annals of Work Exposures and Health*. 2020. Vol. 64, no. 4. P. 430–444. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxaa016>.
14. Wu T., Yang Z., Wang A., Zhang K., Wang B. A study on movement characteristics and distribution law of dust particles in open-pit coal mine. *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11. Art. 14631. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-94131-6>.

REFERENCES:

1. Batur, M., & Babii, K. (2022). Spatial assessment of air pollution resulting from mining and industrial activities: The case of Kryvyi Rih, Ukraine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 970, Article 012004. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/970/1/012004>
2. Chernykh, I. A., Lind, E. V., & Udaltsov, E. A. (2022). Reducing worker exposure to dust in surface coal mining. *Interexpo GEO-Siberia*, 3, 42–48. <https://doi.org/10.33764/2618-981x-2022-3-42-48>

3. Das, M., Salinas, V., LeBoeuf, J., Khan, R., Jacquez, Q., Camacho, A., Hovingh, M., Zychowski, K., Rezaee, M., Roghanchi, P., & Rubasinghege, G. (2023). A toxicological study of the respirable coal mine dust: Assessment of different dust sources within the same mine. *Minerals*, 13(3), Article 433. <https://doi.org/10.3390/min13030433>
4. Dong, H. (2021). Research on dust generation mechanism and dust reduction of tidal shotcrete in underground coal mine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 693(1), Article 012081. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/693/1/012081>
5. Hajizadehmotlagh, M., Fahimi, D., Singhal, A., & Paprotny, I. (2023). Wearable resonator-based respirable dust monitor for underground coal mines. *IEEE Sensors Journal*, 23(7), 6680–6687. <https://doi.org/10.1109/jsen.2023.3241601>
6. Liu, C., Yin, Z., He, Y., & Wang, L. (2022). Climatology of dust aerosols over the Jiangnan Plain revealed with space-borne instruments and MERRA-2 reanalysis data during 2006–2021. *Remote Sensing*, 14(17), Article 4414. <https://doi.org/10.3390/rs14174414>
7. Mine dust. (2014). In *Dictionary geotechnical engineering/Wörterbuch GeoTechnik* (p. 871). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-41714-6_131838
8. Mukha, O., Cheberiachko, Y., Sotskov, V., & Kamulin, A. (2019). Studying aerodynamic resistance of a stope involving CAD packages modeling. *E3S Web of Conferences*, 123, Article 01048. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912301048>
9. Nascimento, P., Taylor, S. J., Arnott, W. P., Kocsis, K. C., Wang, X. L., & Firouzkouhi, H. (2021). Development of a real time respirable coal dust and silica dust monitoring instrument based on photoacoustic spectroscopy. In *Mine ventilation* (pp. 233–241). <https://doi.org/10.1201/9781003188476-24>
10. Otgonnasan, A., Yundendorj, G., Tsogtbayar, O., Erdenechimeg, Z., Ganbold, T., Namsrai, T., Damiran, N., & Erdenebayar, E. (2022). Respirable dust and respirable crystalline silica concentration in workers of copper mine, Mongolia. *Occupational Diseases and Environmental Medicine*, 10(3), 167–179. <https://doi.org/10.4236/odem.2022.103013>
11. United States Department of Labor, Mine Safety and Health Administration. (1994). *Respirable dust sampling requirements*. U.S. Department of Labor, Mine Safety and Health Administration.
12. Wippich, C., Breuer, D., Rissler, J., & Koppisch, D. (2023). Estimating respirable dust exposure from inhalable dust exposure. *Annals of Work Exposures and Health*, 67(Supplement_1), i20–i21. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxac087.053>
13. Wippich, C., Rissler, J., Koppisch, D., & Breuer, D. (2020). Estimating respirable dust exposure from inhalable dust exposure. *Annals of Work Exposures and Health*, 64(4), 430–444. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxaa016>
14. Wu, T., Yang, Z., Wang, A., Zhang, K., & Wang, B. (2021). A study on movement characteristics and distribution law of dust particles in open-pit coal mine. *Scientific Reports*, 11, Article 14631. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-94131-6>



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 12.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 31.12.2025
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.03.2026