

© Ю. І. Чеберячко¹, О.А. Муха¹, О.О. Шустов¹, О.В. Беднюк

¹ Національний технічний університет “Дніпровська політехніка”, м. Дніпро, Україна

АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ УТВОРЕННЯ ТА ПОШИРЕННЯ ПИЛУ ПРИ РОБОТІ ПРОХІДНИЦЬКОГО КОМБАЙНА В ТУПИКОВІЙ ВИРОБЦІ

© Yu. Cheberyachko¹, O. Mukha¹, O. Shustov¹, O. Bednyuk

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

ANALYSIS OF THE PROCESSES OF DUST FORMATION AND SPREAD DURING THE OPERATION OF A MINING COMBINE HARVESTER IN A DEAD-END PRODUCTION

Мета. Розробка математичної моделі процесу пилоутворення при відбійці гірських порід виконавчим органом прохідницького комбайна, що дозволяє визначати розподіл фракцій пилу за перерізом та довжиною гірничої виробки залежно від швидкості руху вентиляційного потоку, а також відстані в мережі гірничих виробок, на яких осаджуються різні фракції пилу.

Методика досліджень. У роботі використано аналітичні методи - для дослідження процесів утворення та поширення пилу при роботі комбайна; методи математичного моделювання – для розробки моделей розподілу вуглепородного пилу у привибійному просторі.

Результати досліджень. Встановлено механізм пилоутворення під час роботи комбайнів вибіркової дії, що дозволяє оцінити вплив динамічних характеристик повітряних потоків у привибійному просторі на рівень запиленості рудникової атмосфери та встановити взаємозв'язок запиленості повітря та режиму роботи комбайна.

Розроблено математичну модель пилоутворення при роботі комбайна, що дозволяє визначати критичні параметри повітряного потоку, що впливають на характеристики поширення дрібнодисперсного пилу.

Наукова новизна. Розроблено та теоретично обґрунтовано математичну модель формалізованого опису процесу утворення та поширення пилу при руйнуванні масиву гірських порід виконавчим органом комбайна, яка відрізняється від відомих тим, що враховує явище формування спрямованих повітряних течій у потоці гірничої маси за рахунок динамічної взаємодії падаючих частинок з повітрям.

Практична значимість. Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що отримана математична модель процесу утворення та розповсюдження пилу при руйнуванні масиву гірських порід комбайном дозволяє визначити оптимальні місця встановлення пиловловлюючого обладнання для його ефективного використання, а також оптимальні точки контролю концентрації пилу.

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

Постановка задачі. На вугільних шахтах України питомий обсяг комбайнової проходки виробок постійно зростає і головним чином за рахунок змішаних та суто породних вибоїв, для чого створюються прохідницькі комбайни та комплекси підвищеної енергоозброєності та продуктивності.

Понад 95 % від усього комбайнового парку складають комбайни вибіркової дії зі стрілоподібним виконавчим органом. Для комбайнів цього типу характерне

значне подрібнення гірської маси, яка відбивається, що супроводжується високою запиленістю повітря, яка без засобів боротьби з пилом може досягати 5000 мг/м^3 і більше [1]. При цьому слід зазначити, що запиленість повітря обумовлюється рядом факторів, а саме:

- інтенсифікацією проведення підготовчих виробок за рахунок застосування високопродуктивних комбайнів;
- переходом гірничих робіт на більш глибокі горизонти, у зв'язку з чим зменшується природна вологість гірського масиву [2];
- більш активним проявом сил гірського тиску на великих глибинах, під дією яких вугільні пласти і гірські породи, що вміщують вугільний пласт, руйнуються до початку виїмки, при цьому схильність їх до пилоутворення значно підвищується [3].

Порушення технології ведення гірничих робіт, невчасне забезпечення засобами індивідуального та колективного захисту підвищують загрозу заподіяння шкоди життю та здоров'ю гірників.

Загальну картину розподілу концентрації пилу за перерізом підготовчої виробки під час її провітрювання та при роботі комбайна слід розглядати як результат поєднання пилових потоків, обумовлених кількома джерелами пилу, основними з яких є:

- руйнування масиву гірських порід виконавчим органом комбайна;
- навантаження гірської маси на скребковий конвеєр комбайна;
- перевантаження гірської маси зі скребкового конвеєра комбайна у вагонетку або на конвеєр;
- утворення пилу за всією довжиною виробки при транспортуванні гірської маси;
- запиленість повітря, що подається для провітрювання виробки.

