

**СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

Факультет інженерії

Кафедра хімічної інженерії та екології

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до випускної кваліфікаційної роботи
освітньо-кваліфікаційного рівня **магістр**

спеціальності 184 «Гірництво»

на тему:

**Дослідження перенесення та осадження пилу у вентиляційних
потоках підземних вугільних шахт**

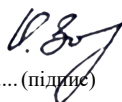
Виконав студент групи ГІР-25ДМ



Шустова О.М.

..... (підпис)

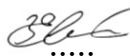
Керівник



Захарова О.І.

..... (підпис)

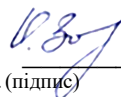
Завідувач кафедри



Зубцов Є.І.

..... (підпис)

Рецензент



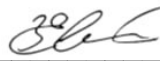
..... (підпис)

Київ, 2025

**СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

Факультет інженерії
Кафедра хімічної інженерії та екології
Освітньо-кваліфікаційний рівень: магістр
Спеціальність: 184 «Гірництво»

**ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри**

 доц. Зубцов Є.І.

« ____ » _____ 2025 р.

**З А В Д А Н Н Я
НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Шустова Оксана Миколаївна

1. Тема роботи: Дослідження перенесення та осадження пилу у вентиляційних потоках підземних вугільних шахт
2. Керівник роботи: Захарова О. І., к.х.н., доцент кафедри, затверджено наказом закладу вищої освіти від 13.10.2025 р. № 208/20.04
2. Строк подання студентом роботи: 15.12.25р.
3. Вихідні дані до роботи: матеріали переддипломної практики та гірничотехнічна література.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): згідно програми дипломного проектування та методичних вказівок по складанню дипломної роботи студентами напряму підготовки 184 «Гірництво».
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):
 1. Геологічний розтин родовища.
 2. Схема розкриття, підготовки та система розробки.
 3. Паспорт виймання вугілля, кріплення та управління покрівлею у лаві.
 4. Паспорт проведення та кріплення підготовчої виробки.
 5. Основна частина проекту.
 6. Економічна частина проекту.

6. Консультанти розділів:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 13.10.25

8.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту	Строк виконання етапів проекту	Примітка
1	Геологія родовища	13.10.25-14.10.25	
2	Розробка основних напрямків проекту	15.10.25-16.10.25	
3	Основна частина проекту	17.10.25-20.10.25	
4	Економічна частина проекту	21.10.25-22.10.25	

Студент



Шустова О.М.

Керівник проекту



Захарова О.І.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ УТВОРЕННЯ ТА ПЕРЕНЕСЕННЯ ВУГІЛЬНОГО ПИЛУ В ПІДЗЕМНИХ ШАХТАХ	8
РОЗДІЛ 2. ВПЛИВ ВЕНТИЛЯЦІЙНИХ ПОТОКІВ НА ПЕРЕНЕСЕННЯ ПИЛУ У ПІДЗЕМНИХ ВИРОБКАХ	21
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ПИЛОВОГО РЕЖИМУ У ВЕНТИЛЯЦІЙНІЙ МЕРЕЖІ ПІДЗЕМНОЇ ШАХТИ	32
РОЗДІЛ 4. ТЕОРЕТИЧНІ ПІДХОДИ ДО МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕНЕСЕННЯ ТА ОСАДЖЕННЯ ПИЛУ	39
РОЗДІЛ 5. ШЛЯХИ ЗМЕНШЕННЯ ЗАПИЛЕНOSTІ У ВЕНТИЛЯЦІЙНИХ ПОТОКАХ ПІДЗЕМНИХ ВУГІЛЬНИХ ШАХТ.....	49
ВИСНОВКИ	57
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	61

РЕФЕРАТ

Випускна кваліфікаційна робота: 64 стор., 15 рис., 10 табл., 49 джерел літератури.

Об'єкт дослідження: вентиляційні потоки та пиловий режим у підземних вугільних шахтах.

Випускна кваліфікаційна робота присвячена теоретичному дослідженню процесів перенесення та осадження вугільного пилу у вентиляційних потоках підземних вугільних шахт. Актуальність теми зумовлена значним негативним впливом вугільного пилу на умови праці гірників, підвищенням вибухонебезпечності гірничих виробок, а також зростанням вимог до безпеки та ефективності вентиляційних систем у сучасних умовах ведення гірничих робіт. Формування пилового режиму в шахтах характеризується складною взаємодією аеродинамічних процесів, геометрії вентиляційної мережі та фізичних властивостей пилових частинок, що потребує ґрунтового теоретичного аналізу.

Метою роботи є теоретичний аналіз закономірностей перенесення та осадження вугільного пилу у вентиляційних потоках підземних вугільних шахт, а також узагальнення підходів до зменшення запиленості шляхом оптимізації вентиляційних параметрів. У роботі розглянуто фізико-механічні властивості вугільного пилу, джерела його утворення та особливості розповсюдження у вентиляційних виробках. Проаналізовано вплив швидкості та напрямку повітряного потоку, турбулентності та геометрії виробок на процеси перенесення і накопичення пилу. Окрему увагу приділено теоретичним підходам до моделювання пилового режиму та аналізу факторів, що зумовлюють формування зон підвищеного пилонакопичення.

ВУГІЛЬНИЙ ПИЛ, ВЕНТИЛЯЦІЙНІ ПОТОКИ, ПІДЗЕМНІ ВУГІЛЬНІ ШАХТИ, ПЕРЕНЕСЕННЯ ПИЛУ, ОСАДЖЕННЯ ПИЛУ, ПИЛОВИЙ РЕЖИМ, ШАХТНА ВЕНТИЛЯЦІЯ, ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНІСТЬ, ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА, МОДЕЛЮВАННЯ ПИЛУ.

ВСТУП

Підземний видобуток вугілля супроводжується утворенням значної кількості пилу, який є одним із найбільш небезпечних виробничих факторів у вугільних шахтах. Вугільний пил утворюється під час очисних і підготовчих робіт, руйнування вугілля і породи, транспортування гірничої маси, роботи очисного та транспортного обладнання. Найбільш небезпечним є дрібнодисперсний пил, здатний тривалий час перебувати у зваженому стані та переноситися вентиляційними потоками на значні відстані по вентиляційній мережі шахти.

Особливу небезпеку становить так званий «плаваючий» вугільний пил з розміром частинок, як правило, менше 75 мкм. Цей пил не лише негативно впливає на здоров'я гірників, спричиняючи розвиток професійних захворювань органів дихання, але й відіграє ключову роль у виникненні та розвитку вибухів у вугільних шахтах. За наявності метану навіть незначне займання може призвести до повторного підняття осілого пилу з поверхонь виробок, що значно підсилює вибух і збільшує масштаби аварії. Саме тому питання перенесення та осадження пилу у вентиляційних потоках є критично важливими з точки зору промислової безпеки.

Вентиляція є основним засобом боротьби з пилом у підземних умовах. Однак вентиляційний струмінь виконує подвійну роль: з одного боку, він зменшує концентрацію пилу шляхом розбавлення і винесення його з робочих зон, а з іншого боку, саме вентиляційні потоки забезпечують перенесення пилових частинок по вентиляційній мережі шахти. У результаті цього пил може осідати на покрівлі, боках і підшві гірничих виробок на значних відстанях від джерела його утворення, створюючи умови для вторинного пилоутворення та накопичення вибухонебезпечних відкладень.

Незважаючи на значну кількість досліджень, присвячених джерелам пилу та засобам пилопригнічення, питання закономірностей перенесення і осадження пилу у вентиляційних потоках залишаються недостатньо вивченими. Більшість практичних заходів з пилобезпеки, зокрема

нанесення інертного пилу та вибір місць і періодичності пилопригнічення, часто ґрунтуються на узагальненому досвіді без детального урахування реального розподілу пилу у вентиляційній мережі. Сучасні дослідження показують, що процеси перенесення та осадження пилу залежать від швидкості та структури повітряного потоку, турбулентності, геометрії виробок, розміру та щільності пилових частинок, а також від характеру вентиляційної схеми шахти.

У зв'язку з цим актуальним є застосування науково обґрунтованих методів дослідження, зокрема математичного та чисельного моделювання, для аналізу поведінки пилу у вентиляційних потоках. Використання сучасних підходів до моделювання дозволяє оцінити шляхи міграції пилу, зони його інтенсивного осадження та потенційно небезпечні ділянки вентиляційної мережі. Отримані результати можуть бути використані для підвищення ефективності вентиляційних і пилопригнічувальних заходів та зниження ризику аварій і професійних захворювань.

Таким чином, дослідження перенесення та осадження пилу у вентиляційних потоках підземних вугільних шахт є важливим науково-практичним завданням, спрямованим на підвищення рівня промислової безпеки, поліпшення умов праці та зменшення негативного впливу пилу на здоров'я гірників. Саме цим обґрунтовується актуальність обраної теми магістерської роботи.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ПИЛОУТВОРЕННЯ У ПІДЗЕМНИХ ВУГІЛЬНИХ ШАХТАХ

1.1. Джерела утворення вугільного пилу в підземних виробках

Утворення вугільного пилу є невід'ємною складовою підземного видобутку вугілля і супроводжує практично всі технологічні процеси, що виконуються у шахті. Пил формується внаслідок механічного руйнування вугілля та вміщуючих порід, а також під час переміщення гірничої маси і роботи шахтного обладнання. Кількість, дисперсний склад і фізичні властивості пилу залежать від характеру гірничих робіт, міцності вугілля і порід, типу застосовуваного обладнання та режимів вентиляції.

Основним джерелом пилу у підземних вугільних шахтах є очисні роботи. Під час роботи очисних комбайнів, стругів, буропідричних робіт або роботи прохідницьких комбайнів відбувається інтенсивне руйнування вугільного масиву, що супроводжується утворенням значної кількості дрібнодисперсних частинок. Особливо небезпечним є пил, який утворюється безпосередньо в зоні різання або дроблення, оскільки значна частина таких частинок має розміри менше 75 мкм і здатна тривалий час перебувати у зваженому стані та легко захоплюватися вентиляційним потоком[1].

Суттєвим джерелом пилу є також підготовчі роботи, зокрема проведення гірничих виробок у вугіллі та породах. Під час буріння шпурів, різання породи прохідницькими машинами і навантаження вибухової маси утворюється пил різного дисперсного складу. Частина цього пилу осідає поблизу місця утворення, однак дрібні фракції легко підхоплюються повітряним потоком і розповсюджуються по вентиляційній мережі.

Значну роль у загальному пиловому навантаженні відіграють транспортні процеси. Під час транспортування вугілля стрічковими конвеєрами, перевантаження гірничої маси у пересипних пунктах, падіння шматків вугілля з висоти та їх тертя об елементи обладнання утворюється вторинний пил. Такий пил часто має дрібний розмір частинок і формується вже після первинного руйнування вугілля. Саме транспортний пил є одним

із основних джерел пилу у віддалених від очисного вибою виробках, що підтверджується результатами досліджень перенесення пилу у вентиляційних мережах.

Окрему групу джерел становить вторинне пилоутворення, пов'язане з повторним підняттям раніше осілого пилу. Пил, який відклався на покрівлі, боках і підшві гірничих виробок, може знову переходити у зважений стан під дією вентиляційного струменя, роботи рухомого обладнання або пересування людей. Особливо інтенсивно процес повторного підняття пилу відбувається у виробках з підвищеною швидкістю повітря та за наявності турбулентних зон, де повітряний потік взаємодіє з нерівностями поверхонь[19].

Дослідження показують, що у вентиляційних мережах підземних шахт пил може переноситися на значні відстані від місця утворення. При цьому джерело пилу не завжди співпадає з місцем його найбільшого накопичення. Це зумовлено тим, що вентиляційний потік переносить дрібнодисперсний пил по всій системі виробок, а його осадження відбувається в зонах зі зменшенням швидкості повітря, зміною напрямку потоку або підвищеною турбулентністю. У таких місцях формуються пилові відкладення, які з часом можуть стати джерелом вторинного пилоутворення та вибухонебезпечних ситуацій.

Таким чином, джерела утворення вугільного пилу у підземних шахтах мають комплексний характер і включають як первинні процеси руйнування вугілля і порід, так і вторинні процеси, пов'язані з транспортуванням і повторним підняттям осілого пилу. Розуміння ролі кожного з цих джерел є необхідною умовою для подальшого аналізу процесів перенесення та осадження пилу у вентиляційних потоках.

1.2. Класифікація шахтного пилу та його фізико-механічні властивості
Шахтний пил, що утворюється у підземних вугільних шахтах, є складною дисперсною системою, властивості якої визначають характер його перенесення вентиляційними потоками та умови осадження на поверхнях гірничих виробок. Для аналізу пилового режиму у вентиляційній мережі

важливим є поділ пилу за розміром частинок, походженням і фізико-механічними характеристиками, оскільки саме ці параметри визначають поведінку пилу в повітряному потоці[11].

