

УДК 628.511+622.4+62-784.43

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-3-31>

ВПЛИВ ІНТЕНСИВНОСТІ ТУРБУЛЕНТНОГО ОСАДЖЕННЯ НА КОНЦЕНТРАЦІЮ ДРІБНОДИСПЕРСНОГО ПИЛУ ПІД ЧАС РОБОТИ КОМБАЙНА В УМОВАХ ГІРНИЧОЇ ВИРОБКИ

Чеберячко Юрій Іванович,

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри охорони праці та цивільної безпеки
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»,
професор кафедри безпеки праці та охорони довкілля
ТОВ «Технічний університет «Метінвест політехніка»
ORCID ID: 0000-0001-7307-1553

Максимова Наталія Миколаївна,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри безпеки праці та охорони довкілля
ТОВ «Технічний університет «Метінвест політехніка»
ORCID ID: 0000-0003-1684-7479

Беднюк Олександр Вікторович,

аспірант
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»,
професор кафедри безпеки праці та охорони довкілля
ТОВ «Технічний університет «Метінвест політехніка»
ORCID ID: 0009-0006-3346-9317

Подобний Антон Дмитрович,

студент групи 183-22-1
ТОВ «Технічний університет «Метінвест політехніка»
ORCID ID: 0009-0000-5277-1163

У роботі оцінено ступінь впливу процесу турбулентного осадження дрібнодисперсного пилу на зміну його концентрації по довжині гірничої виробки під час роботи комбайна. Використано аналітичні методи для визначення впливу процесу поперечної турбулентної міграції зважених дрібнодисперсних частинок пилу на зміну їх концентрації по довжині гірничої виробки з урахуванням динамічних характеристик вентиляційного потоку. За результатами аналітичних досліджень встановлено, що при вході в гірничу виробку та під час подальшого руху вентиляційного потоку з вмістом дрібнодисперсної фази пилу відбувається процес міграції дрібних зважених часток пилу до поверхні виробки. На підставі аналізу процесів конвективної дифузії і турбулентної міграції дрібнодисперсної фази пилу виявлено, що під час руху вентиляційного потоку на осадження дрібнодисперсного пилу впливають геометричні параметри гірничої виробки й аеродинамічні параметри вентиляційного потоку. Для оцінки ефективності турбулентного осадження дрібнодисперсної фази на поверхню гірничої виробки рекомендовано формулу, що дає змогу визначити частку осілих слабо інерційних часток пилу залежно від геометричних параметрів гірничої виробки й аеродинамічних параметрів вентиляційного потоку. У роботі розроблено та теоретично обґрунтовано математичну модель осадження слабо інерційних дрібнодисперсних часток пилу з вентиляційного потоку, яка відрізняється від відомих тим, що враховує процеси конвективної дифузії і турбулентної міграції дрібнодисперсної фази пилу під час її переміщення по довжині гірничої виробки. Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що рекомендована формула дає змогу оцінити вплив турбулентного осадження дрібнодисперсної фази пилу на величину її концентрації і обґрунтувати потребу в розробці способів і засобів зниження кількості дрібнодисперсної фази пилу під час виконання прохідницьких робіт.

Ключові слова: турбулентне осадження пилу, динамічні характеристики вентиляційного потоку, конвективна дифузія, поперечна міграція, дрібнодисперсна фаза.

Cheberyachko Yurii, Maksymova Nataliia, Bedniuk Oleksandr, Podobnyi Anton. Influence of turbulent deposition intensity on the concentration of fine dust during the operation of a shearer in a mine workings

The paper assesses the degree of influence of the process of turbulent deposition of fine dust on the change in its concentration along the length of a mine workings during the operation of a shearer. Analytical methods have been used to determine the influence of the process of transverse turbulent migration of suspended fine dust particles on the change in their concentration along the length of the mine workings, taking into account the dynamic characteristics of the ventilation flow. According to the results of analytical studies, it was found that at the entrance to the mine workings and further movement of the ventilation flow containing the fine dust phase, the process of migration of small suspended dust particles to the surface of the workings occurs. Based on the analysis of the processes of convective diffusion and turbulent migration of the fine dust phase, it was found that the geometric parameters of the mine workings and the aerodynamic parameters of the ventilation flow affect the deposition of fine dust. To evaluate the efficiency of turbulent deposition of the fine phase on the surface of a mine workings, a formula is recommended that allows determining the fraction of settled low-inertial dust particles depending on the geometric parameters of the mine workings and aerodynamic parameters of the ventilation flow. The paper develops and theoretically substantiates a mathematical model of deposition of low-inertial fine dust particles from the ventilation stream, which differs from the known ones in that it takes into account the processes of convective diffusion and turbulent migration of the fine dust phase during its movement along the length of the mine workings. The practical significance of the obtained results is that the recommended formula allows to estimate the effect of turbulent deposition of the fine dust phase on the value of its concentration and to justify the need to develop methods and means to reduce the amount of fine dust phase during sinking operations.

Key words: turbulent dust deposition, dynamic characteristics of the ventilation flow, convective diffusion, transverse migration, fine phase.

Вступ. Під час роботи прохідницького комбайна в рудникову атмосферу надходить значна кількість дрібнодисперсного пилу розміром менше ніж 10 мкм [1]. Відомо, що ця фракція має високу проникливість в організм людини, завдаючи при цьому істотний шкідливий вплив на його здоров'я [2–6].

На зміну концентрації дрібнодисперсного пилу по довжині виробки мають вплив турбулентні характеристики вентиляційного потоку. Оцінка впливу цих характеристик потрібна для визначення ефективності застосовуваних заходів і засобів зниження концентрації дрібнодисперсного пилу.

У зв'язку з вищевказаним у роботі поставлено завдання оцінити ступінь впливу процесу турбулентного осадження дрібнодисперсного пилу на зміну його концентрації по довжині гірничої виробки під час роботи комбайна.