При руйнуванні масиву гірських порід виконавчим органом комбайна кількість пилу, що виділяється, складається з пилу, що знаходилася в пласті до його розробки, і пилу, що утворюється в результаті руйнування вугілля різцем виїмкової машини. Пил, що є в пласті, який зазвичай називають «пилом ковзання», утворюється в результаті прояву тектонічних сил і внаслідок перерозподілу напружено-деформаційного стану масиву в зоні впливу гірничих робіт. Найбільша кількість пилу ковзання знаходиться в зонах, що зазнали підвищеного гірського тиску, в результаті якого відбувається утворення нових тріщин та зміщення окремих елементів пласта відносно один одного [4].

Основною задачею роботи є аналіз фізичних процесів пилоутворення при роботі прохідницького комбайна в тупиковій гірничій виробці, розподілу фракцій пилу в привибійній частині тупикової виробки та її поширення в мережі гірничих виробок.

Аналіз останніх досліджень. Дослідження процесів утворення та поширення аерозолів у гірничих виробках є основним завданням при розробці ефективних засобів та заходів щодо боротьби з пилом. Знання розподілу концентрації пилу за перерізом підготовчої виробки при її провітрюванні під час роботи комбайна дозволяють розраховувати не тільки оптимальні параметри вентиляційних

потоків, а й визначити раціональні місця встановлення пиловловлюючого обладнання, а також точки контролю концентрації пилу [5–7].

Теоретичним та експериментальним дослідженням динаміки аерозолів присвячено низку робіт видатних учених: О.О. Скочинського, Л.І. Барона, В.М. Вороніна, Л.Д. Вороніна, В.І. Дремової, Б.Ф. Кіріна, А.І. Ксенофонтової, А.С. Бурчакова, В.В. Кудряшова, К.П. Меднікова, П.І. Мустеля, П.М. Петрухіна, С.Б. Романченка, А.А. Трубіцина, М.А. Фукса та багато інших.

Найважливішим показником вентиляційного потоку є його здатність до транспортування, що забезпечує ефективний винос пилу. Вперше питання про рух пилових частинок у пило-повітряних потоках у виробках вугільних шахт розглянуто у роботах В.Н. Вороніна. Незважаючи на те, що чисельні коефіцієнти, які використовуються у роботі, не мають достатнього рівня точності, наведені у ній формули достовірно відображають процеси підйому та винесення аерозолів у гірничих виробках [8]. А також, подібні питання розглядалися у роботах Г.І. Баренблатта, М.А. Фукса, окрім того, подібні залежності були отримані наукових рудничного пилу – В.В. Дьякова, В.В. Скобунова, А.К. Красноштейна.

Дослідження динаміки утворення пилових частинок розвивалися цими вченими в наступних напрямках: поглиблення уявлень про елементарні процеси, що відбуваються з частинками пилу при їх русі в гірничій виробці; їх експериментальне вивчення; аналіз масових пилових процесів; спроби створення теорії поширення пилу в гірничій виробці з урахуванням низки факторів, що його супроводжують; дослідження процесу розповсюдження пилу.

Проте питання про рух пилових частинок у турбулентних потоках по суті практично дотепер не вирішене. Існуючі в даний час гіпотези які не можуть пояснити процеси, пов'язані з підйомом і винесенням аерозолів, отже, майбутні дослідження повинні направлені на опис процесу поширення пилу з урахуванням низки факторів при їх русі в гірничій виробці.

У результаті дослідження динаміки аерозолів у гірничих виробках та визначення характеристик руху зважених частинок у турбулентному потоці можливе на підставі загальних рівнянь механіки турбулентного руху багатокомпонентних середовищ. Однак на даний час це питання недостатньо досліджено і при розгляді явищ руху аерозолів на основі вирішення системи диференціальних рівнянь у більшості авторів має різний вигляд.

Недостатня вивченість складного механізму здійснення та осідання пилу призводить до якісного розходження теоретичних результатів з експериментальними даними. Причиною є те, що граничні умови при описі руху частинок в турбулентному потоці описуються рівняннями дифузії і не відображають реального процесу [9].

Теоретично найбільш досліджено питання щодо поведінки окремих пилових частинок при різних режимах вентиляційного потоку без урахування їх впливу на рух повітря та інших частинок. Досягнення в цій галузі зводяться або до визначення траєкторії переміщення окремих частинок, або до вивчення випадання з повітряного потоку під дією гравітаційних сил та обчислення на основі цієї дальності їх польоту [10].