Таблиця 1.1 – Класифікація шахтного пилу за розміром частинок та характером небезпеки

Вид пилу	Діапазон розмірів частинок, мкм	Основна зона поширення у шахті	Характер небезпеки
Крупнодисперсний пил	> 100	Поблизу місця утворення, підшва виробок	Механічне забруднення, вторинне пилоутворення
Дрібнодисперсний пил	10–75	Вентиляційні виробки	Вибухонебезпечний пил
Плаваючий вугільний пил	< 75	Вентиляційна мережа шахти	Основна причина пилових вибухів
Респірабельний пил	< 10	Робоча зона гірників	Професійні захворювання
Ультрадисперсний пил	< 1	Повітря шахти	Глибоке проникнення в легені

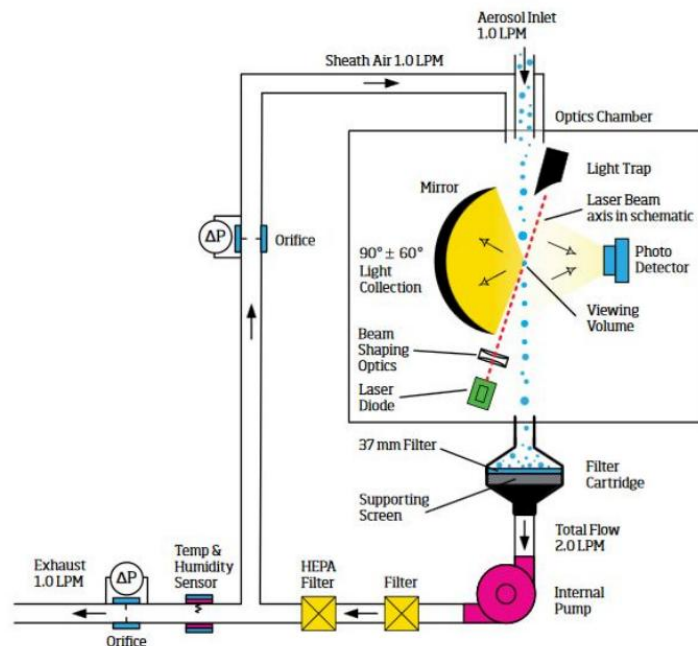
За розміром частинок шахтний пил поділяють на крупнодисперсний, дрібнодисперсний та ультрадисперсний. Крупні частинки, як правило, мають розмір понад 100 мкм і швидко осідають під дією сили тяжіння поблизу місця утворення. Такий пил переважно накопичується на підшві виробок і має обмежене значення з точки зору перенесення вентиляційними потоками. Значно небезпечнішим є дрібнодисперсний пил, частинки якого мають розміри менше 75 мкм. Саме цей пил у дослідженнях визначається

як «плаваючий» вугільний пил, оскільки він здатний тривалий час перебувати у зваженому стані та переноситися повітряними потоками на значні відстані. На рисунку 1.1 представлено оптичний лічильник частинок TSI OPS 3330



Рисунок 1.1 – Прилад для визначення розмірного складу пилових частинок у шахтному повітрі

Механізм роботи прилада представлений на рисунку 1.2



Особливу групу становить респірабельний пил, який характеризується аеродинамічним діаметром частинок, що дозволяє їм проникати у глибокі відділи легенів людини. У підземних шахтах саме респірабельний пил є основною причиною розвитку професійних захворювань органів дихання. Водночас плаваючий вугільний пил, хоча й може мати більший розмір

частинок, є критичним з точки зору вибухонебезпеки, оскільки він легко піднімається у повітря під час ударних хвиль або різких змін режимів вентиляції[12].

Фізико-механічні властивості пилових частинок значною мірою залежать від їх походження. Пил, що утворюється безпосередньо під час різання або дроблення вугілля, зазвичай має неправильну форму, гострі краї та відносно малу щільність.

Таблиця 1.2 – Фізико-механічні властивості пилових частинок та їх вплив

Властивість пилу	Характеристика	Вплив на перенесення
Розмір частинок	< 75 мкм	Збільшується дальність перенесення
Щільність	Низька для вугільного пилу	Довге перебування у зваженому стані
Форма частинок	Неправильна, кутова	Зменшення швидкості осадження
Вологість	Сухий / зволожений	Зволоження прискорює осадження
Агломерація	Схильність до злипання	Укрупнення частинок

Це сприяє його утриманню у зваженому стані та підвищує ймовірність перенесення вентиляційним струменем. Пил породного походження, зокрема вапняковий пил, має більшу щільність і, як правило, швидше осідає, проте за наявності турбулентних потоків також може повторно підніматися у повітря.

Важливим параметром, що впливає на рух пилу, є щільність частинок. У вугільних шахтах щільність вугільного пилу є меншою, ніж щільність більшості мінеральних домішок, що призводить до різної поведінки частинок однакового розміру у вентиляційному потоці. Дослідження

показують, що легші частинки при однаковій швидкості повітря переносяться на більші відстані, ніж важчі, і мають меншу швидкість осадження[8].

Форма пилових частинок також істотно впливає на їх аеродинамічні характеристики. Нерегулярна форма і шорстка поверхня сприяють зростанню опору руху в повітрі, що зменшує швидкість осадження частинок і підвищує роль турбулентної дифузії. У вентиляційних виробках з розвиненою турбулентністю це призводить до більш рівномірного розподілу дрібнодисперсного пилу по перерізу виробки та збільшення ймовірності його осадження на покрівлі та боках.

Таблиця 1.3 – Фактори, що впливають на перенесення та осадження пилу

Фактор	Характер впливу	Наслідок
Швидкість повітря	Зростання швидкості	Перенесення на великі відстані
Турбулентність	Вихрові потоки	Нерівномірне осадження
Геометрія виробки	Повороти, звуження	Локальні відкладення пилу
Стан поверхонь	Нерівності	Підвищене накопичення
Рух обладнання	Вібрації	Вторинне пилоутворення

Вологість пилу є ще одним важливим фактором. Зволожений пил має тенденцію до агломерації, унаслідок чого збільшується ефективний розмір частинок і прискорюється їх осадження. Саме на цьому принципі ґрунтується ефективність водяних способів пилопригнічення. Водночас у сухих виробках дрібнодисперсний пил зберігає високу рухливість і легко переноситься вентиляційними потоками на великі відстані.

Таким чином, класифікація шахтного пилу за розміром частинок і аналіз його фізико-механічних властивостей є необхідною основою для

подальшого вивчення процесів перенесення та осадження пилу у вентиляційних потоках. Саме поєднання малого розміру частинок, низької щільності, нерегулярної форми та сухого стану зумовлює високу мобільність плаваючого вугільного пилу і його небезпеку для безпеки та здоров'я гірників[32].

1.3. Вплив вугільного пилу на умови праці, безпеку та здоров'я гірників

Вугільний пил є одним із найбільш шкідливих і небезпечних факторів виробничого середовища у підземних вугільних шахтах. Його вплив проявляється одночасно у трьох взаємопов'язаних площинах: погіршенні умов праці, зниженні рівня промислової безпеки та негативному впливі на здоров'я гірників. Особливу небезпеку становить дрібнодисперсний пил, який тривалий час утримується у повітрі та переноситься вентиляційними потоками по всій вентиляційній мережі шахти[6].

З точки зору умов праці, підвищена запиленість повітря призводить до погіршення видимості у виробках, що ускладнює виконання гірничих робіт, підвищує втомлюваність працівників і збільшує ризик травматизму. Осідання пилу на освітлювальних приладах, сигнальних елементах і поверхнях обладнання знижує їх ефективність та ускладнює контроль за технологічними процесами. Крім того, пил накопичується на механізмах, спричиняючи їх абразивне зношування та зменшення строку експлуатації гірничого обладнання[18].

Значно серйознішим є вплив вугільного пилу на безпеку ведення гірничих робіт. Дрібнодисперсний плаваючий вугільний пил, який осідає на покрівлі, боках і підшві виробок, за певних умов може повторно підніматися у повітря. У разі виникнення вибуху метану або іскрового займання відбувається миттєве підняття осілого пилу, що призводить до розвитку вибуху вугільного пилу.

Такі вибухи, як показує аналіз аварій у підземних шахтах, є значно потужнішими та руйнівнішими, ніж первинні газові вибухи.

Накопичення вугільного пилу у вентиляційних виробках, особливо у зонах

зі зниженою швидкістю повітря або зі складною геометрією, створює потенційно небезпечні ділянки вентиляційної мережі. Саме тому у сучасних нормативних документах велика увага приділяється не лише зниженню концентрації пилу у повітрі, але й контролю за вмістом інертного пилу у відкладеннях[32]. Однак ефективність таких заходів значною мірою залежить від розуміння закономірностей перенесення і осадження пилу, що підтверджує актуальність даної роботи.

Найбільш тривалий і небезпечний вплив вугільного пилу проявляється у сфері охорони здоров'я гірників. При тривалому вдиханні пилових частинок, особливо респірабельної фракції, відбувається їх накопичення у легенях, що призводить до розвитку професійних захворювань органів дихання[17]. До таких захворювань належать пневмоконіоз, силікоз, хронічний бронхіт та емфізема легень. Ці захворювання мають прогресуючий характер і, як правило, є незворотними. На рисунку 1.1 показан графік поширеності професійних захворювань органів дихання від стажу роботи у вугільних шахтах

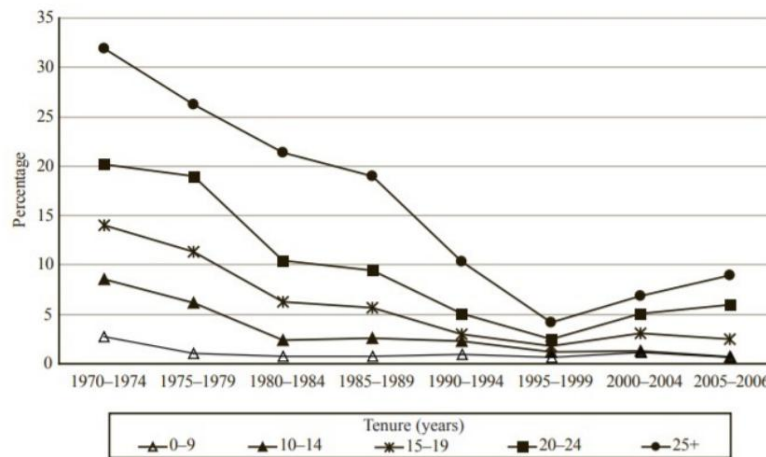


Рисунок 1.1 – Залежність поширеності професійних захворювань органів дихання від стажу роботи у вугільних шахтах

Дослідження, наведені у сучасних наукових роботах, показують, що рівень захворюваності на пневмоконіоз безпосередньо пов'язаний з тривалістю роботи у запиленому середовищі та концентрацією респірабельного пилу у повітрі. Навіть за умов дотримання гранично допустимих концентрацій

тривалий вплив пилу може призводити до патологічних змін у легеневій тканині.[15] Особливо небезпечним є пил з підвищеним вмістом мінеральних домішок, зокрема кварцу, який значно посилює фіброзні процеси у легенях.

Варто також зазначити, що вплив пилу на організм гірників має накопичувальний характер. Захворювання можуть проявлятися через роки після припинення роботи у шахті, що ускладнює ранню діагностику та профілактику. Саме тому у сучасних підходах до охорони праці акцент робиться не лише на медичному контролі, але й на зменшенні пилового навантаження шляхом удосконалення вентиляції та пилопригнічувальних заходів.

Таким чином, вугільний пил є багатофакторною загрозою, яка одночасно погіршує умови праці, підвищує рівень аварійності та негативно впливає на здоров'я гірників. Це зумовлює необхідність комплексного підходу до аналізу пилового режиму у підземних вугільних шахтах та обґрунтовує важливість дослідження процесів перенесення і осадження пилу у вентиляційних потоках[34].

1.4. Вибухонебезпечність вугільного пилу та роль вентиляції у її зниженні

Вугільний пил є одним із ключових чинників вибухонебезпеки у підземних вугільних шахтах. Особливу загрозу становить дрібнодисперсний плаваючий пил, який накопичується на поверхнях гірничих виробок і за певних умов може переходити у зважений стан. На відміну від метану, який є газоподібною речовиною і швидко розсіюється вентиляційним струменем, вугільний пил здатний тривалий час зберігатися у виробках у вигляді відкладень, формуючи прихований резерв вибухонебезпечної речовини.

Механізм розвитку вибуху вугільного пилу, як правило, пов'язаний з первинним займанням або вибухом метану. Ударна хвиля, що виникає при такому вибуху, піднімає осілий пил з підшви, боків і покрівлі виробок. У результаті формується пилоповітряна суміш, яка за наявності джерела займання швидко поширює полум'я по вентиляційних виробках. Саме цей

механізм призводить до того, що пилові вибухи часто мають значно більші масштаби і руйнівну силу порівняно з початковим газовим вибухом. На рисунку 1.4 показані наслідки вибуху вугільного пилу на шахті.

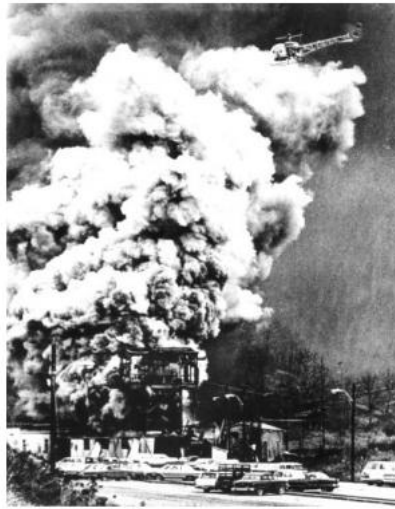


Рисунок 1.4 – Наслідки вибуху вугільного пилу у підземній вугільній шахті (шахта Farmington, США)

Вибухонебезпечні властивості вугільного пилу залежать від низки факторів, серед яких основними є розмір частинок, вміст летких речовин, концентрація пилу у повітрі та наявність інертних домішок. Дрібні частинки мають більшу питому поверхню, що сприяє швидкому окисненню і інтенсивному виділенню тепла під час горіння. Саме тому пил з розміром частинок менше 75 мкм вважається найбільш небезпечним з точки зору вибуху[41]. Наявність інертного пилу, зокрема вапнякового, знижує вибухонебезпечність суміші за рахунок поглинання тепла та розбавлення горючої фази.