У натурних умовах було помічено, що із поширенням шкідливих домішок гірничими виробками під дією турбулентних характеристик вентиляційного потоку, який виходить із кінця вентиляційного трубопроводу, спостерігається зміна концентрації і дисперсного складу пилу.

Інтерес до цього фізичного явища обумовлений тим, що в умовах проведення гірничих робіт утворюється велика кількість дрібнодисперсного пилу, що шкідливо впливає на організм працівників, викликаючи різні види захворювань органів дихання.

Наприклад, у роботах [5; 7–8] відзначено, що інтенсифікація видобутку вугілля призводить до збільшення утворення вугільного пилу. Як наслідок, працівники вугільної промисловості

більш сприйнятливі до пневмоконіозу, а ймовірність вибухів у вугільних шахтах також зростає [9–10]. Пил, що утворюється під час видобутку, становить значну загрозу для безпечного виробництва у вугільних шахтах і завдає незворотної шкоди здоров'ю працівників.

Набувають все більшого поширення цифрового моделювання дифузії запиленних потоків [14–15]. При цьому в роботі [15] розглядають газову фазу повітряного потоку і тверду фазу, тобто суспендовані тверді частинки в ньому, як окремі взаєпроникні середовища, а кожна фаза описується окремими рівняннями збереження маси й імпульсу [16]. У цьому дослідженні [15] використовуються емпіричні залежності опору газ – тверде тіло за моделлю опору GIDASPOW [15].

Зв'язку між витратою запиленого повітря та його розподілу в просторі присвячена робота [14]. За використання цифрового CFD моделювання та польових вимірювань як підтвердження розглянуто дисперсію частинок вугільного пилу залежно від різноманітних параметрів повітряного потоку. Автори [14] виявили оптимальний діапазон витрат запиленого потоку повітря в повністю механізованому забої за умови низької запиленості. Збільшення потоку повітря призводить до явища повторного захоплення пилу. У дослідженнях [14] використано метод Ейлера – Лагранжа для побудови математичної моделі для моделювання процесу дисперсії пилу в повітряному потоці, що відбувається на повністю механізованому вибої.

Пошуку оптимальної витрати пилогазового потоку з урахуванням мінімального вмісту пилу

під часу робіт присвячені й інші роботи. Зокрема, на підставі досліджень зв'язку між витратою повітряного потоку та рівнем його запиленості автори [17] виявили діапазон швидкості повітряного потоку, який можна використовувати як еталон для проєктування вентиляції в підземних розробках, як-от неугільні шахти та тунелі.

Розуміння гідродинаміки систем потоку газ – тверда речовина є важливим для проєктування й експлуатації пневматичних конвеєрів і сушарок із псевдозрідженим шаром, камер згоряння та реакторів, які часто використовуються в хімічній промисловості, ефективної роботи установок флюїдного каталітичного крекінгу (FCC) [15], а також підземних виробок [14].

Для опису структури пилогазового потоку і, як наслідок, розподілу твердих суспендованих частинок потрібний адекватний опис турбулентних явищ біля стінок.

Рух пилу в турбулентному потоці газу відрізняється складністю й інтенсивністю в усіх напрямках, оскільки суспендовані тверді частинки, якщо вони не дуже великі, реагують на безладні турбулентні пульсації середовища та разом із поступальним рухом із потоком здійснюють під їх впливом пульсаційний (коливальний) рух стосовно молей газу, який їх переносить, і також безладне переміщення разом із молями газу, що називається турбулентною дифузією частинок [18].

У роботі [15] відзначається, що прогнозування турбулентних потоків, обмежених стінками, має велике практичне значення і зазвичай базується на чисельному рішенні усереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є – Стокса. Точність чисельного моделювання залежить від опису характеристик турбулентної течії, тому потребує деталізації опису дифузії потоків у шарі поблизу стінок.

Результати моделювання перебігу дефляції пилогазового потоку після вибухових робіт у шахті представлені в роботі [12]. Програмне забезпечення Fluent використано дослідниками [12] для розрахунку поля газової фази, зокрема швидкості газу й об'єму сітки. Для вивчення дифузії частинок пилу (діаметром 0,1–100 мкм) після проведення вибухових робіт у виробці автори використали модель двофазного потоку газ – частинка на основі методу Монте-Карло.

Аналіз інформаційних джерел, присвячених розгляду руху твердих частинок в турбулентному потоці, показав [19–21], що існують дві головні рушійні сили турбулентного перенесення й осадження аерозольних частинок: турбулентна міграція і турбулентна дифузія частинок. У наявних дослідницьких роботах перша

рушійна сила майже не згадується. Порівняно з масштабом пульсацій газу дрібні тверді частинки пилу залучаються з тим чи іншим відставанням за фазою і амплітудою в пульсаційний рух газу і здійснюють разом із ним інтенсивне дифузійне переміщення по потоку. Крім того, з'являються ще дві специфічні форми руху частинок, що пов'язано з наявністю досить значних градієнтів усередненої швидкості газу і його пульсаційних складових у пристінній області потоку. Одна з форм – це поздовжнє ковзання частинок стосовно газу зі швидкістю, сумірною зі швидкістю його перебігу. Друга форма – це поперечна міграція частинок зі швидкістю, сумірною зі швидкістю турбулентних пульсацій газу. Виконані дослідження дали змогу отримати новий аналітичний опис розподілу значень швидкості радіальних пульсацій за поперечним перерізом турбулентного потоку в трубах і каналах. Згідно з дослідженнями, якщо домішки, які переносяться, не впливають на формування й розвиток пульсаційного поля, то їх розподіл по перетину гірничих виробок має слідувати тому ж закону, що і розподіл поздовжніх швидкостей пульсацій повітря, а не закону розподілу швидкостей руху повітря в перерізі потоку. У турбулентних потоках із малим насиченням його зваженими частинками (домішками) – близько 1 % за вагою до всієї поточної рідини – ця умова виконується. Крім того, зважені частинки повинні бути такого розміру, щоб присутність їх не знижувала величини енергії пульсації.