Поряд з теоретичними та лабораторними дослідженнями фізичних основ процесу поширення пилу в гірничих виробках велика увага приділяється його вивченню методом тривимірного комп'ютерного моделювання [11], що дозволяє з достатньою точністю спрогнозувати стан рудникової атмосфери при зміні характеру пилоутворення при руйнуванні масиву порід виконавчим органом комбайна.

Подання основного матеріалу. Зруйнована, різцями виконавчого органу комбайна, порода опускається на ґрунт привибійного простору тупикової частини підготовчої виробки (рис. 1).

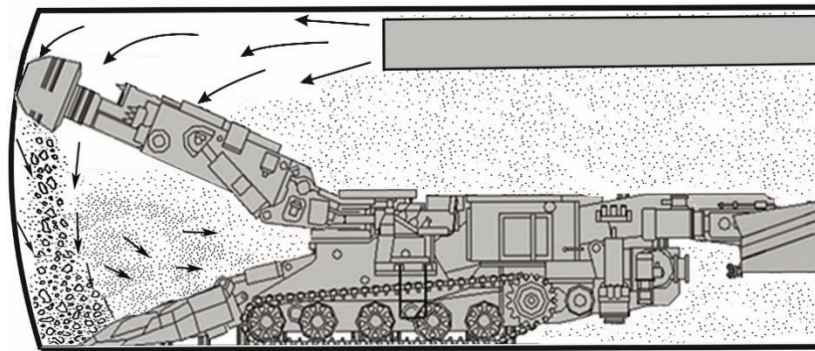


Рис. 1. Пилоутворення при відбиванні гірської маси та вільному її падінні на вантажний майданчик комбайна

При падінні гірської маси відбувається розшаровування часток за розмірами. Великі частинки мають більше прискорення та випереджають дрібні, тобто їх швидкість падіння визначається дією закону Стокса. При цьому відбувається взаємодія частинок одна з одною та з великими шматками.

При русі великих частинок і шматків руди попереду дрібних, на останні діють вихори, що утворюються за великими частинками і шматками. Тому у результаті створення деякого розрідження, що виникає за великими частинками, дрібні частинки захоплюються турбулентними вихорами і рухаються слідом за великими приблизно з подібною швидкістю. Поля швидкостей повітря, що захоплюється падаючими шматками, можуть накладатися один на одного і впливати на швидкість падіння і просторове положення дрібних частинок.

За певних умов дрібна фракція може вийти з-під впливу великих шматків і перейти у зважений стан. Однак у зважений стан переходять не всі частинки дрібних фракцій, а лише певна частина. Це зумовлено наявністю гідравлічної та механічної взаємодії між ними, у результаті якої відбувається не тільки захоплення дрібних частинок великими шматками, але й коагуляція та осадження їх на великих шматках.

Велику роль в переході дрібних частинок у зважений стан при падінні зруйнованої гірської маси грає явище формування спрямованих повітряних течій у повітряному потоці, який переміщується з дрібнодисперсними часточками гірської маси за допомогою динамічної взаємодії падаючих шматків породи [12, 13].

Розглядаючи механізм пилоутворення при падінні гірської маси, можна виділити три стадії, що послідовно змінюються одна за другою [14]:

- аерування вільно падаючого потоку гірничої маси;
- динамічна взаємодія потоку прискорено падаючих частинок з повітрям;
- виділення запиленого повітря, що ежектується, з потоку при укладанні частинок на перевантажувач.

Характерною особливістю першої стадії є розрив аутогезійних сил зчеплення між пиловими частинками в момент скидання потоку гірської маси. Починає формуватися аеродисперсна система – пиловий аерозоль [14].

Для другої стадії характерно те, що в процесі вільного падіння розрив конгломерату частинок посилюється в результаті динамічної взаємодії з повітрям та зіткнення з більшими частинками.

У третій стадії ежекційний потік повітря, що виникає, інтенсивно насичується пиловими частинками, і в момент контакту гірської маси з елементами комбайна, що обертаються, утворює струмінь запиленого повітря, що насталяється. На цій стадії відбувається, з одного боку, інерційна сепарація частинок і випадання їх на поверхню покладеного матеріалу, з іншого – здув дрібних частинок, що осіли, і винесення їх цим струменем в атмосферу привибійного простору виробки.