Особливу роль у формуванні вибухонебезпечних зон відіграє процес перенесення та осадження пилу у вентиляційній мережі шахти. Дослідження показують, що пил не осідає рівномірно по довжині виробок. Його накопичення відбувається переважно у зонах зі зниженою швидкістю повітря, у розширеннях, за поворотами виробок, поблизу вентиляційних споруд та у відпрацьованих виробках. У таких місцях створюються локальні пилові відкладення, які можуть залишатися непомітними

протягом тривалого часу, але становлять серйозну небезпеку у разі аварійної ситуації.

Вентиляція є основним засобом зниження вибухонебезпеки у підземних вугільних шахтах. Її роль полягає не лише у розбавленні метану до безпечних концентрацій, але й у керуванні процесами перенесення пилу. Правильно організований вентиляційний режим дозволяє зменшити концентрацію пилу у робочій зоні, обмежити його накопичення у небезпечних ділянках та знизити ймовірність повторного підняття осілих відкладень[40].

Разом з тим вентиляційний струмінь може виконувати і негативну роль. За надмірно високих швидкостей повітря відбувається інтенсивне вторинне пилоутворення внаслідок здування осілого пилу з поверхонь виробок. Турбулентні потоки, що виникають у місцях зміни перерізу або напрямку вентиляційних виробок, сприяють нерівномірному розподілу пилу і його накопиченню у локальних зонах. Це свідчить про те, що ефективна вентиляція повинна бути не лише потужною, але й правильно збалансованою з урахуванням геометрії виробок і технологічних процесів. Основні кількісні показники, що характеризують вибухонебезпечність вугільного пилу, наведені у таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Загальні кількісні показники, що характеризують вибухонебезпечність вугільного пилу

Показник	Значення	Пояснення
Граничний розмір частинок плаваючого вугільного пилу	≤ 75 мкм	Частинки такого розміру легко утримуються у зваженому стані та беруть участь у вибухах
Розмір контрольного сита для визначення плаваючого пилу	75 мкм (сито №200)	Загальноприйнятий критерій у гірничій практиці
Мінімальна концентрація	десятки г/м ³	Залежить від дисперсності пилу та умов запалювання

вугільного пилу у повітрі, за якої можливе займання		
Частка інертного пилу у відкладеннях для зниження вибухонебезпечності	не менше 80 %	Нормативний орієнтир для пилобезпечних виробок
Основний механізм розвитку пилового вибуху	Вторинне підняття осілого пилу	Відбувається під дією ударної хвилі або турбулентних потоків
Час перебування дрібнодисперсного пилу у повітрі	Тривалий	Визначається розміром частинок та швидкістю вентиляційного струменя
Основний чинник, що впливає на інтенсивність вибуху	Розмір частинок і концентрація пилу	Дрібніший пил і більша концентрація підвищують вибухонебезпечність
Роль вентиляції у зниженні вибухонебезпечності	Керування концентрацією пилу і метану	Раціональна вентиляція зменшує ризик утворення вибухонебезпечних сумішей

Зменшення вибухонебезпеки вугільного пилу у сучасних шахтах досягається комплексом заходів, серед яких вентиляція поєднується з регулярним нанесенням інертного пилу, зволоженням виробок та застосуванням пилопригнічувальних пристроїв. Однак ефективність цих заходів значною мірою залежить від розуміння закономірностей перенесення і осадження пилу у вентиляційних потоках. Саме тому дослідження цих процесів є необхідною основою для підвищення рівня вибухобезпеки та обґрунтування практичних рекомендацій для підземних вугільних шахт.

Таким чином, вугільний пил є одним із головних чинників вибухонебезпеки у підземних шахтах, а вентиляція відіграє ключову роль у контролі як газового, так і пилового режимів. Рациональна організація вентиляційних потоків з урахуванням процесів перенесення та осадження пилу є одним з найважливіших напрямів підвищення безпеки гірничих робіт[48].

РОЗДІЛ 2 ПЕРЕНЕСЕННЯ ТА ОСАДЖЕННЯ ПИЛУ У ВЕНТИЛЯЦІЙНИХ ПОТОКАХ ШАХТ

2.1. Фізичні закономірності руху пилових частинок у повітряних потоках

Рух пилових частинок у вентиляційних потоках підземних вугільних шахт є складним фізичним процесом, який визначається взаємодією аеродинамічних сил, сили тяжіння та характеристик самого повітряного потоку. На відміну від газоподібних домішок, пилові частинки мають масу, форму і інерцію, що зумовлює їх відхилення від ліній руху повітря та призводить до осадження на поверхнях гірничих виробок.

Основною силою, що діє на пилову частинку у вентиляційному потоці, є аеродинамічний опір. Ця сила залежить від швидкості відносного руху частинки і повітря, розміру та форми частинки, а також властивостей повітряного середовища. Для дрібнодисперсного вугільного пилу, характерного для підземних шахт, аеродинамічний опір відіграє визначальну роль і значною мірою компенсує дію сили тяжіння, що дозволяє частинкам тривалий час перебувати у зваженому стані[4].

Сила тяжіння спрямована вертикально вниз і зумовлює осадження пилових частинок. Швидкість осадження залежить від маси частинки, її аеродинамічного діаметра та умов руху повітря. Чим більший розмір і щільність частинки, тим швидше вона осідає. Для дрібних частинок з розміром менше 75 мкм швидкість осадження є відносно малою, тому за наявності достатньої швидкості вентиляційного струменя такі частинки можуть переноситися на значні відстані по вентиляційній мережі шахти[7].

Важливим чинником, що визначає характер руху пилу, є режим повітряного потоку. У вентиляційних виробках переважає турбулентний режим руху повітря, особливо за наявності нерівностей поверхонь, кріплення, обладнання та змін геометрії виробок. Турбулентність призводить до виникнення вихрових структур, які інтенсивно перемішують повітря і пилові частинки. У результаті пил розподіляється нерівномірно по перерізу виробки, а його рух набуває хаотичного характеру.

Турбулентні пульсації швидкості повітря значно впливають на траєкторії руху частинок. Навіть за середньої швидкості потоку, яка недостатня для утримання частинки у зваженому стані, миттєві пульсації можуть підхоплювати пил і переносити його далі по виробці. Саме цим пояснюється здатність дрібнодисперсного вугільного пилу проникати у віддалені ділянки вентиляційної мережі, де відсутні безпосередні джерела його утворення[12].

На рух пилових частинок суттєво впливає геометрія гірничих виробок. Зміна перерізу, наявність поворотів, розширень і звужень призводить до локальних змін швидкості і напрямку повітряного потоку. У зонах зниження швидкості вентиляційного струменя переважає дія сили тяжіння, що сприяє осадженню пилу. У місцях різкої зміни напрямку потоку або за перешкодами утворюються зони рециркуляції, де пил може накопичуватися у значних кількостях.

Окрему роль відіграє інерційність пилових частинок. Частинки з більшою масою не встигають повторювати траєкторію руху повітря при його різких поворотах і змінах швидкості. Унаслідок цього вони відхиляються від основного потоку і осідають на боках і покрівлі виробок[23]. Для дрібних частинок інерційні ефекти менш виражені, проте у турбулентних потоках вони також можуть призводити до осадження у зонах зниженого тиску або поблизу поверхонь. На рисунку 2.1 показано графічно схема сил, що діють на пилову частинку у вентиляційному повітряному потоці

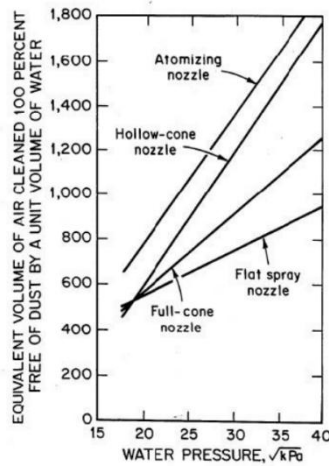


Рисунок 2.1 – Схема сил, що діють на пилову частинку у вентиляційному повітряному потоці

Таким чином, перенесення пилу у вентиляційних потоках визначається сукупною дією аеродинамічного опору, сили тяжіння, турбулентності повітряного потоку та геометрії гірничих виробок. Розуміння цих фізичних закономірностей є необхідною основою для аналізу процесів осадження пилу та розробки ефективних заходів з керування пиловим режимом у підземних вугільних шахтах.

2.2. Вплив швидкості вентиляційного струменя та турбулентності на перенесення пилу

Швидкість вентиляційного струменя є одним з основних параметрів, що визначають інтенсивність перенесення вугільного пилу у підземних виробках. Саме від швидкості руху повітря залежить здатність вентиляційного потоку утримувати пилові частинки у зваженому стані або, навпаки, сприяти їх осадженню на поверхнях виробок. Для дрібнодисперсного вугільного пилу характерною є висока чутливість до змін швидкості повітря, що зумовлює нерівномірний розподіл пилу у вентиляційній мережі шахти.

За відносно низьких швидкостей вентиляційного струменя переважає дія сили тяжіння, унаслідок чого пилові частинки поступово осідають на підшві, боках і покрівлі гірничих виробок. У таких умовах формується шар осілого пилу, який з часом може накопичуватися у значних кількостях. Особливо інтенсивне осадження відбувається у зонах зі зменшеним

перерізом виробок, у відпрацьованих просторах та поблизу вентиляційних споруд, де швидкість повітря є мінімальною.

Зі збільшенням швидкості вентиляційного струменя зростає аеродинамічний опір, який діє на пилові частинки. За достатньо високих швидкостей цей опір компенсує дію сили тяжіння, що дозволяє дрібнодисперсному пилу тривалий час перебувати у зваженому стані та переноситися на значні відстані. Саме за таких умов пил, утворений у зоні очисних робіт, може потрапляти у головні вентиляційні виробки і поширюватися по всій вентиляційній мережі шахти[34].

Разом з тим надмірне збільшення швидкості повітря має і негативні наслідки. За високих швидкостей вентиляційного струменя зростає інтенсивність вторинного пилоутворення, пов'язаного зі здуванням раніше осілого пилу з поверхонь виробок[26]. У таких умовах навіть відкладення, які тривалий час залишалися стабільними, можуть знову переходити у зважений стан. Це призводить до підвищення концентрації пилу у повітрі та збільшення вибухонебезпеки.

Важливу роль у перенесенні пилу відіграє турбулентність вентиляційного потоку. У підземних виробках повітряний потік, як правило, має турбулентний характер через нерівності поверхонь, наявність кріплення, обладнання та змін геометрії виробок. Турбулентні пульсації швидкості повітря призводять до хаотичного руху пилових частинок і сприяють їх перемішуванню по всьому перерізу виробки.

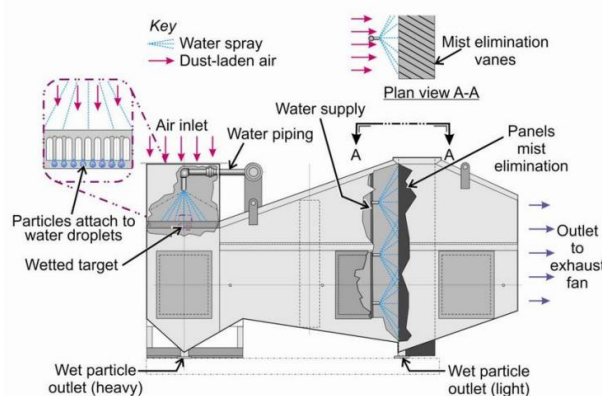


Рисунок 2.2 – Вплив швидкості вентиляційного струменя та турбулентності на рух пилових частинок

Турбулентність значно зменшує ефективність простого гравітаційного осадження пилу. Навіть за середніх значень швидкості повітря локальні пульсації можуть підхоплювати пилові частинки і переносити їх далі по виробці. У той же час турбулентні вихори сприяють контакту частинок з поверхнями виробок, що може призводити до їх осадження у зонах рециркуляції та за перешкодами. На рисунку 2.1 наочно показано вплив швидкості вентиляційного струменя та турбулентності на рух пилових частинок.

Особливо інтенсивна турбулентність спостерігається у місцях різкої зміни напрямку або швидкості вентиляційного потоку, зокрема у поворотах виробок, на стиках вентиляційних струменів та поблизу вентиляційних дверей і перемичок. Інформація про вплив швидкості вентиляційного струменя на характер руху вугільного пилу зібрана у таблиці 2.1. У таких зонах формуються локальні області підвищеного пилонакопичення, що підтверджується результатами експериментальних і чисельних досліджень. Таблиця 2.2 – Вплив швидкості вентиляційного струменя на характер руху вугільного пилу

Швидкість вентиляційного струменя	Характер руху пилових частинок	Наслідки для пилового режиму
Низька	Переважає дія сили тяжіння, пилові частинки осідають	Інтенсивне накопичення пилу на підшві та поверхнях виробок
Середня	Частинки утримуються у зваженому стані та переносяться потоком	Перенесення пилу на значні відстані по вентиляційній мережі
Висока	Зростає аеродинамічний опір і турбулентність	Вторинне пилоутворення та повторне підняття осілого пилу

Таким чином, швидкість вентиляційного струменя і рівень турбулентності мають подвійний вплив на пиловий режим у підземних вугільних шахтах. З одного боку, вони забезпечують перенесення пилу і зменшення його концентрації у робочих зонах, з іншого боку, можуть сприяти вторинному пилоутворенню і накопиченню пилу у небезпечних ділянках вентиляційної мережі. Це зумовлює необхідність оптимізації вентиляційних режимів з урахуванням процесів перенесення та осадження пилу.