Дрібнодисперсна фаза пилу розміром менше ніж 10 мкм в атмосфері гірничих виробок повністю відповідає таким умовам, отже, розподіл часток по перетину виробок має підкорятися тим самим законам, що і розподіл швидкостей пульсацій повітря в гірничих виробках.

Таким чином, можна констатувати, що на цей час є важливі результати, накопичений теоретичний і експериментальний матеріал, що дає змогу більш повно розглянути процеси, які відбуваються з поширенням дрібнодисперсного пилу в гірничій виробці.

Матеріали та метод. <На зміну концентрації дрібнодисперсного пилу по довжині виробки у вентиляційному потоці має вплив процес турбулентного осадження пилу, що пов'язаний із його турбулентними характеристиками. Оцінка впливу цього процесу потрібна для визначення ефективності застосовуваних заходів і засобів зниження концентрації дрібнодисперсного пилу.

При вході в гірничу виробку та під час подальшого руху вентиляційного потоку з вмістом дрібнодисперсної фази пилу відбувається процес міграції дрібних зважених часток пилу

до поверхні виробки через різні механізми. Рух зважених дрібнодисперсних частинок пилу відбувається за двома формами: турбулентна дифузія і турбулентна міграція зважених частинок пилу [19–21]. Процес турбулентної дифузії має істотний вплив на турбулентне осадження частинок на поверхню гірничої виробки, але цей вплив опосередкований. Наявність процесу турбулентної дифузії лише сприяє наближенню дрібнодисперсних часток пилу в пристінну область потоку, а далі відбувається інерційний викид частинок у пристінній області турбулентного потоку, з несучих турбулентних вихорів у напрямку стінки. Поперечна міграція частинок до поверхні каналу здійснюється за моделлю Ландау – Хопфа [22], яка передбачає наявність процесу загасання турбулентності поблизу в'язкого підшару, внаслідок чого зважені частинки пилу, в силу вільного інерційного руху, продовжують свій рух у напрямку через в'язкий підшар до поверхні каналу.

На основі аналізу явища поперечної міграції зважених частинок дрібнодисперсного пилу до поверхні каналу [22] отримано відомий вираз для визначення швидкості поперечної турбулентної міграції частки зваженого пилу, що є основою турбулентного – інерційного осадження [19–22]:

$$u_i = -\frac{1}{2} \tau_p \frac{dw^2}{dy}, \quad (1)$$

де w – швидкість поперечних пульсацій середовища, м/с; y – поперечна координата, м; τ_p – час релаксації частинок пилу, що визначається за відомою формулою відповідно до закону Стокса [23–25]:

$$\tau_p = \frac{\rho_q d_q^2}{18\mu_c}, \quad (2)$$

де ρ_q – щільність частки, кг/м³; d_q – гідравлічний діаметр частки пилу, м; μ_c – динамічна в'язкість середовища, Па · с.

Вираз (2) дає змогу оцінити вплив інтенсивності турбулентного осадження на концентрацію дрібнодисперсного пилу у вентиляційному потоці.

Результати. Результати розрахунків швидкості турбулентної міграції з використанням формули (1) [19–21] свідчать про те, що частинки пилу, які повністю захоплюються турбулентними пульсаціями, мають прискорення в поперечному напрямку від 3 до 3000 разів більше, ніж прискорення вільного падіння (g). Тобто швидкість гравітаційного осадження може бути значно меншою, ніж швидкість поперечної міграції частинки пилу до поверхні гірничої виробки.

У реальних умовах турбулентного потоку рух зваженої частинки пилу має безліч періодичних вільних інерційних пробігів із випадковою частотою і амплітудою швидкості, які відбуваються спільно з турбулентними пульсаціями потоку, що в підсумку призводять до осадження частинки пилу на поверхню гірничої виробки.

Турбулентна дифузія має пульсаційний характер із безперервною зміною вектора і детермінованих сил (аеродинамічних, опору, гравітаційного осадження) з постійним модулем і напрямком, співвідношення яких різне для частинок різної маси, що визначається розміром часток і їх квазіщільністю (відношенням аеродинамічного активного об'єму частинки до її маси). Також на співвідношення сил впливають швидкість повітряного потоку або перші похідні координат за часом [24].

Аналіз руху аерозолі під дією детермінованих сил [24] дав змогу отримати критерій для поділу фракцій в аерозолях на дві групи:

$$g' = g - 0,393 \frac{c_p \rho_n d_q^2 v_{пов.у}^2}{m}, \text{ м/с}^2, \quad (3)$$

де c_p – коефіцієнт підйомної сили; ρ_n – щільність повітря, кг/м³; $v_{пов.у}$ – вертикальна складова швидкості повітря у виробці, м/с; d_q – діаметр частинки, м; m – маса матеріальної частинки.

Критерій (3) не змінюється за наявності сил дифузії і встановлює співвідношення тільки між детермінованими силами.

Згідно з критерієм (3) частинки пилу поділяються на дві категорії:

– турбулентно осаджені частинки, для яких сила ваги компенсується аеродинамічними силами, а прискорення, що надається частці підйомними аеродинамічними силами, більше або дорівнює прискоренню вільного падіння (g). При цьому з урахуванням напрямку вектора швидкості осадження результуюче прискорення осадження частинок $g^1 \leq 0$;

– частинки, на осадження яких впливає сила гравітації ($g^1 \geq 0$), тобто гравіметрично або турбулентно-гравіметрично осаджені фракції пилу.