Кількість пилу, що переходить у зважений стан, залежить як від властивостей відбитої гірської маси (подрібненості, вологості тощо), так і від впливу зовнішнього середовища. Чим більший динамічний тиск повітряного потоку, тим більше пилових частинок переходить у зважений стан.

За певних умов інтенсивність винесення дрібних частинок може бути настільки значною, що збільшення витрати повітря призведе не до зниження, а до зростання концентрації пилу у виробці.

При руйнуванні гірської маси в атмосферу тупикових виробок потрапляє лише частина пилових частинок, що знаходилась у загальній гірській масі. Кількість залежить від способу виїмки, застосовуваного устаткування, типу комбайна. У деяких випадках, навіть при відбійці гірської маси одними й тими самими комбайнами в однакових породах і при однакових способах подавлення пилу, спостерігається різна інтенсивність пилоутворення. Таке явище можна пояснити впливом довкілля.

При зростанні швидкості повітряного потоку посилюється вплив аеродинамічних сил повітряного потоку на частинки, що вилітають з гірської маси. Чим більша швидкість вентиляційного струменя, тим більше великих частинок можуть перейти у зважений стан.

З вищесказаного випливає, що при відбійці, транспортуванні, навантаженні гірської маси та інших виробничих процесах, що відносяться до джерел безперервного виділення пилу, інтенсивність пилоутворення в виробці, що провітрюється, завжди більше, ніж у непровітрюваній.

При падінні гірської маси після її відбійки в результаті явища ежекції утворюються повітряні потоки, які переводять дрібнодисперсні частинки у зважений стан.

Проаналізуємо сили, що діють на пилову частинку (рис. 2):

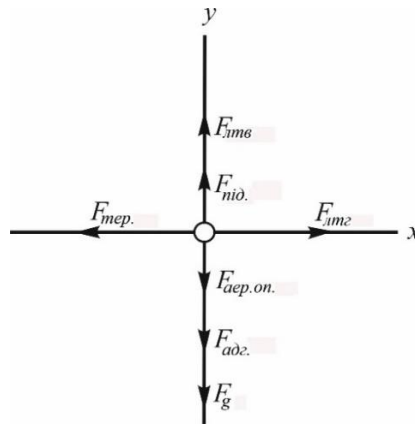


Рис. 2. Схема визначення сил, що діє на пилову частинку

1. Сила аеродинамічного опору повітря $F_{aep.on}$, (Н), яка перешкоджає руху частинки вгору визначається за виразом [15]

$$F_{aep.on} = 0,5\rho_g\xi v_q^2 S_M, \quad (1)$$

де ρ_g – густина повітря, кг/м³; v_q – швидкість частки, м/с; S_M – міделевий переріз частки, м²; ξ_l – коефіцієнт лобового опору, який залежить від числа Рейнольдса. Для стоксівських частинок $\xi = 24 / Re$. Для великих важких частинок та їх високим відносним швидкостей можна скористатися формулою [16]:

$$\xi = \frac{24}{Re} + \frac{4}{\sqrt[3]{Re}}, \quad Re = \frac{v_q d}{\nu} = \frac{\rho_B v_q d}{\mu},$$

де ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості повітря, м²/с; μ – динамічна в'язкість повітря; $\mu = 18,2 \cdot 10^{-6}$ Па; d – діаметр пилової частинки, м.

Після підстановки значень і нескладних перетворень вираз (1) для стоксівських частинок набуде вигляду:

$$F_{aep.on} = 3\pi\mu d v_q.$$

Сила аеродинамічного опору спрямована протилежно вектору швидкості руху частинки.

Оскільки початкова швидкість частинки дорівнює $v_q = v_0$, а кінцева після її зупинки у повітрі – $v_q = 0$, вважатимемо для простоти середню швидкість частинки, що дорівнює $v_q/2$. З урахуванням цього вираз (1) набуде вигляду:

$$F_{aep.on} = 3\pi\mu d \frac{v_q}{2}. \quad (2)$$

2. Сила тяжіння F_g спрямована проти вектору швидкості руху частинки і визначається за формулою [16]:

$$F_g = (\rho_q - \rho_g) \left(\frac{\tau d^3}{16} \right) \quad (3)$$

де ρ_q – густина частки, кг/м³.