2.3. Механізми осадження пилу на поверхнях гірничих виробок

Осадження вугільного пилу на поверхнях гірничих виробок є закономірним наслідком його перенесення вентиляційними потоками та визначається сукупною дією гравітаційних, аеродинамічних і турбулентних процесів[48]. На відміну від газоподібних домішок, пилові частинки мають масу та інерційні властивості, що зумовлює їх неминуче відокремлення від повітряного потоку за певних умов руху повітря. Інформація про основні механізми осадження вугільного пилу та умови їх прояву зведена в таблицю 2.3.

Таблиця 2.3 – Основні механізми осадження вугільного пилу та умови їх прояву

Механізм осадження	Фізична сутність процесу	Типові умови прояву у виробках
Гравітаційне осадження	Осідання частинок під дією сили тяжіння	Низька швидкість повітря, горизонтальні та похилі виробки
Інерційне зіткнення	Відхилення частинок від траєкторії повітряного потоку	Повороти виробок, різка зміна напрямку вентиляційного струменя

Осадження у зонах рециркуляції	Зменшення швидкості та хаотичний рух повітря	За вентиляційними спорудами, обладнанням, у розширеннях виробок
Турбулентна дифузія	Переміщення частинок до поверхонь внаслідок пульсацій швидкості	Високий рівень турбулентності, нерівні поверхні виробок
Адгезійне осадження	Прилипання частинок до поверхонь	Шорсткі та вологі поверхні, наявність кріплення

Найпростішим і водночас найпоширенішим механізмом осадження є гравітаційне осідання пилових частинок. Під дією сили тяжіння частинки поступово переміщуються у напрямку підлоги виробки, де і формуються основні пилові відкладення. Інтенсивність гравітаційного осадження залежить від розміру та щільності частинок, а також від швидкості вентиляційного струменя. За низьких швидкостей повітря гравітаційні сили переважають, що призводить до швидкого накопичення пилу, особливо у відпрацьованих та допоміжних виробках[44].

Важливу роль у процесах осадження відіграє інерційне зіткнення пилових частинок з поверхнями виробок. У місцях різкої зміни напрямку вентиляційного струменя, таких як повороти виробок, перетини та звуження, повітряний потік змінює траєкторію, тоді як пилові частинки через інерцію продовжують рухатися по попередньому напрямку. У результаті вони стикаються з боками або покрівлею виробки та осідають на їх поверхні. Саме цей механізм пояснює інтенсивне пилонакопичення у поворотах вентиляційних виробок[42].

Осадження пилу також активно відбувається у зонах рециркуляції повітря. Такі зони утворюються за вентиляційними спорудами, обладнанням, кріпленням, а також у розширеннях виробок. У зонах

рециркуляції швидкість повітря значно зменшується, а напрямок руху потоку стає нестійким. За цих умов пилові частинки втрачають підтримку аеродинамічного опору і швидко осідають на прилеглих поверхнях, формуючи локальні пилові відкладення. На рисунку 2.3 зображено механізми осадження пилових частинок на поверхнях гірничих виробок

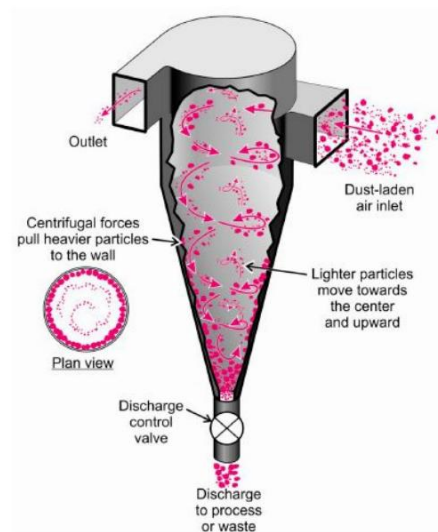


Рисунок 2.3 – Основні механізми осадження пилових частинок на поверхнях гірничих виробок

Турбулентна дифузія є ще одним важливим механізмом осадження пилу. Турбулентні пульсації швидкості повітря призводять до хаотичного руху частинок, що збільшує ймовірність їх контакту з поверхнями виробок. Хоча турбулентність сприяє утриманню пилу у зваженому стані, вона водночас забезпечує його переміщення у приповерхневі шари повітряного потоку, де частинки можуть осідати внаслідок зниження швидкості та впливу сил адгезії[35].

Суттєвий вплив на процеси осадження має стан поверхонь гірничих виробок. Нерівності, тріщини, елементи кріплення та шорсткість поверхонь сприяють затриманню пилових частинок і перешкоджають їх повторному підняттю у повітряний потік. На гладких поверхнях пил осідає менш інтенсивно, проте за високих швидкостей вентиляційного струменя він може легко здуватися і знову переходити у зважений стан.

Осаджений пил не є стабільним утворенням. Під впливом змін режиму вентиляції, вібрацій від роботи обладнання або руху транспортних засобів

можливе повторне підняття пилу з поверхонь виробок. Цей процес, відомий як вторинне пилоутворення, має важливе значення з точки зору вибухобезпеки, оскільки саме осілий пил часто слугує резервом горючої речовини у шахті.

Таким чином, осадження пилу у підземних вугільних шахтах є результатом дії кількох взаємопов'язаних механізмів, серед яких гравітаційне осідання, інерційні зіткнення, турбулентна дифузія та вплив геометрії виробок відіграють провідну роль. Аналіз цих механізмів є необхідною умовою для прогнозування зон пилонакопичення та розробки ефективних заходів зменшення пилового навантаження у вентиляційній мережі шахти[31].

2.4. Аналіз наукових підходів до моделювання перенесення та осадження пилу

Моделювання процесів перенесення та осадження пилу у вентиляційних потоках є одним з основних інструментів сучасних досліджень у галузі вентиляції підземних вугільних шахт. Це зумовлено складністю реальних пилоповітряних потоків, значною протяжністю вентиляційних мереж і неможливістю повного експериментального дослідження усіх зон шахти в реальних умовах. Саме тому математичні та чисельні методи широко застосовуються для аналізу міграції пилу, визначення зон його накопичення та оцінки ефективності вентиляційних і пилопригнічувальних заходів[25].

У наукових дослідженнях перенесення пилу традиційно використовуються підходи, засновані на рівняннях руху частинок у повітряному потоці. Такі підходи враховують дію основних сил на пилову частинку, зокрема аеродинамічного опору, сили тяжіння та інерційних ефектів. Залежно від поставленої задачі пил може розглядатися як дисперсна фаза, що рухається у неперервному повітряному середовищі. У цьому випадку повітряний потік описується рівняннями газової динаміки, а рух частинок визначається їх взаємодією з потоком.

Одним з найбільш поширених підходів є лагранжевий опис руху пилових частинок. У межах цього підходу траєкторія кожної окремої частинки розраховується у часі з урахуванням локальних параметрів повітряного потоку. Такий метод дозволяє детально досліджувати поведінку частинок різного розміру та щільності, оцінювати їх осадження на поверхнях виробок і повторне підняття у потік. Лагранжевий підхід широко використовується у чисельних моделях вентиляційних потоків, зокрема у поєднанні з методами обчислювальної гідродинаміки[33].

Іншим підходом є ейлерівський опис пилової фази, за якого пил розглядається як суцільне середовище з певною концентрацією. У цьому випадку рівняння перенесення пилу формулюються у вигляді рівнянь балансу маси для дисперсної фази з урахуванням конвекції, дифузії та осадження. Ейлерівський підхід є менш детальним порівняно з лагранжевим, проте дозволяє ефективно аналізувати розподіл концентрації пилу у великих вентиляційних мережах і використовується для попередніх оцінок пилового режиму.

У сучасних дослідженнях все ширше застосовуються методи обчислювальної гідродинаміки, які дозволяють моделювати тривимірні потоки повітря з урахуванням турбулентності та складної геометрії гірничих виробок. Поєднання CFD-моделей з лагранжевим описом руху частинок дає змогу відтворити процеси перенесення та осадження пилу з високою просторовою роздільною здатністю. Такі моделі дозволяють визначати локальні зони пилонакопичення, оцінювати вплив швидкості вентиляційного струменя і турбулентності, а також аналізувати ефективність різних вентиляційних рішень.

Окрему групу становлять мережеві моделі вентиляції, у яких вентиляційна система шахти подається у вигляді сукупності пов'язаних між собою виробок. У таких моделях параметри повітряного потоку розраховуються для кожної гілки вентиляційної мережі, після чого визначається перенесення пилу між окремими ділянками. Мережеві моделі є менш детальними з точки зору локальних процесів осадження, проте вони

ефективні для аналізу загального розподілу пилу у вентиляційній системі шахти. Загальна схема підходів до моделювання перенесення пилу у вентиляційній мережі шахти представлена на рисунку 2.4.

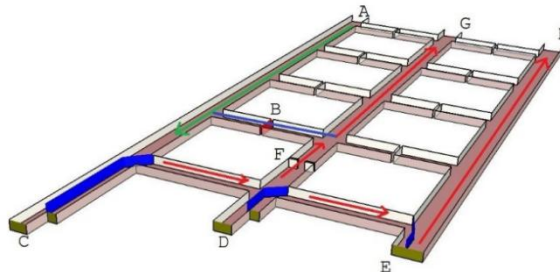


Рисунок 2.4 – Загальна схема підходів до моделювання перенесення пилу у вентиляційній мережі шахти

Важливим аспектом моделювання є валідація результатів, тобто їх порівняння з експериментальними або виробничими даними. Без такої перевірки результати моделювання можуть мати обмежену практичну цінність. Саме тому у сучасних роботах моделювання перенесення пилу поєднується з натурними вимірюваннями концентрації та дисперсного складу пилу у вентиляційних виробках[37].

Таким чином, аналіз наукових підходів до моделювання перенесення та осадження пилу показує, що найбільш перспективними є комбіновані методи, які поєднують мережеві розрахунки вентиляції з чисельним моделюванням повітряних потоків і лагранжевим описом руху пилових частинок. Використання таких підходів створює наукову основу для подальших досліджень пилового режиму та розробки практичних рекомендацій щодо зниження запиленості і вибухонебезпечності у підземних вугільних шахтах.

РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПИЛОВОГО РЕЖИМУ У ВЕНТИЛЯЦІЙНІЙ МЕРЕЖІ ПІДЗЕМНОЇ ШАХТИ

3.1. Характеристика вентиляційної мережі та умов провітрювання

Вентиляційна мережа підземної вугільної шахти є складною розгалуженою системою гірничих виробок, призначеною для подавання свіжого повітря до очисних і підготовчих вибоїв, а також для відведення забрудненого повітря, що містить пил, гази та продукти згоряння. Характеристика вентиляційної мережі та умов провітрювання має вирішальне значення для формування пилового режиму, оскільки саме параметри повітряних потоків визначають напрямок, інтенсивність перенесення та зони осадження вугільного пилу.

У підземних вугільних шахтах найпоширенішою є схема провітрювання з подачею повітря через головні вентиляційні виробки та розподілом його по окремих гілках вентиляційної мережі до очисних вибоїв. Повітряні потоки розгалужуються, об'єднуються та перерозподіляються залежно від конфігурації виробок, наявності вентиляційних споруд і технологічних особливостей ведення гірничих робіт. У результаті в різних ділянках шахти формуються потоки з різною швидкістю, турбулентністю та напрямком руху[9].

Особливістю вентиляційних мереж камерно-стовпових шахт є наявність кількох паралельних повітряних гілок, що одночасно провітрюють кілька очисних вибоїв. У таких умовах значну роль відіграють нейтральні виробки, через які може здійснюватися перерозподіл повітря між окремими ділянками мережі. Навіть незначні витоки повітря через технологічні прорізи, перемички або рухоме обладнання здатні суттєво впливати на баланс повітряних потоків і, відповідно, на розподіл пилу.

У реальних умовах провітрювання істотний вплив на вентиляційний режим мають рухомі транспортні засоби, зокрема самохідні вагонетки та навантажувальні машини. Їх постійне переміщення призводить до тимчасових змін аеродинамічного опору окремих ділянок виробок і створює додаткові шляхи витоку повітря[12]. Такі витоки, хоча й мають

порівняно невелику величину, можуть змінювати напрямок потоків у нейтральних гілках і впливати на перенесення пилу з одних зон шахти в інші.

Для дослідження пилового режиму у вентиляційній мережі доцільно використовувати як натурні вимірювання, так і фізичне або чисельне моделювання. У наукових дослідженнях широко застосовуються зменшені масштабні моделі вентиляційних мереж, які геометрично відтворюють конфігурацію реальної шахти[8]. Такі моделі дозволяють аналізувати розподіл повітряних потоків, виявляти зони можливого пилонакопичення та оцінювати вплив зміни вентиляційних режимів на перенесення пилу.

В умовах моделювання вентиляційні витрати повітря задаються відповідно до характерних режимів роботи шахти. Повітря подається через вхідні ділянки мережі до очисних вибоїв, після чого відводиться через вихідні гілки. Частина повітря може спрямовуватися у нейтральні виробки, що імітує реальні умови перерозподілу потоків у шахті. Для забезпечення динамічної подібності між моделлю та реальними умовами застосовуються критерії подібності, зокрема критерій Фруда, який дозволяє коректно масштабувати швидкості та витрати повітря[18].