Для частинок пилу, що перебувають у зваженому стані, тобто за $g^1 \leq 0$, маса частинок цих фракцій представлена монотонно спадною функцією, що не досягає нульових значень навіть на значній відстані від джерела пилу. Для швидкості потоку повітря $v_x = 0,77$ м/с до таких, що витають (тобто таких, що не осаджуються гравіметрично), належать частинки з наведеним діаметром менше за 7...8 мкм. Для частинки з $d < 7$ мкм сила ваги повністю компенсується підйомними аеродинамічними силами

і гравіметричне осадження таких частинок не відбувається [24].

Для визначення концентрації зваженого пилу для фракцій ≤ 10 мкм вплив детермінованих сил можна не враховувати у зв'язку з їх незначністю. У цьому випадку допускаємо, що фракції пилу менше ніж 10 мкм залучаються до процесу турбулентного осаджування. Для цих часток сила ваги повністю компенсується аеродинамічними силами, а прискорення, що надається часткам цими силами, більше або дорівнює прискоренню вільного падіння.

У вентиляційному потоці наявність турбулентної дифузії викликає процес безперервного обміну частками між елементарними об'ємами повітря, тому координата Y для довільної частинки імпульсивно змінюється як у бік зменшення, так і в бік збільшення [24]. Інтегрально дія сил турбулентної дифузії спрямована на вирівнювання концентрації дрібнодисперсного пилу в умовному обсязі повітря, у якому частки дрібних фракцій пилу розподіляються практично рівномірно. Маса осадженого пилу прямо пропорційна швидкості повітря. В умовах збільшення швидкості повітря зростає амплітуда турбулентних пульсацій і кількість дрібнодисперсного пилу, що виноситься в зону осадження, збільшується. Дрібнодисперсний пил, керований тільки силами дифузії, осідає більш інтенсивно зі зростанням швидкості повітря тому, що сили зчеплення частинок із поверхнею в діапазоні $v_{пов} < v_{кр}$ достатні для утримання турбулентно осадженого пилу.

Зміна концентрації по довжині виробки для турбулентно осадженого пилу в диференціальній формі описується рівнянням [24]:

$$\frac{dc_T}{c_T} = (-kv_x)dx, \quad (4)$$

де c_T – зміна концентрації зваженого дрібнодисперсного пилу по довжині виробки, що обумовлена явищем турбулентної дифузії, мг/м³; k – відношення маси зваженого дрібнодисперсного пилу в розглянутому елементарному обсязі виробки до маси осадженого пилу на одиницю площі.

На основі рішення рівняння (4) для двох довільних перетинів гірничої виробки, що розташовані на відстані Δx , отримано залежність зміни концентрації фракцій аерозолі, схильних до процесів тільки турбулентного осадження [24]:

$$c_T(x) = c_0 \exp(-k\Delta xv_x), \quad (5)$$

де c_0 – концентрація пилу в початковій точці, мг/м³.

Рівняння (5) характеризує процес убування концентрації дрібнодисперсного зваженого

пилу, коли для розглянутих розмірів частинок $g^1 < 0$. Коефіцієнт k в рівнянні (5) визначає ступінь захоплення частки пульсаціями газу й характеризує ступінь зниження концентрації дрібнодисперсного зваженого пилу на ділянці (Δx) гірничої виробки. Коефіцієнт k виконує роль деякого інтегрального кореляційного показника, який враховує властивості дисперсійного середовища й геометричні параметри виробки, що впливають на вентиляційний потік.

Якщо уявити, що дифузійний рух зважених частинок у турбулентному потоці це як дифузійний рух аерозольної рідини, частинки якої мають у k_d раз менший крок, ніж частинки турбулізованої рідини, справедливе співвідношення Лонгуелла – Вайса:

$$D_d = k_d^2 D_T.$$

Параметр k_d^2 (квадрат середнього ступеня захоплення частинок) визначається з формули Фрідлендера:

$$k_d^2 = \frac{1}{1 + \omega_E \tau_p},$$

де ω_E – частота енергоємних пульсацій, с⁻¹.

Частоту енергоємних пульсацій можна визначити з виразу [19–22]:

$$\omega_E = \frac{u_*}{0,05 \cdot d_e}, \quad (6)$$

де u_* – динамічна швидкість повітряного потоку (швидкість тертя), м/с; d_e – еквівалентний діаметр виробки, м.

Динамічна швидкість є мірою інтенсивності турбулентного пульсаційного руху.

Для умов гірничої виробки динамічну швидкість тертя, засновану на встановленні дотичної напруги та коефіцієнта гідравлічного опору, розраховуємо з використанням рівняння балансу сил $\Delta p S = \tau_{cm} F$:

$$u_* = \sqrt{\frac{\Delta p S}{\rho F}}, \quad (7)$$

де Δp – перепад тиску на ділянці виробки; S – площа поперечного перерізу виробки, м²; F – поверхня виробки, м²; Δp записано у формі вираження Дарсі – Вейсбаха.

Для частинок, зважених у турбулентному потоці, представленому як дифузійний рух аерозольної рідини, можна використати закон дифузії Фіка [19–22], згідно з яким дифузійний потік зважених частинок через поверхню, що розглядається, пропорційний коефіцієнту дифузії і градієнту вагової або лічильної концентрації пилових частинок:

$$j = -D_d \frac{dc}{dx}. \quad (8)$$

Закон конвективної дифузії частинок у загальному випадку, за постійному D_d і стані, що встановився, та з урахуванням (1), має такий вигляд [19–22]:

$$u_x \frac{dc}{dx} + u_y \frac{dc}{dy} + u_z \frac{dc}{dz} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_d \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_d \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_d \frac{\partial c}{\partial z} \right)$$

або після нескладних перетворень:

$$u_x \frac{dc}{dx} + u_y \frac{dc}{dy} + u_z \frac{dc}{dz} = D_d \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right), \quad (9)$$

де c – концентрація частинок; u_x , u_y , u_z – швидкості руху суцільної фази уздовж координат x , y і z відповідно.