Таким чином, вентиляційна мережа підземної вугільної шахти є визначальним фактором формування пилового режиму. Складна конфігурація виробок, наявність нейтральних гілок, витоків повітря та змінних вентиляційних режимів створюють умови для нерівномірного розподілу пилу і його накопичення у потенційно небезпечних зонах. Саме тому детальна характеристика вентиляційної мережі та умов провітрювання є необхідною передумовою для подальшого аналізу розподілу пилу та оцінки ефективності заходів з його зниження.

3.2. Методи визначення концентрації та дисперсного складу пилу

Аналіз пилового режиму у вентиляційних мережах підземних вугільних шахт ґрунтується на використанні теоретично обґрунтованих та експериментально апробованих методів визначення концентрації і дисперсного складу вугільного пилу[27].

Зазначені методи широко застосовуються у наукових дослідженнях та виробничій практиці і використовуються як базові під час оцінювання запиленості повітря, умов праці гірників і вибухонебезпечності вентиляційних виробок.

Концентрація пилу у повітрі вентиляційних виробок розглядається як один з основних кількісних показників пилового режиму. У теоретичних дослідженнях концентрація пилу визначається як відношення маси пилових частинок, що містяться у певному об'ємі повітря, до цього об'єму. Такий підхід дозволяє уніфікувати результати вимірювань та забезпечити можливість порівняння даних, отриманих у різних умовах та на різних шахтах.

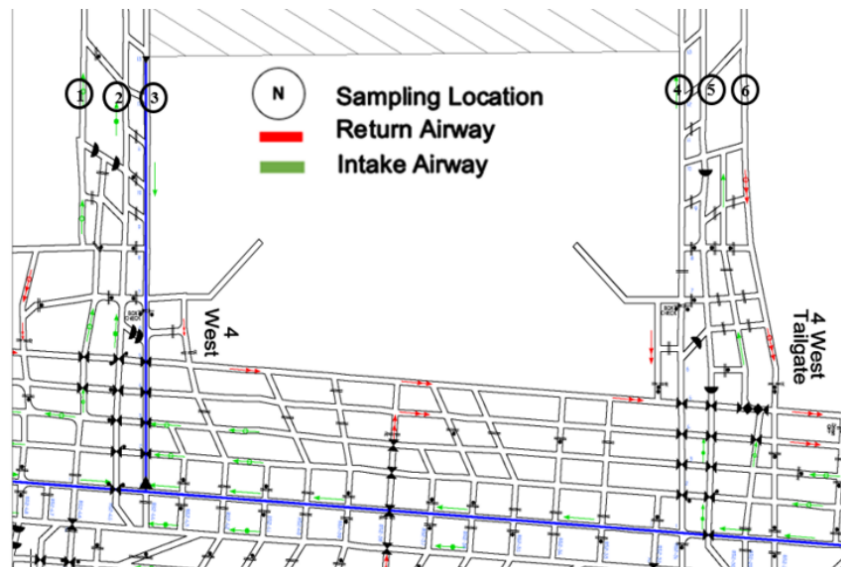
У науковій літературі методи визначення концентрації пилу класифікуються залежно від принципу дії та способу відбору проб повітря. Найбільш поширеними є гравіметричні методи, які базуються на осадженні пилових частинок на фільтрувальних елементах з подальшим визначенням їх маси. Ці методи вважаються еталонними з точки зору точності та широко використовуються для калібрування інших способів контролю запиленості повітря.

Поряд з концентрацією важливе значення має дисперсний склад вугільного пилу, який характеризує розподіл частинок за розмірами. Саме дисперсний склад визначає здатність пилу до перенесення вентиляційними потоками, його осадження на поверхнях виробок, а також небезпеку впливу на органи дихання та схильність до вибуху. У теоретичних дослідженнях особлива увага приділяється дрібнодисперсній фракції пилу, частинки якої мають розміри, що дозволяють їм тривалий час перебувати у зваженому стані.

Аналіз дисперсного складу пилу у наукових роботах здійснюється на основі результатів ситового аналізу або інструментальних методів, які дозволяють визначати частку пилу з розмірами частинок менше встановленого граничного значення. У теоретичних моделях такі дані використовуються для обґрунтування закономірностей перенесення та

осадження пилу у вентиляційних потоках, а також для оцінки зон підвищеної вибухонебезпечності.

У теоретичних роботах важливим елементом аналізу є розгляд просторового розподілу пилу у вентиляційній мережі шахти. Для цього використовується уявлення про характерні точки та ділянки вентиляційних виробок, у яких концентрація та склад пилу можуть істотно відрізнятися залежно від напрямку повітряного потоку, геометрії виробок та їх функціонального призначення. Схематичне розташування таких характерних зон у вентиляційній мережі доцільно подавати у вигляді узагальнених схем, приклад яких наведено на рисунку 3.2.



Систематизація характерних зон вентиляційної мережі та їх функціонального призначення дозволяє узагальнити підходи до аналізу пилового режиму і представити їх у табличній формі. Такі узагальнені дані, приклад яких наведено у таблиці 3.2, використовуються у теоретичних дослідженнях для подальшого моделювання процесів перенесення та осадження пилу.

Таблиця 3.2 – Характеристика точок відбору проб пилу у вентиляційній мережі

Номер точки	Тип вентиляційної виробки	Функціональне призначення ділянки	Напрямок руху повітря
1	Приточна (intake airway)	Подача свіжого повітря у виробки	До очисних вибоїв
2	Приточна (intake airway)	Транзитний повітряний потік	До очисних вибоїв
3	Приточна (intake airway)	Зона поблизу перетину виробок	До очисних вибоїв
4	Відпрацьована (return airway)	Відведення забрудненого повітря	Від очисних вибоїв
5	Відпрацьована (return airway)	Транзит відпрацьованого повітря	Від очисних вибоїв
6	Відпрацьована (return airway)	Зона можливого пилонакопичення	Від очисних вибоїв
7	Приточна (intake airway)	Подача повітря у допоміжні виробки	До вибою
8	Відпрацьована (return airway)	Відведення повітря з транспортної виробки	Від вибою
9	Відпрацьована (return airway)	Зона перетину вентиляційних потоків	Від вибою
10	Відпрацьована (return airway)	Транзит відпрацьованого повітря	Від вибою
11	Відпрацьована (return airway)	Кінцева ділянка відпрацьованого струменя	До вентиляційного виходу

Таким чином, методи визначення концентрації та дисперсного складу вугільного пилу, описані у науковій літературі, становлять теоретичну основу для аналізу пилового режиму у вентиляційних мережах підземних вугільних шахт. Їх використання у теоретичній частині роботи дозволяє

обґрунтувати вибір параметрів моделювання та сформуванати наукову базу для подальшого аналізу процесів перенесення і осадження пилу.

3.3. Теоретичний аналіз розподілу пилу у вентиляційній мережі підземної шахти

Розподіл вугільного пилу у вентиляційній мережі підземної шахти формується під впливом сукупності аеродинамічних, гравітаційних і геометричних чинників. На відміну від газових домішок, пил не розподіляється рівномірно по всій мережі, а характеризується наявністю локальних зон підвищеної концентрації та ділянок інтенсивного осадження. Теоретичний аналіз цих процесів дозволяє встановити загальні закономірності міграції пилу та обґрунтувати причини його накопичення у певних виробках.

Одним з визначальних факторів просторового розподілу пилу є напрямок і швидкість вентиляційного струменя. У приточних виробках, де подається свіже повітря, концентрація пилу, як правило, є нижчою, оскільки пил надходить переважно з інших ділянок вентиляційної мережі. У відпрацьованих виробках відбувається накопичення пилу, що переноситься з очисних і підготовчих вибоїв, а також вторинне підняття осілого пилу під дією турбулентних потоків[39].

Теоретичні уявлення про перенесення пилу базуються на тому, що пилові частинки рухаються разом з повітряним потоком, проте їх траєкторії зазнають відхилень унаслідок дії сили тяжіння та інерційних ефектів. У прямолінійних виробках зі сталим перерізом розподіл пилу є відносно рівномірним, тоді як у зонах поворотів, звужень або розширень виробок виникають локальні області підвищеної концентрації пилу.

Суттєвий вплив на розподіл пилу має наявність нейтральних виробок і перетинів вентиляційних струменів. У таких зонах змінюється структура повітряного потоку, утворюються області знижених швидкостей та рециркуляції, що сприяє осадженню пилу. Теоретичні моделі показують, що навіть незначний перерозподіл повітря між гілками вентиляційної

мережі може призводити до істотних змін концентрації пилу у віддалених виробках.

Важливим аспектом аналізу є вплив турбулентності вентиляційного потоку. Турбулентні пульсації швидкості сприяють утриманню дрібнодисперсного пилу у зваженому стані, але водночас збільшують імовірність його контакту з поверхнями виробок. У результаті пил може інтенсивно накопичуватися у приповерхневих шарах повітряного потоку, особливо на шорстких поверхнях та елементах кріплення[40].

Теоретичний аналіз також враховує вторинне пилоутворення, яке відіграє ключову роль у формуванні пилового режиму. Осілий пил у процесі зміни вентиляційних режимів або під впливом механічних збурень може знову переходити у зважений стан і переноситися по вентиляційній мережі. Це призводить до того, що концентрація пилу у повітрі визначається не лише інтенсивністю його утворення у вибоях, а й запасами пилу, накопиченими на поверхнях виробок.

Для узагальнення закономірностей розподілу пилу у вентиляційній мережі у теоретичних дослідженнях використовуються схематичні зображення та узагальнені таблиці, які відображають характерні зони підвищеної та зниженої запиленості. Такі схеми дозволяють наочно показати взаємозв'язок між конфігурацією вентиляційної мережі, режимами провітрювання та процесами перенесення і осадження пилу.

Таким чином, теоретичний аналіз розподілу вугільного пилу у вентиляційній мережі підземної шахти свідчить про нерівномірний характер його міграції та накопичення. Найбільш небезпечними з точки зору запиленості є відпрацьовані виробки, нейтральні гілки та зони зі складною аеродинамікою повітряного потоку. Отримані теоретичні положення є основою для подальшого розгляду методів прогнозування пилового режиму та розробки заходів зменшення запиленості у вентиляційних потоках.

РОЗДІЛ 4 МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕНЕСЕННЯ ТА ОСАДЖЕННЯ ПИЛУ У ВЕНТИЛЯЦІЙНИХ ПОТОКАХ ПІДЗЕМНИХ ВУГІЛЬНИХ ШАХТ

4.1. Загальні підходи до моделювання перенесення та осадження пилу

Моделювання процесів перенесення та осадження вугільного пилу у вентиляційних потоках є важливим інструментом теоретичного аналізу пилового режиму підземних вугільних шахт. Застосування моделей дозволяє досліджувати складні аеродинамічні процеси, які неможливо повністю описати аналітичними методами або відтворити в натурних умовах. У теоретичних роботах моделювання використовується для узагальнення відомих закономірностей, аналізу впливу окремих факторів та прогнозування поведінки пилу у вентиляційній мережі. Для наочного подання об'єкта моделювання доцільно використовувати узагальнену схему розрахункової області (рисунок 4.1)

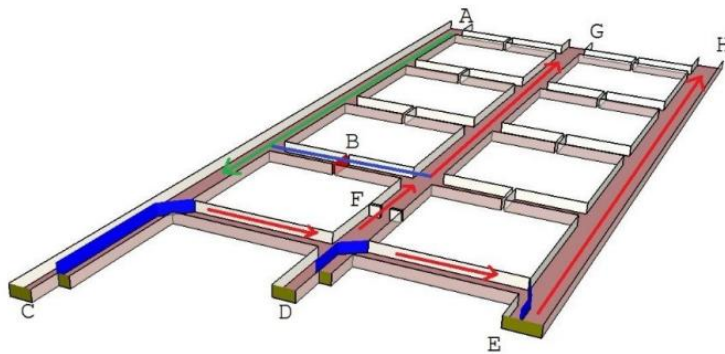


Рисунок 4.1 – Узагальнена схема розрахункової області для моделювання вентиляційного повітряного потоку та перенесення пилу

Узагальнена схема розрахункової області, наведена на рисунку 4.1, містить літерні позначення, які використовуються для спрощеного опису основних елементів вентиляційної мережі. Літера А позначає вхідну ділянку вентиляційного потоку, через яку до моделі подається свіже повітря. Дана ділянка відповідає приточній виробці і слугує граничною умовою для задання об'ємної витрати або швидкості повітря. Літера В відповідає нейтральній виробці вентиляційної мережі, через яку

здійснюється перерозподіл повітряних потоків між окремими гілками. У теоретичному аналізі така виробка розглядається як елемент, що не має безпосереднього джерела або споживача повітря, проте істотно впливає на баланс вентиляційних струменів. Літерами С, D та E позначені виробки, що відповідають очисним або підготовчим вибоям, які потребують безпосереднього провітрювання. Через ці ділянки проходять основні повітряні потоки, що забезпечують розбавлення та відведення пилу і газових домішок. У моделі ці гілки є ключовими з точки зору аналізу перенесення та осадження пилу. Літера F позначає ділянку можливого витоку повітря, яка враховується у моделі як додатковий шлях перетікання повітря між гілками вентиляційної мережі. Такі витоки можуть виникати внаслідок технологічних особливостей ведення гірничих робіт або наявності рухомого обладнання і мають суттєвий вплив на реальний розподіл вентиляційних потоків. Використання літерних позначень дозволяє узагальнено описати структуру вентиляційної мережі та спростити аналіз повітряного і пилового режимів без прив'язки до конкретної шахти або геометричних розмірів виробок.