Оскільки довжина виробки на кілька порядків більше за її діаметр, то можна звести тривимірну задачу (9) до одновимірної і розглядати зміну концентрацій частинок тільки по горизонтальній координаті ox , тобто від входу суміші до виходу. Тоді рівняння (9) матиме такий вигляд [19–22]:

$$u_x \frac{dc}{dz} = D_d \left(\frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right). \quad (10)$$

Завдання граничних умов для двофазного потоку на стінці до рівняння (10) є надто складним, тому в цьому випадку використовуємо підхід, коли вплив перенесення дисперсної фази до поверхні гірничої виробки в рівнянні переносу враховується у вигляді об'ємного джерела маси [26].

Структура двофазних потоків визначається розмірами та розподілом елементів дисперсної фази в суцільній, що мають спільну межу розділу. Для опису таких систем застосовуються моделі гомогенної течії, роздільної течії фаз, потоку дрейфу тощо. Рух аерозолів характеризується практично однорідним розподілом дисперсної фази, тому далі використаний відомий підхід, коли перенесення дисперсної фази до стінки враховується у вигляді об'ємного джерела маси.

Загалом джерело маси записується в такий формі:

$$r = \frac{M}{V} = \frac{jF}{V}.$$

Локальний потік маси (8) можна записати в такий формі:

$$j = u_t c. \quad (11)$$

Вираз (11) – це аналог рівняння масовіддачі:

$$j = \beta \Delta c,$$

де β – коефіцієнт масовіддачі, м/с; Δc – рушійна сила масовіддачі (різниця концентрацій в ядрі потоку та на поверхні).

Звідси випливає, що для процесу осадження дрібнодисперсних часток пилу $u_t = \beta_d$.

Швидкість турбулентного осадження частинок є мірою інтенсивності осадження частинок із турбулентного потоку газу на стінки. Під нею мається на увазі кількість частинок (вагове або чисельне), що осідають з аерозольного потоку на 1 м² поверхні стінки за 1 с, віднесене до одиничної (за вагою або числом) концентрації частинок [19–22].

З урахуванням вищевикладеного підходу рівняння (10) набуде вигляду:

$$u_x \frac{dc}{dz} = D_d \left(\frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right) + u_t c(z) \alpha, \quad (12)$$

де y – поперечна координата до стінки каналу, м; u_t – знаходимо з використанням логарифмічного профілю швидкості; α – питома поверхня, м²/м³.

Граничні умови рівняння (12): $z = 0$; $c = c_0$; $z = H$; $\partial c / \partial z = 0$; $y = 0$; $\partial c / \partial y = 0$.

Це рівняння справедливе для стаціонарного процесу і не враховує вхідну ділянку гідродинамічної стабілізації.

Рівняння (12) вирішується чисельним методом із відповідними граничними та початковими умовами. З рішення виходить профіль концентрації частинок за довжиною каналу та концентрація на виході c_b .

Частку осілих слабо інерційних часток можна виразити величиною ефективності турбулентного осадження [19–22]:

$$n_t = 1 - \exp \left(-4 \frac{L u_t}{d_b u_{сеп}} \right), \quad (13)$$

де L – довжина гірничої виробки, м; u_t – швидкість турбулентного осадження частинок, м/с; $u_{сеп}$ – середня швидкість газу в каналі, м/с.

Для визначення u_t використовуємо узагальнений вираз [19–22]:

$$u_t = 7,25 \cdot 10^{-4} u_* \left(\frac{\tau_+}{1 + \omega_E \tau_+} \right)^2, \quad (14)$$

де τ_+ – безрозмірний час релаксації, $\tau_+ = \tau_p u_*^2 / \nu_r$; ν_r – коефіцієнт кінематичної в'язкості газу, м²/с; f – частота турбулентних пульсацій середовища, с⁻¹.

З урахуванням (6), (14), (7) і того, що $\tau_+ = \tau_p / \nu_r$, вираз (13) набуде вигляду:

$$n_t = 1 - \exp \left[- \frac{2,9 \cdot 10^{-3} \cdot L \tau_p^2}{d_e u_{cep} v_r^2 \left(1 + 20 \frac{\tau_p}{d_e} \sqrt{\frac{\Delta p S}{\rho F}} \right)^2} \left(\frac{\Delta p S}{\rho F} \right)^{2,5} \right].$$

З урахуванням (2):

$$n_t = 1 - \exp \left[- \frac{9 \cdot 10^{-5} L d_q^4}{d_e u_{cep} v_r^4 \left(1 + 1,1 \cdot \frac{d_q^2}{d_e v_r} \sqrt{\frac{\Delta p S}{\rho F}} \right)^2} \left(\frac{\Delta p S}{\rho F} \right)^{2,5} \right]. \quad (15)$$

Оскільки густина повітря (ρ_0) для стандартних умов дорівнює $1,2 \text{ кг/м}^3$, а кінематична в'язкість повітря (ν) дорівнює $14,91 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, вираз (15) можна представити як:

$$n_t = 1 - \exp \left[- \frac{460 \cdot L d_q^4}{d_e u_{cep} \left(1 + 68,03 \cdot 10^3 \cdot \frac{d_q^2}{d_e} \sqrt{\frac{\Delta p S}{F}} \right)^2} \left(\frac{\Delta p S}{F} \right)^{2,5} \right]. \quad (16)$$

З виразу (16) видно, що під час руху вентиляційного потоку на осадження дрібнодисперсного пилу впливають такі чинники:

- геометричні параметри гірничої виробки (L, S, F і d_e);
- аеродинамічні параметри вентиляційного потоку ($\Delta p, u_{cep}$).