Загальний підхід до моделювання перенесення пилу базується на розгляді вентиляційного повітря як неперервного середовища, у якому рухаються тверді частинки вугільного пилу. Повітряний потік описується рівняннями руху газу з урахуванням турбулентності, тоді як пил розглядається як дисперсна фаза, поведінка якої визначається взаємодією з повітряним потоком. Такий підхід дозволяє розділити задачу на дві взаємопов'язані частини — моделювання аеродинаміки повітря та моделювання руху пилових частинок.

У теоретичних дослідженнях використовуються два основні підходи до опису руху пилу — ейлерівський та лагранжевий. За ейлерівського підходу пил розглядається як суцільне середовище з певною концентрацією, що переноситься разом з повітряним потоком. Цей підхід є зручним для аналізу розподілу пилу у великих вентиляційних мережах і дозволяє оцінювати середні концентрації пилу у різних ділянках шахти.

Лагранжевий підхід ґрунтується на відстеженні руху окремих пилових частинок у повітряному потоці. У межах цього підходу траєкторії частинок визначаються з урахуванням дії аеродинамічного опору, сили тяжіння та інерційних ефектів. Лагранжевий підхід дозволяє детально аналізувати механізми осадження пилу на поверхнях виробок і широко використовується у поєднанні з чисельними методами обчислювальної гідродинаміки.

Особливе місце у моделюванні перенесення пилу займає врахування турбулентності вентиляційного потоку. Турбулентні пульсації швидкості істотно впливають на рух пилових частинок, сприяючи їх перемішуванню, повторному підняттю осілого пилу та формуванню зон підвищеної концентрації. У теоретичних моделях турбулентність враховується за допомогою узагальнених моделей, які дозволяють описати середні характеристики потоку без детального відтворення всіх вихрових структур.

Моделювання осадження пилу передбачає аналіз взаємодії пилових частинок з поверхнями гірничих виробок. У теоретичних підходах осадження розглядається як результат зменшення швидкості повітряного потоку у приповерхневих шарах, інерційного зіткнення частинок з поверхнями та дії сили тяжіння. У деяких моделях також враховуються властивості поверхонь виробок, зокрема їх шорсткість та здатність утримувати пилові частинки.

Загальні підходи до моделювання перенесення та осадження пилу у вентиляційних потоках базуються на поєднанні аеродинамічного опису повітряного потоку та моделей руху дисперсних частинок. Використання таких підходів у теоретичних дослідженнях дозволяє глибше зрозуміти механізми формування пилового режиму у підземних вугільних шахтах і створює основу для подальшого аналізу окремих факторів, що впливають на міграцію та накопичення пилу.

4.2. Теоретичні засади чисельного моделювання вентиляційних потоків

Чисельне моделювання вентиляційних потоків є одним з основних інструментів теоретичного аналізу аеродинамічних процесів у підземних

вугільних шахтах. Застосування чисельних методів дозволяє враховувати складну геометрію гірничих виробок, розгалужену структуру вентиляційної мережі та вплив турбулентності на рух повітря і перенесення домішок. У теоретичних дослідженнях такі методи використовуються для узагальнення відомих закономірностей та перевірки гіпотез щодо формування повітряного і пилового режимів.

Основою чисельного моделювання вентиляційних потоків є рівняння збереження маси та імпульсу для газового середовища. У теоретичному аналізі повітря розглядається як несжуване середовище, що рухається у межах гірничих виробок під дією різниці тисків, створюваної вентиляційним обладнанням. Таке припущення є обґрунтованим для більшості режимів шахтної вентиляції та дозволяє спростити математичний опис процесів без суттєвої втрати точності.

Важливим елементом чисельного моделювання є врахування турбулентності повітряного потоку. У вентиляційних виробках, як правило, реалізується турбулентний режим руху, зумовлений шорсткістю поверхонь, наявністю кріплення та змін геометрії виробок. У теоретичних моделях турбулентність описується за допомогою узагальнених турбулентних моделей, які дозволяють визначати середні характеристики потоку без детального відтворення миттєвих вихрових структур.

Для побудови чисельної моделі вентиляційного потоку необхідно задати граничні умови, які визначають поведінку повітря на входах і виходах розрахункової області. У теоретичних роботах на вхідних ділянках, як правило, задається витрата або швидкість повітря, тоді як на вихідних — умови вільного витікання або фіксованого тиску. Коректний вибір граничних умов має принципове значення для адекватного відтворення реальних вентиляційних режимів.

Окрему увагу у чисельному моделюванні приділяють побудові розрахункової сітки, приклад на рисунку 4.2, яка дискретизує простір вентиляційних виробок. Якість сітки визначає точність розрахунків та здатність моделі відтворювати локальні особливості повітряного потоку. У

теоретичних дослідженнях використовується підхід, за якого розрахункова сітка уточнюється у зонах очікуваних значних градієнтів швидкості та тиску, зокрема поблизу стін виробок і у місцях зміни напрямку потоку.

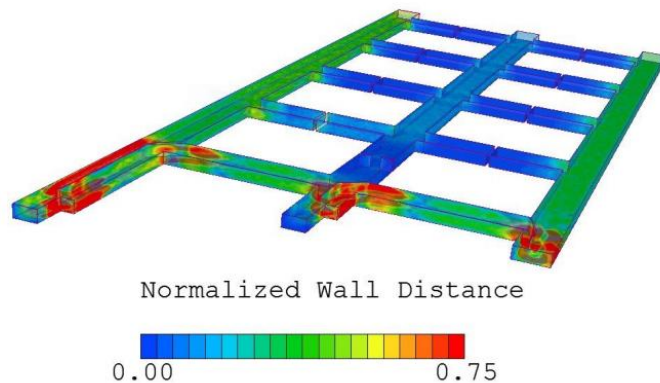


Рисунок 4.2 – Дискретизація розрахункової області вентиляційного потоку

Чисельне моделювання вентиляційних потоків створює основу для подальшого аналізу перенесення та осадження пилу. Отримані поля швидкостей і тисків використовуються як вхідні дані для моделей руху пилових частинок, що дозволяє досліджувати взаємозв'язок між аеродинамічними умовами та пиловим режимом. Таким чином, теоретичні засади чисельного моделювання вентиляційних потоків є необхідним етапом комплексного аналізу процесів перенесення і накопичення вугільного пилу у вентиляційних мережах підземних шахт.

4.3. Моделювання руху та осадження пилових частинок у вентиляційному потоці

Моделювання руху та осадження пилових частинок у вентиляційних потоках підземних вугільних шахт є наступним етапом після чисельного опису аеродинаміки повітряного середовища. У теоретичних дослідженнях такий підхід ґрунтується на використанні розрахованих полів швидкості і тиску повітря як базових параметрів для аналізу поведінки дисперсної фази, якою є вугільний пил.

У чисельних моделях пилові частинки розглядаються як тверді тіла, що рухаються у повітряному потоці під дією сукупності сил. Основною з них є сила аеродинамічного опору, яка визначає здатність повітряного потоку

переносити частинки у просторі. Поряд з нею враховується дія сили тяжіння, що зумовлює осадження пилу на поверхнях гірничих виробок, а також інерційні ефекти, які проявляються при зміні напрямку або швидкості повітряного потоку.

У теоретичному аналізі рух пилових частинок найчастіше описується в лагранжевій постановці, коли розглядаються траєкторії окремих частинок у полі швидкостей повітря. Такий підхід дозволяє оцінювати вплив розміру, щільності та початкового положення частинок на характер їх перенесення і осадження. Дрібнодисперсний пил, як правило, має траєкторії, близькі до ліній струму повітря, тоді як більші частинки частіше відхиляються від потоку і осідають у зонах зі складною аеродинамікою.

Важливим елементом моделювання є врахування турбулентності вентиляційного потоку. Турбулентні пульсації швидкості сприяють хаотичному руху пилових частинок, їх перемішуванню у поперечному перерізі виробок та повторному підняттю осілого пилу. У теоретичних моделях вплив турбулентності на рух частинок враховується через узагальнені коригувальні залежності, які дозволяють описати додаткову дифузію пилу у повітряному потоці.

Осадження пилових частинок у межах чисельних моделей розглядається як результат взаємодії частинок з поверхнями гірничих виробок. У теоретичному аналізі вважається, що при досягненні стінок виробки частинки втрачають кінетичну енергію і осідають на поверхні. Найінтенсивніше осадження прогнозується у зонах знижених швидкостей повітря, у поворотах виробок, за вентиляційними спорудами та у ділянках з рециркуляційними потоками.

Окремо у теоретичних підходах розглядається явище вторинного пилоутворення, яке має істотний вплив на загальний пиловий режим шахти. Осілий пил у результаті змін вентиляційних режимів або під дією турбулентних збурень може знову переходити у зважений стан і переноситися на значні відстані. У чисельних моделях це явище

враховується опосередковано через аналіз зон можливого накопичення пилу та підвищених турбулентних впливів.

Таким чином, моделювання руху та осадження пилових частинок у вентиляційному потоці дозволяє на теоретичному рівні дослідити закономірності міграції пилу, виявити потенційні зони його накопичення та оцінити вплив аеродинамічних умов на формування пилового режиму. Отримані положення використовуються для подальшого аналізу ефективності вентиляційних рішень та обґрунтування заходів зменшення запиленості у підземних вугільних шахтах.

4.4. Аналіз впливу вентиляційних параметрів на перенесення та осадження пилу

Вентиляційні параметри мають визначальний вплив на характер перенесення та осадження вугільного пилу у підземних гірничих виробках. Зміна швидкості, напрямку та структури повітряного потоку призводить до перерозподілу пилових частинок у вентиляційній мережі, формування локальних зон підвищеної запиленості та накопичення осілого пилу. Теоретичний аналіз впливу цих параметрів дозволяє встановити загальні закономірності пилового режиму та оцінити ефективність різних вентиляційних рішень.

Одним з основних параметрів, що впливають на перенесення пилу, є швидкість вентиляційного струменя. За підвищених швидкостей повітря дрібнодисперсний пил інтенсивніше утримується у зваженому стані та переноситься на значні відстані. Водночас зі зростанням швидкості зменшується імовірність осадження частинок у прямолінійних виробках. При зниженні швидкості вентиляційного потоку переважає дія сили тяжіння, що сприяє осадженню пилу на підлозі, бокових поверхнях і елементах кріплення виробок.

Важливу роль відіграє напрямок руху повітряного потоку та його зміни у вентиляційній мережі. У місцях поворотів виробок, розгалужень та з'єднання гілок вентиляційні струмені зазнають перерозподілу, що супроводжується утворенням зон знижених швидкостей і локальної

турбулентності. У таких ділянках теоретично прогнозується інтенсивніше осадження пилових частинок і формування осередків пилонакопичення.

Суттєвий вплив на пиловий режим має турбулентність вентиляційного потоку. Турбулентні пульсації швидкості сприяють перемішуванню повітря і пилу у поперечному перерізі виробки, що може як зменшувати локальні концентрації пилу, так і сприяти його контакту з поверхнями виробок. У результаті осадження пилу у турбулентному потоці має нерівномірний характер і залежить від поєднання аеродинамічних та геометричних факторів.

Окремо розглядається вплив витоків повітря та несанкціонованих перетоків між вентиляційними гілками. Навіть незначні витoki можуть змінювати розподіл повітряних потоків у мережі, що призводить до зміни зон перенесення та осадження пилу. У теоретичних моделях такі ділянки розглядаються як потенційно небезпечні з точки зору накопичення пилу, особливо у нейтральних виробках та поблизу рухомого обладнання.

Вплив вентиляційних параметрів проявляється також у процесах вторинного пилоутворення. Осілий пил, накопичений у виробках, може знову переходити у зважений стан при зміні швидкості або напрямку повітряного потоку. Таким чином, вентиляційний режим визначає не лише первинне перенесення пилу з очисних вибоїв, а й динаміку його повторного залучення у повітряний потік.

Узагальнений вплив основних вентиляційних параметрів на перенесення та осадження вугільного пилу наведено у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Вплив вентиляційних параметрів на перенесення та осадження вугільного пилу

Вентиляційний параметр	Характер впливу	Наслідки для перенесення пилу	Ймовірні зони пилонакопичення
Швидкість повітряного потоку	Зростання швидкості зменшує осадження пилу, зниження сприяє його накопиченню	Інтенсивніше перенесення дрібнодисперсного пилу	Ділянки зі зниженими швидкостями повітря
Напрямок вентиляційного струменя	Зміна напрямку викликає перерозподіл пилових частинок	Відхилення траєкторій руху пилу	Повороти виробок, розгалуження
Турбулентність потоку	Підвищена турбулентність посилює перемішування пилу	Збільшення контакту пилу з поверхнями виробок	Приповерхневі зони
Геометрія виробок	Зміна перерізу впливає на структуру потоку	Локальне зниження швидкості та осадження пилу	Розширення і звуження виробок

Витоки повітря	Перерозподіл вентиляційних потоків	Зміна шляхів перенесення пилу	Нейтральні виробки
Зміна вентиляційного режиму	Коливання швидкостей і напрямків потоку	Повторне підняття осілого пилу	Виробки з накопиченим пилом

Узагальнюючи, можна зазначити, що перенесення та осадження вугільного пилу у вентиляційних потоках є результатом складної взаємодії вентиляційних параметрів, геометрії виробок і властивостей пилових частинок. Теоретичний аналіз впливу цих факторів дозволяє виявити найбільш небезпечні з точки зору запиленості ділянки вентиляційної мережі та створює наукову основу для обґрунтування заходів з керування пиловим режимом у підземних вугільних шахтах.