Розрахунки, виконані за виразом (16) для дрібнодисперсного пилу $d < 10 \text{ мкм}$, для значень параметрів $S = 12 \text{ м}^2$, $L = 800 \text{ м}$, $\Delta p = 600 \text{ Па}$, $u_{cep} = 0,5 \text{ м/с}$, свідчать про те, що частина дрібнодисперсного пилу, осадженого по всій довжині тупикової виробки, не перевищує 4 %. На основі виконаних розрахунків можна зробити висновок, що інтенсивність турбулентного осадження дрібнодисперсного пилу розміром менше за 10 мкм має низький рівень впливу на зміну концентрації пилу цієї фракції по довжині тупикової виробки.

Висновки. За результатами аналітичних досліджень можна зробити такі висновки:

1. Майже весь (до 96 %) дрібнодисперсний пил розміром менше ніж 10 мкм виноситься вентиляційним потоком із тупикової виробки і далі, розповсюджуючись по всій шахтній вентиляційній мережі, виводиться на поверхню, впливаючи тим самим як на якість рудникової атмосфери, так і на екологічний стан поверхні.

2. У зв'язку з вищевказаним виникає потреба в розробці способів і засобів зниження кількості дрібнодисперсної фази пилу під час виконання прохідницьких робіт.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Zhou W., Wang H., Zhang J., He F., Liu J., Wang D. A novel method for reducing the amount of dust produced by roadheaders based on the numerical simulation of coal breakage. *Fuel*. 2023. Vol. 343. 127978. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127978>
2. Березюк О.В., Гринчак Н.М., Спрут О.В., Березюк В.О. Удосконалення математичної моделі впливу викидів дрібнодисперсного пилу на захворюваність хворобами системи кровообігу. *Наукові праці ВНТУ*. 2023. № 1. URL: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/674/638> (дата звернення: 02.12.2024).
3. Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe. European Parliament and the Council: official website. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/document.html?id_doc=60074 (дата звернення: 02.12.2024).
4. Ambient air pollution: a global assessment of exposure and burden of disease. *World Health Organization*. Switzerland, Geneva: WHO Document Production Services, 2016. 121 p. URL: <https://iris.who.int/handle/10665/250141> (дата звернення: 02.12.2024).
5. Ma Q., Nie W., Yang S., Xu C., Peng H., Liu Z., Guo C., Cai X. Effect of spraying on coal dust diffusion in a coal mine based on a numerical simulation. *Environmental Pollution*. 2020. Volume 264. 114717. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114717>
6. Regulatory Impact Analysis for the Final Revisions to the National Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter. Planning and Standards Health and Environmental Impacts. № EPA-452/R-12-005. *U.S. Environmental Protection Agency Office of Air Quality*. 2013. 474 p. URL: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/P100G5UO.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=2011+Thru+2015&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File=D%3A%5Czyfiles%5CIndex%20Data%5C11thru15%5Ctxt%5C00000006%5CP100G5UO.txt&User=ANONYMOUS&Password=anonymous&SortMethod=h%7C-&MaximumDocuments=1&FuzzyDegree=0&ImageQuality=r75g8/r75g8/x150y150g16/i425&Display=hpfr&DefSeekPage=x&SearchBack=ZyActionL&Back=ZyActionS&BackDesc=Results%20page&MaximumPages=1&ZyEntry=1&SeekPage=x&ZyPURL#> (дата звернення: 02.12.2024).