РОЗДІЛ 5 ШЛЯХИ ЗМЕНШЕННЯ ЗАПИЛЕНOSTІ У ВЕНТИЛЯЦІЙНИХ ПОТОКАХ ПІДЗЕМНИХ ВУГІЛЬНИХ ШАХТ

5.1. Загальні підходи до керування пиловим режимом у вентиляційній мережі

Зменшення запиленості у вентиляційних потоках підземних вугільних шахт є одним з пріоритетних напрямів забезпечення безпечних умов праці та зниження вибухонебезпечності гірничих виробок. Теоретичні підходи до керування пиловим режимом ґрунтуються на комплексному врахуванні процесів утворення, перенесення та осадження вугільного пилу, а також на аналізі вентиляційних параметрів і конструктивних особливостей вентиляційної мережі.

Одним з базових напрямів зменшення запиленості є оптимізація вентиляційного режиму. Підтримання раціональних швидкостей повітряного потоку дозволяє зменшити накопичення пилу у виробках зі зниженими швидкостями та запобігти утворенню застійних зон.

Теоретичні дослідження показують, що правильно організований вентиляційний потік сприяє ефективному відведенню дрібнодисперсного пилу з очисних і підготовчих вибоїв, водночас зменшуючи інтенсивність його осадження у транспортних і допоміжних виробках.

Важливу роль у керуванні пиловим режимом відіграє раціональне планування вентиляційної мережі. Зменшення кількості нейтральних виробок, оптимальне розташування вентиляційних перемичок і регулюючих споруд дозволяє обмежити несанкціоновані перетоки повітря та знизити ймовірність утворення зон підвищеного пилонакопичення. У теоретичному аспекті вентиляційна мережа розглядається як система, у якій зміна параметрів однієї гілки може суттєво впливати на пиловий режим у віддалених ділянках.

Окремим напрямом зменшення запиленості є зниження вторинного пилоутворення. Осілий пил, накопичений на поверхнях виробок, розглядається як потенційне джерело повторного забруднення повітря. Теоретичні підходи передбачають систематичне зволоження поверхонь,

підтримання стабільних вентиляційних режимів та мінімізацію різких змін швидкості повітряного потоку, які можуть спричиняти повторне підняття пилу.

Таблиця 5.1 – Заходи зменшення запиленості у вентиляційних потоках підземних вугільних шахт

Заходи	Механізм дії	Вплив на перенесення пилу	Вплив на осадження пилу
Оптимізація вентиляційної витрати повітря	Підтримання раціональних швидкостей повітряного потоку	Зменшення концентрації пилу у повітрі за рахунок ефективного відведення	Зниження осадження у прямолінійних виробках
Стабілізація вентиляційного режиму	Запобігання різким змінам швидкості та напрямку потоку	Обмеження повторного підняття пилу	Зменшення вторинного пилонакопичення
Раціональне планування вентиляційної мережі	Зменшення нейтральних і застійних зон	Оптимізація шляхів перенесення пилу	Зниження локального накопичення пилу
Зменшення витоків повітря	Усунення несанкціонованих перетоків між гілками	Стабілізація розподілу повітряних потоків	Зменшення осадження у нейтральних виробках
Зволоження поверхонь виробок	Підвищення адгезії пилових частинок	Зменшення повторного	Фіксація осілого пилу на поверхнях

		залучення пилу у потік	
Контроль геометрії виробок	Оптимізація перерізу та конфігурації	Зменшення турбулентних зон	Обмеження локального пилонакопичення

У керуванні пиловим режимом також враховується вплив геометрії гірничих виробок. Зони різкої зміни перерізу, повороти та перетини вентиляційних струменів потребують особливої уваги, оскільки саме у таких місцях теоретично прогнозується інтенсивніше осадження пилу. Оптимізація конфігурації виробок і розміщення вентиляційних споруд у цих зонах дозволяє зменшити локальні концентрації пилу.

Таким чином, загальні підходи до зменшення запиленості у вентиляційних потоках базуються на комплексному керуванні вентиляційними параметрами, геометрією мережі та процесами вторинного пилоутворення. Реалізація таких підходів створює науково обґрунтовану основу для підвищення безпеки та ефективності провітрювання підземних вугільних шахт.

5.2. Вентиляційні заходи зменшення перенесення та осадження вугільного пилу

Вентиляційні заходи займають провідне місце у системі зменшення запиленості підземних вугільних шахт, оскільки саме вентиляційні потоки визначають характер перенесення, розсіювання та накопичення вугільного пилу. У теоретичному аспекті ефективність вентиляційних заходів оцінюється з точки зору їх впливу на швидкість і напрямок руху повітря, стабільність вентиляційного режиму та формування аеродинамічних умов у гірничих виробках.

Одним з основних вентиляційних заходів є оптимізація витрати повітря у вентиляційних гілках. Підтримання достатньої вентиляційної витрати дозволяє забезпечити розбавлення пилу до допустимих концентрацій та

сприяє його відведенню з очисних і підготовчих вибоїв. Водночас надмірне збільшення швидкості повітряного потоку може призводити до посилення вторинного пилоутворення за рахунок повторного підняття осілого пилу. Тому у теоретичних роботах наголошується на необхідності вибору раціональних швидкостей вентиляційного струменя з урахуванням особливостей конкретних виробок.

Важливим заходом є стабілізація вентиляційного режиму. Часті зміни напрямку або швидкості повітряного потоку негативно впливають на пиловий режим, оскільки сприяють дестабілізації осілого пилу і його повторному залученню у повітряний потік. Теоретичні підходи передбачають мінімізацію різких змін режимів провітрювання, особливо у виробках з інтенсивним накопиченням пилу, а також підтримання постійних параметрів роботи вентиляційного обладнання.

Раціональна організація вентиляційної мережі також є ефективним заходом зменшення запиленості. Скорочення кількості нейтральних виробок, оптимальне розташування вентиляційних перемичок та регулюючих споруд дозволяє зменшити утворення застійних зон і зон рециркуляції повітря, у яких теоретично прогнозується підвищене осадження пилу. У наукових роботах підкреслюється, що навіть незначні зміни у конфігурації вентиляційної мережі можуть суттєво впливати на пиловий режим у віддалених ділянках шахти.

Окрему увагу приділяють зменшенню несанкціонованих витоків повітря. Витоки порушують баланс вентиляційних потоків, призводять до зниження ефективності провітрювання та створюють умови для локального накопичення пилу. Теоретичний аналіз показує, що усунення витоків сприяє стабілізації повітряного режиму та зменшенню зон підвищеної запиленості, особливо у нейтральних і допоміжних виробках.

Таким чином, вентиляційні заходи зменшення перенесення та осадження вугільного пилу мають комплексний характер і базуються на оптимізації швидкості, напрямку та стабільності повітряного потоку. Їх ефективність визначається узгодженістю роботи всієї вентиляційної мережі та

врахуванням особливостей пилового режиму у різних ділянках підземних виробок.

5.3. Організаційні та технічні заходи зниження пилонавантаження

Поряд з вентиляційними заходами важливу роль у зменшенні запиленості відіграють організаційні та технічні заходи, спрямовані на зниження утворення пилу та обмеження його вторинного підняття. У теоретичних дослідженнях ці заходи розглядаються як доповнення до вентиляційних рішень і як необхідний елемент комплексного керування пиловим режимом.

Одним з найбільш поширених технічних заходів є зволоження поверхонь гірничих виробок. Вода або водяні розчини підвищують адгезію пилових частинок до поверхонь, зменшуючи їх здатність переходити у зважений стан. Теоретичний аналіз показує, що регулярне зволоження підлоги, бокових поверхонь та елементів кріплення дозволяє суттєво знизити інтенсивність вторинного пилоутворення, особливо у транспортних і допоміжних виробках.

Організаційні заходи передбачають раціональне планування гірничих робіт з урахуванням пилового фактору. Узгодження режимів роботи обладнання, мінімізація непотрібних переміщень техніки та обмеження виконання пилогенеруючих операцій у зонах з несприятливими вентиляційними умовами дозволяють зменшити загальне пилонавантаження. У теоретичному аспекті такі заходи розглядаються як елемент системного підходу до забезпечення безпечних умов праці.

Важливим технічним напрямом є підтримання належного стану гірничих виробок. Нерівності поверхонь, накопичення осілого пилу та пошкодження кріплення сприяють утворенню турбулентних зон і підвищеному осадженню пилу. Регулярне очищення виробок і підтримання їх геометрії у проектному стані розглядається як ефективний захід зменшення локального пилонакопичення.

Окремо у теоретичних роботах розглядається роль контролю пилового режиму. Систематичний аналіз стану вентиляційних виробок, виявлення зон підвищеного пилонакопичення та своєчасне впровадження

коригувальних заходів дозволяють запобігти розвитку небезпечних умов. Такий підхід забезпечує зворотний зв'язок між вентиляційними рішеннями та фактичним станом пилового режиму.

Таким чином, організаційні та технічні заходи зниження пилонавантаження доповнюють вентиляційні рішення і забезпечують комплексний підхід до зменшення запиленості у підземних вугільних шахтах. Їх поєднання дозволяє не лише зменшити концентрацію пилу у повітрі, а й обмежити його накопичення на поверхнях виробок, що є важливим з точки зору безпеки та стабільності вентиляційного режиму.

5.4. Узагальнена оцінка ефективності заходів зменшення запиленості у вентиляційних потоках

Ефективність заходів зменшення запиленості у вентиляційних потоках підземних вугільних шахт доцільно оцінювати з позицій їх комплексного впливу на процеси утворення, перенесення та осадження вугільного пилу. Теоретичний аналіз свідчить, що жоден окремий захід не може забезпечити суттєве зниження пилонавантаження без урахування взаємодії з іншими елементами системи вентиляції та організації гірничих робіт.

Вентиляційні заходи, спрямовані на оптимізацію швидкості та стабільності повітряного потоку, мають базове значення для формування сприятливого пилового режиму. Вони забезпечують умови для ефективного відведення пилу з очисних і підготовчих вибоїв та зменшують імовірність його накопичення у виробках. Разом з тим теоретичні дослідження показують, що надмірне збільшення вентиляційних витрат може мати зворотний ефект, пов'язаний з інтенсифікацією вторинного пилоутворення. Це підтверджує необхідність раціонального вибору параметрів провітрювання з урахуванням конкретних умов вентиляційної мережі.

Організаційні та технічні заходи доповнюють вентиляційні рішення і відіграють важливу роль у зниженні загального пилонавантаження. Зволоження поверхонь виробок, підтримання стабільних режимів роботи обладнання та раціональне планування гірничих робіт сприяють

обмеженню повторного підняття осілого пилу. У теоретичному аспекті такі заходи розглядаються як засоби зменшення інтенсивності вторинного пилоутворення, яке часто є визначальним фактором високої запиленості у транспортних і допоміжних виробках.

Важливим результатом узагальнення є висновок про системний характер пилового режиму шахти. Зміна вентиляційних параметрів або організації робіт в одній частині вентиляційної мережі може призводити до перерозподілу пилу та зміни умов у віддалених виробках. Це означає, що ефективність заходів зменшення запиленості повинна оцінюватися не локально, а з урахуванням впливу на всю вентиляційну систему в цілому.

З позицій теоретичного аналізу найбільш ефективними є комплексні заходи, які поєднують оптимізацію вентиляційного режиму, зменшення витоків повітря, контроль геометрії виробок та обмеження вторинного пилоутворення. Такий підхід дозволяє не лише знизити концентрацію пилу у повітрі, а й зменшити його накопичення на поверхнях гірничих виробок, що є особливо важливим з точки зору вибухонебезпечності та довготривалої безпеки експлуатації шахти.

Узагальнена оцінка ефективності основних груп заходів зменшення запиленості у вентиляційних потоках наведена у таблиці 5.2.

Таблиця 5.1 – Заходи зменшення запиленості у вентиляційних потоках підземних вугільних шахт

Заходи	Механізм дії	Вплив на перенесення пилу	Вплив на осадження пилу
Оптимізація вентиляційної витрати повітря	Підтримання раціональних швидкостей повітряного потоку	Зменшення концентрації пилу у повітрі за рахунок ефективного відведення	Зниження осадження у прямолінійних виробках

Стабілізація вентиляційного режиму	Запобігання різким змінам швидкості та напрямку потоку	Обмеження повторного підняття пилу	Зменшення вторинного пилонакопичення
Раціональне планування вентиляційної мережі	Зменшення нейтральних і застійних зон	Оптимізація шляхів перенесення пилу	Зниження локального накопичення пилу
Зменшення витоків повітря	Усунення несанкціонованих перетоків між гілками	Стабілізація розподілу повітряних потоків	Зменшення осадження у нейтральних виробках
Зволоження поверхонь виробок	Підвищення адгезії пилових частинок	Зменшення повторного залучення пилу у потік	Фіксація осілого пилу на поверхнях
Контроль геометрії виробок	Оптимізація перерізу та конфігурації	Зменшення турбулентних зон	Обмеження локального пилонакопичення

Узагальнюючи, можна зазначити, що теоретичні підходи до зменшення запиленості у вентиляційних потоках підземних вугільних шахт підтверджують доцільність застосування багатокомпонентної системи заходів. Поєднання вентиляційних, організаційних і технічних рішень створює умови для стабілізації пилового режиму, зниження ризиків для здоров'я працівників і підвищення рівня промислової безпеки. Отримані узагальнення можуть бути використані як наукова основа для подальших досліджень та розробки практичних рекомендацій з керування пиловим режимом у підземних вугільних шахтах.