7. Liu Q., Nie W., Hua Y., Peng H., Ma H., Yin S., Guo L. Long-duct forced and short-duct exhaust ventilation system in tunnels: Formation and dust control analysis of pressure ventilation air curtain. *Process Safety and Environmental Protection*. 2019. Vol. 132. Pages 367–377. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.10.012>
8. Nie W., Wei W., Ma X., Liu Y., Peng H., Liu Q. The effects of ventilation parameters on the migration behaviors of head-on dusts in the heading face. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2017. Vol. 70. P. 400–408. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2017.09.017>
9. Finkelman R. B., Tian L. The health impacts of coal use in China. *International Geology Review*. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1080/00206814.2017.1335624>
10. Kampa M., Castanas E. Human health effects of air pollution. *Environmental Pollution*. 2008. Vol. 151. Iss. 2. P. 362–367. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.06.012>
11. Matzenbacher C. A., Garcia A. L. H., Santos M. S., Nicolau C. C., Premoli S., Corrêa D. S., Souza C. T., Niekraszewicz L., Dias J. F., Delgado T. V., Kalkreuth W., Grivicich I., Silva J. DNA damage induced by coal dust, fly and bottom ash from coal combustion evaluated using the micronucleus test and comet assay in vitro. *Journal of Hazardous Materials*. 2017. Vol. 324. Part B. P. 781–788. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.11.062>
12. Hu S., Feng G., Ren X., Xu G., Chang P., Wang Z., Zhang Y., Li Z., Gao Q. Numerical study of gas–solid two-phase flow in a coal roadway after blasting. *Advanced Powder Technology*. 2016. Vol. 27. Iss. 4. P. 1607–1617. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apt.2016.05.024>
13. Про затвердження Правил безпеки у вугільних шахтах. НПАОП 10.0-1.01-10 : наказ Державного комітету України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду від 22.03.2010 № 62. Дата оновлення: 02.06.2023. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0398-10#Text> (дата звернення: 02.12.2024).
14. Cai P., Nie W., Chen D., Yang S., Liu Z. Effect of air flowrate on pollutant dispersion pattern of coal dust particles at fully mechanized mining face based on numerical simulation. *Fuel*. 2019. Vol. 239. P. 623–635. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.11.030>
15. Nazif H. R., Tabrizi H. B. Development of boundary transfer method in simulation of gas–solid turbulent flow of a riser. *Applied Mathematical Modelling*. 2013. Vol. 37. Iss. 4. P. 2445–2459. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2012.05.030>
16. Soo S. L., Ihrig H. K., Jr., El Kouh A. F. Experimental Determination of Statistical Properties of Two-Phase Turbulent Motion. ASME. J. Basic Eng. September 1960. No. 82 (3). P. 609–621. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.3662677>
17. Xiu Z., Nie W., Yan J., Chen D., Cai P., Liu Q., Du T., Yang B. Numerical simulation study on dust pollution characteristics and optimal dust control air flow rates during coal mine production. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 248. P. 119197. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119197>
18. Батлук В. А., Проскуріна І. В., Батлук В. В. Математична модель руху двофазного потоку в пристроях очищення запиленого потоку в технологіях машинобудування. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. 2010. С. 87–93. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/0b866681-6a94-487e-bb72-392cdf360c97/content> (дата звернення: 02.12.2024).
19. Cooper C. D., Alley F. C. Air Pollution Control: A Design Approach. Fourth edition. Long Grove (IL): Waveland press, 2011. XVI. 839 p. URL: https://www.academia.edu/34689148/Air_Pollution_Control_A_Design_Approach (дата звернення: 02.12.2024).
20. Колесник В. Є., Павличенко А. В. Методи оцінки екологічної небезпеки експлуатації і ліквідації вугільних шахт та напрямки і засоби її зниження : монографія Дніпро : Літограф, 2017. 208 с.
21. Юрченко А. А. Підвищення екологічної безпеки масових вибухів в залізрудних кар'єрах за пиловим чинником : дис. ... канд. тех. наук : 21.06.01. Дніпро, 2012. 161 с.
22. Кілочицька Т. Розвиток теорії турбулентності та нелінійна динаміка (1940–1990). *Наука та наукознавство*. 2024. Вип. 2 (112). С. 137–153. DOI: <https://doi.org/10.15407/sofs2021.02.137>
23. Cecala A. B. Dust Control Handbook for Industrial Mineral Mining and Processing / A. B. Cecala, A. D. O'Brien, J. F. Colinet and others. Pittsburgh-Spokane: NIOSH, 2012. 314 p.
24. Основи теорії примежового шару : навч. посіб. / А. А. Халатов, Є. В. Мочалін, Н. Ф. Дмитрієва. КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 191 с.
25. Технологія та обладнання захисту атмосфери : методичні вказівки до виконання курсових проєктів з курсу / Укл. О. І. Іваненко. Київ : ТОВ «Інфодрук», 2012. 107 с.
26. Chiesa G. Particulate separation from gas streams by means of liquid film in annular two-phase climbing flow. *Chem. Eng. Sci.*, 1974. Vol. 29, № 10. P. 1139–1146.

REFERENCES:

1. Zhou, W., Wang, H., Zhang, J., He, F., Liu, J., & Wang, D. (2023). A novel method for reducing the amount of dust produced by roadheaders based on the numerical simulation of coal breakage. *Fuel*, 343, 127978. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127978>
2. Bereziuk, O. V., Hrynychak, N. M., Sprut, O. V., & Bereziuk, V. O. (2023). Udoskonalennia matematychnoi modeli vplyvu vykydiv dribnodispersnoho pylu na zakhvoriuvanist khvorobamy systemy krovoobihu [Improvement of the mathematical model of the impact of fine dust emissions on the incidence of circulatory system diseases]. *Naukovi pratsi VNTU*, 1. Retrieved from: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/674/638> (date of access: 02.12.2024) [in Ukrainian].
3. Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe. European Parliament and the Council: official website. Retrieved from: https://online.budstandart.com/ua/catalog/document.html?id_doc=60074 (date of access: 02.12.2024).
4. Ambient air pollution: a global assessment of exposure and burden of disease. *World Health Organization*. Switzerland, Geneva: WHO Document Production Services, 2016. 121 p. Retrieved from: <https://iris.who.int/handle/10665/250141> (date of access: 02.12.2024).
5. Ma, Q., Nie, W., Yang, S., Xu, C., Peng, H., Liu, Z., Guo, C., & Cai, X. (2020). Effect of spraying on coal dust diffusion in a coal mine based on a numerical simulation. *Environmental Pollution*, 264, 114717. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114717>
6. Regulatory Impact Analysis for the Final Revisions to the National Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter. Planning and Standards Health and Environmental Impacts. № EPA-452/R-12-005. *U.S. Environmental Protection Agency Office of Air Quality*. 2013. 474 p. Retrieved from: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/P100G5UO.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=2011+Thru+2015&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File=D%3A%5Czyfiles%5CIndex%20Data%5C11thru15%5CTxt%5C00000006%5CP100G5UO.txt&User=ANONYMOUS&Password=anonymous&SortMethod=h%7C-&MaximumDocuments=1&FuzzyDegree=0&ImageQuality=r75g8/r75g8/x150y150g16/i425&Display=hpfr&DefSeekPage=x&SearchBack=ZyActionL&Back=ZyActionS&BackDesc=Results%20page&MaximumPages=1&ZyEntry=1&SeekPage=x&ZyPURL#> (date of access: 02.12.2024).
7. Liu, Q., Nie, W., Hua, Y., Peng, H., Ma, H., Yin, S., & Guo, L. (2019). Long-duct forced and short-duct exhaust ventilation system in tunnels: Formation and dust control analysis of pressure ventilation air curtain. *Process Safety and Environmental Protection*, 132, 367–377. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.10.012>
8. Nie, W., Wei, W., Ma, X., Liu, Y., Peng, H., & Liu, Q. (2017). The effects of ventilation parameters on the migration behaviors of head-on dusts in the heading face. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 70, 400–408. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2017.09.017>
9. Finkelman, R. B., & Tian, L. (2017). The health impacts of coal use in China. *International Geology Review*. DOI: <https://doi.org/10.1080/00206814.2017.1335624>
10. Kampa, M., & Castanas, E. (2008). Human health effects of air pollution. *Environmental Pollution*, 151 (2), 362–367. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.06.012>
11. Matzenbacher, C. A., Garcia, A. L. H., Santos, M. S., Nicolau, C. C., Premoli, S., Corrêa, D. S., Souza, C. T., Niekraszewicz, L., Dias, J. F., Delgado, T. V., Kalkreuth, W., Grivicich, I., & Silva, J. (2017). DNA damage induced by coal dust, fly and bottom ash from coal combustion evaluated using the micronucleus test and comet assay in vitro. *Journal of Hazardous Materials*, 324 (B), 781–788. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.11.062>
12. Hu, S., Feng, G., Ren, X., Xu, G., Chang, P., Wang, Z., Zhang, Y., Li, Z., & Gao, Q. (2016). Numerical study of gas–solid two-phase flow in a coal roadway after blasting. *Advanced Powder Technology*, 27(4), 1607–1617. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.appt.2016.05.024>
13. Pro zatverdzhennia Pravyl bezpeky u vuhilnykh shakhtakh. NPAOP 10.0-1.01-10: nakaz Derzhavnoho komitetu Ukrainy z promyslovoi bezpeky, okhorony pratsi ta hirnychoho nahliadu vid 22.03.2010 № 62 [On Approval of Safety Rules in Coal Mines. NPAPP 10.0-1.01-10: Order of the State Committee of Ukraine on Industrial Safety, Labor Protection and Mining Supervision of 22.03.2010 No. 62]. Data onovlennia: 02.06.2023. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0398-10#Text> (date of access: 02.12.2024) [in Ukrainian].
14. Cai, P., Nie, W., Chen, D., Yang, S., & Liu, Z. (2019). Effect of air flowrate on pollutant dispersion pattern of coal dust particles at fully mechanized mining face based on numerical simulation. *Fuel*, 239, 623–635. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.11.030>.
15. Nazif, H. R., & Tabrizi, H. B. (2013). Development of boundary transfer method in simulation of gas–solid turbulent flow of a riser. *Applied Mathematical Modelling*, 37(4), 2445–2459. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2012.05.030>.

16. Soo, S. L., Ihrig, H. K., Jr., El, & Kouh A. F. (1960). Experimental Determination of Statistical Properties of Two-Phase Turbulent Motion. *ASME. J. Basic Eng.*, 82 (3), 609–621. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.3662677>
17. Xiu, Z., Nie, W., Yan, J., Chen, D., Cai, P., Liu, Q., Du, T., & Yang, B. (2020). Numerical simulation study on dust pollution characteristics and optimal dust control air flow rates during coal mine production. *Journal of Cleaner Production*, 248, 119197. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119197>
18. Batluk, V. A., Proskurina, I. V., & Batluk, V. V. (2010) Matematychna model rukhu dvofaznoho potoku v prystroiakh ochyshchennia zapylenoho potoku v tekhnolohiiakh mashynobuduvannia [Mathematical model of two-phase flow in devices for cleaning dusty flow in mechanical engineering technologies]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy "Kyivskiy politekhnichnyi instytut"*, 87–93. Retrieved from: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/0b866681-6a94-487e-bb72-392cdf360c97/content> (date of access: 02.12.2024) [in Ukrainian].
19. Cooper, C. D., & Alley, F. C. (2011). *Air Pollution Control: A Design Approach*. Fourth edition. Long Grove (IL): Waveland press, XVI, 839 p. Retrieved from: https://www.academia.edu/34689148/Air_Pollution_Control_A_Design_Approach (date of access: 02.12.2024).
20. Kolesnyk, V. Ye., & Pavlychenko, A. V. (2017). Metody otsinky ekolohichnoi nebezpeky ekspluatatsii i likvidatsii vuhilnykh shakht ta napriamy i zasoby yii znyzhennia [Methods for assessing the environmental hazards of coal mines operation and abandonment and ways and means of its reduction]. *Monohr. Dnipro : Litohraf*, 208 p. [in Ukrainian].
21. Yurchenko, A. A. (2012). Pidvyshchennia ekolohichnoi bezpeky masovykh vybukhiv v zalizorudnykh karierakh za pylovym chynnykom [Increasing the environmental safety of mass explosions in iron ore quarries by the dust factor]. *Candidate's thesis*, 21.06.01. Dnipro, 161 p. [in Ukrainian].
22. Kilochytska, T. (2024). Rozvytok teorii turbulentnosti ta nelineina dynamika (1940–1990) [Development of the theory of turbulence and nonlinear dynamics (1940–1990)]. *Nauka ta naukoznavstvo*, 2(112), 137–153. DOI: <https://doi.org/10.15407/sofs2021.02.137> [in Ukrainian].
23. Cecala, A. B., O'Brien A. D., Colinet J. F. & others (2012). *Dust Control Handbook for Industrial Mineral Mining and Processing*. Pittsburgh-Spokane: NIOSH, 2012. 314 p.
24. Khalatov, A. A., Mochalin, Ye. V., & Dymytrieva N. F. (2019). *Osnovy teorii prymezhovoho sharu* [Fundamentals of boundary layer theory]: navch. posib. Kyiv : KPI im. Ihoria Sikorskoho, 191 p. [in Ukrainian].
25. Ivanenko, O. I. (2012). *Tekhnolohiia ta obladnannia zakhystu atmosfery* [Technology and equipment of atmospheric protection]: metodychni vkazivky do vykonannia kursovykh proektiv z kursu / Ukl. O. I. Ivanenko. Kyiv: TOV "Infodruk", 107 p. [in Ukrainian].
26. Chiesa, G. (1974). Particulate separation from gas streams by means of liquid film in annular two-phase climbing flow. *Chem. Eng. Sci.*, 29, 10, 1139–1146.