ВИСНОВКИ

У випускній кваліфікаційній роботі виконано теоретичне дослідження процесів перенесення та осадження вугільного пилу у вентиляційних потоках підземних вугільних шахт. Розглянута проблема є актуальною з огляду на суттєвий вплив пилового фактору на умови праці, рівень промислової безпеки та вибухонебезпечність гірничих виробок. Аналіз наукових джерел підтвердив, що пиловий режим шахти формується під впливом складної взаємодії аеродинамічних умов, геометрії вентиляційної мережі та властивостей вугільного пилу.

Встановлено, що вугільний пил характеризується різноманітним дисперсним складом, який визначає його здатність до тривалого перебування у зваженому стані та перенесення вентиляційними потоками на значні відстані. Найбільшу небезпеку становлять дрібнодисперсні фракції пилу, які легко залучаються у повітряний потік, накопичуються у відпрацьованих і нейтральних виробках та можуть бути джерелом вторинного пилоутворення.

Теоретичний аналіз показав, що розподіл пилу у вентиляційній мережі має нерівномірний характер. Локальні зони підвищеного пилонакопичення формуються у ділянках зі зниженими швидкостями повітря, у поворотах і розгалуженнях виробок, а також у місцях зміни перерізу вентиляційних гілок. Важливу роль у формуванні пилового режиму відіграє турбулентність повітряного потоку, яка одночасно сприяє як утриманню пилу у зваженому стані, так і його осадженню на поверхнях виробок.

Розгляд теоретичних підходів до моделювання перенесення та осадження пилу показав, що чисельні методи є ефективним інструментом для аналізу пилового режиму вентиляційних мереж. Моделювання дозволяє враховувати складну геометрію виробок, вплив турбулентності та взаємодію пилових частинок з повітряним потоком. Узагальнення ейлерівських і лагранжевих підходів підтвердило доцільність їх

використання для теоретичного аналізу міграції та накопичення пилу без проведення натурних експериментів.

Аналіз впливу вентиляційних параметрів засвідчив, що швидкість і стабільність повітряного потоку мають визначальний вплив на характер перенесення пилу. З одного боку, збільшення вентиляційної витрати сприяє ефективному відведенню пилу, з іншого — надмірні швидкості можуть викликати повторне підняття осілого пилу. Це підтверджує необхідність раціонального вибору вентиляційних режимів з урахуванням особливостей вентиляційної мережі та умов експлуатації шахти.

Узагальнення теоретичних підходів до зменшення запиленості показало, що найбільш ефективними є комплексні заходи, які поєднують оптимізацію вентиляційного режиму, зменшення витоків повітря, стабілізацію роботи вентиляційного обладнання та обмеження вторинного пилоутворення. Доповнення вентиляційних рішень організаційними і технічними заходами, зокрема зволоженням поверхонь виробок і підтриманням їх у належному стані, дозволяє суттєво знизити загальне пиловантаження.

Загалом виконане теоретичне дослідження підтверджує системний характер проблеми перенесення та осадження вугільного пилу у вентиляційних потоках підземних шахт. Отримані узагальнення можуть бути використані як наукова основа для подальших досліджень у галузі шахтної вентиляції, а також для обґрунтування практичних рішень, спрямованих на підвищення рівня безпеки та поліпшення умов праці у підземних вугільних шахтах.

АНОТАЦІЯ

У випускній кваліфікаційній роботі на здобуття ступеня магістра виконано теоретичне дослідження процесів перенесення та осадження вугільного пилу у вентиляційних потоках підземних вугільних шахт. Актуальність теми зумовлена негативним впливом вугільного пилу на умови праці гірників, підвищенням вибухонебезпечності гірничих виробок та необхідністю забезпечення стабільного і безпечного вентиляційного режиму.

У роботі розглянуто фізичні та аеродинамічні особливості утворення, перенесення і накопичення вугільного пилу у вентиляційній мережі шахти. Проаналізовано вплив швидкості та напрямку повітряного потоку, турбулентності та геометрії гірничих виробок на просторовий розподіл пилу. Узагальнено теоретичні підходи до моделювання перенесення та осадження пилових частинок у вентиляційних потоках, зокрема ейлерівський і лагранжевий методи чисельного аналізу.

Особливу увагу приділено теоретичному аналізу факторів, що визначають формування зон підвищеного пилонакопичення, а також ролі вторинного пилоутворення у загальному пиловому режимі підземних виробок. На основі аналізу наукових джерел узагальнено підходи до зменшення запиленості, які ґрунтуються на оптимізації вентиляційних параметрів, стабілізації вентиляційного режиму та поєднанні вентиляційних, організаційних і технічних заходів.

Результати роботи мають теоретичне значення та можуть бути використані як наукова основа для подальших досліджень у галузі шахтної вентиляції, а також для обґрунтування практичних рішень, спрямованих на зниження пилонавантаження та підвищення рівня промислової безпеки у підземних вугільних шахтах.

ВУГІЛЬНИЙ ПИЛ, ВЕНТИЛЯЦІЙНІ ПОТОКИ, ПІДЗЕМНІ ВУГІЛЬНІ ШАХТИ, ПЕРЕНЕСЕННЯ ПИЛУ, ОСАДЖЕННЯ ПИЛУ, ПИЛОВИЙ РЕЖИМ, ШАХТНА ВЕНТИЛЯЦІЯ.

ANNOTATION

In the qualification work for the Master's degree, a theoretical study of the processes of coal dust transport and deposition in ventilation airflows of underground coal mines is carried out. The relevance of the topic is determined by the negative impact of coal dust on working conditions, the increased explosion hazard of mine workings, and the need to ensure a stable and safe ventilation regime.

The paper analyzes the physical and aerodynamic features of coal dust generation, transport, and accumulation within mine ventilation networks. The influence of airflow velocity and direction, turbulence, and the geometry of mine workings on the spatial distribution of dust is considered. Theoretical approaches to modeling dust transport and deposition in ventilation airflows are generalized, including Eulerian and Lagrangian methods of numerical analysis.

Special attention is given to the theoretical analysis of factors that determine the formation of zones with increased dust accumulation, as well as to the role of secondary dust generation in the overall dust regime of underground workings. Based on the analysis of scientific sources, approaches to dust reduction are summarized, focusing on the optimization of ventilation parameters, stabilization of ventilation regimes, and the combined application of ventilation, organizational, and technical measures.

The results of the work have theoretical significance and may be used as a scientific basis for further research in the field of mine ventilation, as well as for substantiating practical solutions aimed at reducing dust load and improving industrial safety in underground coal mines.

COAL DUST, VENTILATION AIRFLOWS, UNDERGROUND COAL MINES, DUST TRANSPORT, DUST DEPOSITION, DUST REGIME, MINE VENTILATION.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Coal's role in electricity generation worldwide [Електронний ресурс]. – World Coal Association. – Режим доступу: <https://www.worldcoal.org/coal/uses-coal/coal-electricity>
2. Honaker R., Hower J., Eble C. et al. Laboratory and bench-scale testing for rare-earth elements : technical report. – 2014.
3. Harris M., Cashdollar K., Man C. K., Thimons E. Mitigating coal dust explosions in modern underground coal mines. – 2009.
4. Colinet J. F., Rider J. P., Listak J. M., Organiscak J. A., Wolfe A. L. Best practices for dust control in coal mining. – Cincinnati : NIOSH, 2010.
5. Schatzel S. J. Identifying sources of respirable quartz and silica dust in underground coal mines // International Journal of Coal Geology. – 2009. – Vol. 78, No. 2. – P. 110–118.
6. Petavratzi E., Kingman S., Lowndes I. Particulates from mining operations: a review of sources, effects and regulations // Minerals Engineering. – 2005. – Vol. 18, No. 12. – P. 1183–1199.
7. Balaan M. R., Weber S. L., Banks D. E. Clinical aspects of coal workers' pneumoconiosis and silicosis // Occupational Medicine. – 1993. – Vol. 8, No. 1. – P. 19–34.
8. Federal Mine Safety and Health Act (Mine Act). – U.S. Department of Labor, 1977.
9. Mine Improvement and New Emergency Response (MINER) Act. – U.S. Department of Labor, 2006.
10. Cheng L., Zukovich P. P. Respirable dust adhering to run-of-face bituminous coals : report of investigations.
11. Reed W., Taylor C. Factors affecting the development of mine face ventilation systems in the 20th century // SME Annual Meeting. – Denver, 2007.

12. Rider J., Colinet J. Current dust control practices on U.S. longwalls. – 2007.
13. Breslin J. A., Strazisar A. J. Dust-control studies using scale models of coal mine entries and mining machines. – Pittsburgh : U.S. Bureau of Mines, 1976.
14. Zhou F., Wei L., Chen K., Cheng J. Analyses of cascading failure in mine ventilation systems // Journal of Failure Analysis and Prevention. – 2013. – Vol. 13, No. 5. – P. 538–544.
15. Van Heerden J., Sullivan P. Application of CFD for evaluation of dust suppression systems // Mine Ventilation Symposium. – Salt Lake City, 1993.
16. Organiscak J. A. Examination of water spray airborne coal dust capture with wetting agents // Mining Engineering. – 2013.
17. Taylor C. D., Zimmer J. A. Effects of water sprays on face methane concentrations // International Mine Ventilation Congress. – Krakow, 2001. – P. 465–470.
18. Cortese R. A., Perlee H. E. Full-scale testing of the float dust deposition meter. – 1998.
19. Sapko M. J., Pinkerton J. E., Bubash J. R. Optical dust deposition meter // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1988. – Vol. 24, No. 3. – P. 508–513.
20. Kissell F. N., Volkwein J. C., Kohler J. Historical perspective of personal dust sampling in coal mines // Mine Ventilation Conference. – 2002. – P. 619–623.
21. Harris G. W., Maguire B. A. A gravimetric dust sampling instrument // Annals of Occupational Hygiene. – 1968. – Vol. 11, No. 3. – P. 195–201.
22. Bowman J. D. et al. Accuracy criteria recommended for certification of gravimetric coal mine dust samplers. – Cincinnati : NIOSH, 1984.
23. Bodsworth P. L. et al. Dust sampling strategy on coal-faces in relation to modern coal mining methods. – Edinburgh : Institute of Occupational Medicine, 1993.

24. Bugarski A., Gautam M. Size distribution and deposition in the human respiratory tract // ETH Conference on Nanoparticle Measurement. – Bern, 2001.
25. Gillies A. D. S., Wu H. W. Evaluation of a real-time personal dust meter // U.S. Mine Ventilation Symposium. – 2006. – P. 167–174.
26. Kost J. A., Andria G. D. Wet and top float mine dust sampling. – Monroeville : U.S. Department of the Interior, 1977.
27. Sekimoto K. Scaling laws for sedimentation process in water flow-driven sedimentation tanks. – Dordrecht : Springer, 2008. – P. 379–390.
28. Cunningham E. On the velocity of steady fall of spherical particles through a fluid medium // Proceedings of the Royal Society A. – 1910. – Vol. 83, No. 563. – P. 357–365.
29. Chang X., Laage L. W., Greuer R. E. MFIRE: a computer simulation program for mine ventilation and fire modeling. – U.S. Bureau of Mines, 1990.
30. Zhou L. Improvement of the mine fire simulation program MFIRE. – 2009.
31. Bhaskar R., Ramani R. V. Dust flows in mine airways: comparison of experimental results and mathematical predictions. – 1988.
32. McGrattan K. B., Baum H. R., Rehm R. G. Large eddy simulations of smoke movement.
33. Kumar A. Dust transportation and settling within the mine ventilation network : master's thesis. – 2019.
34. Cashdollar K. L. Overview of dust explosibility characteristics.
35. Sapko M. J., Weiss E. S. Coal dust explosion propagation and suppression.
36. NIOSH. Dust control handbook for industrial minerals mining and processing. – Cincinnati, 2003.
37. NIOSH. Criteria for a recommended standard: occupational exposure to coal mine dust. – Cincinnati, 2016.

38. McPherson M. J. Subsurface ventilation and environmental engineering. – Dordrecht : Springer, 1993.
39. Wallace K. G. Mine ventilation and air conditioning. – New York : Wiley, 1982.
40. Hartman H. L., Mutmanský J. M. Introductory mining engineering. – New York : Wiley, 2002.
41. Ramani R. V., Mutmanský J. M. Mine ventilation. – SME, 1998.
42. Versteeg H. K., Malalasekera W. An introduction to computational fluid dynamics. – Harlow : Pearson, 2007.
43. Pope S. B. Turbulent flows. – Cambridge : Cambridge University Press, 2000.
44. ANSYS Fluent Theory Guide. – ANSYS Inc.
45. ANSYS Fluent User's Guide. – ANSYS Inc.
46. Crowe C. T., Sommerfeld M., Tsuji Y. Multiphase flows with droplets and particles. – Boca Raton : CRC Press, 1998.
47. Seinfeld J. H., Pandis S. N. Atmospheric chemistry and physics. – New York : Wiley, 2006.
48. Hinds W. C. Aerosol technology: properties, behavior, and measurement. – New York : Wiley, 1999.
49. Vincent J. H. Aerosol sampling: science and practice. – Chichester : Wiley, 2007.