У зв'язку з тим, що густина повітря дуже незначна в порівнянні з густиною частинки, то її можна не враховувати, отже, вираз (3) набуде вигляду:

$$F_g = \frac{\tau d^3}{16} \rho_c. \quad (4)$$

3. Під дією різниці тисків у повітрі (створеною падаючою гірською масою), що виникає за рахунок явища ежекції (захоплення додаткового повітря падаючою гірською масою), виникає сила лобового опору потоку, що ежектує $F_{лтв}$. Величина цієї сили збігається з напрямом вектора швидкості частинки і залежить від швидкості ежекційного потоку, яка визначається різницею густини повітря в ежекційному потоці та навколишньому повітрі, а також від поперечного перерізу частинки.

Сила лобового опору $F_{лтв}$ під час руху частинки у вертикальній площині (після її відриву), визначається за формулою [16]

$$F_{лтв} = (\rho_2 - \rho_1) g y S_M, \quad (5)$$

де ρ_1 – густина навколишнього рудникового повітря, кг/м^3 , при тиску P_1 та температурі T_1 ; ρ_2 – густина повітря в потоці, що ежектує, кг/м^3 , при тиску, створеному за рахунок захоплення додаткового повітря, падаючою гірською масою P_2 і підвищення температури повітря до T_2 за рахунок його стиснення; y – поточна відстань від ґрунту виробки по осі ординат, м.

Відповідно до рівняння Менделєєва-Клапейрона

$$\rho_1 = \frac{M}{R} \cdot \frac{P_1}{T_1}; \quad \rho_2 = \frac{M}{R} \cdot \frac{P_2}{T_2},$$

де $M = 0,0289644$ кг/моль – молярна маса сухого повітря; $R = 8,31447$ Дж/моль К універсальна газова постійна.

З врахуванням того, що

$$S_M = \frac{\pi d^2}{4}, \quad (6)$$

та нескладних перетворень, вираз (5) можна записати в наступному вигляді

$$F_{лтв} = 0,0267 \cdot d^2 y \left(\frac{P_2}{T_2} - \frac{P_1}{T_1} \right). \quad (7)$$

4. При відомій швидкості (у горизонтальній площині) повітряного потоку v , що виникає в момент падіння гірської маси на ґрунт виробки, силу лобового опору $F_{лтг}$ можна визначити за формулою

$$F_{лтг} = c_{лтг} S_M \frac{v^2 \rho_e}{2},$$

де $c_{лтг}$ – коефіцієнт лобового опору; ρ_e – густина повітря, кг/м^3 .

Коефіцієнт лобового опору $c_{лтг}$ залежить від числа Рейнольдса і для кулі величина $c_{лтг}$ може бути визначена за формулою [16]

$$c_{\text{лмг}} = \frac{24}{\text{Re}} (1 + 0,17 \text{Re}^{2/3}). \quad (8)$$

З врахуванням (8) та (6)

$$F_{\text{лмг}} = 9,42 \frac{d^2 v^2 \rho_g}{\text{Re}} (1 + 0,17 \text{Re}^{2/3}) \quad (9)$$

де d_c – діаметр частинок, м;

5. Сила тяжіння між окремими частинками (сила адгезії) $F_{\text{адг}}$ виникає при дотику тіл і є результатом молекулярної взаємодії, що проявляється при безпосередньому контакті частинок між собою та поверхнею. Взаємодія частинок між собою називають аутогезією, а взаємодію частинок із твердою поверхнею називають адгезією. Сила адгезії залежить від площі контакту частинок з плоскою поверхнею, оскільки молекулярна взаємодія пропорційна площі контакту. Сили аутогезії визначаються формою та станом поверхні частинок [16].

Відрив від поверхні прилиплому шару дрібного матеріалу повітряним потоком відбувається таким чином. Спочатку відриваються верхні більші частинки, потім відриваються дрібні частинки, тобто долаються сили адгезії шару. Видалення верхніх частинок можливе при $F_{\text{адг}} > F_{\text{аут}}$. [16].

Аутогезійний процес відриву часток називається ерозією.

При $F_{\text{адг}} < F_{\text{аут}}$ відбувається відрив шару межі розділу «поверхня – шар». У цьому випадку тут долаються сили адгезії. Цей процес називається денудациєю [16].

Без урахування електричних та капілярних сил, дійсної форми частинок та інших факторів, що впливають на прилипання частинок до поверхні, величину сили адгезії можна виразити залежністю

$$F_{\text{адг}} = \frac{h \omega d}{16 \cdot \pi z_0^2}, \quad (10)$$

де h_ω – константа Ліфшиця-Планка, Дж; z_0 – зазор між частинкою та площиною, при якому сили адгезії досягають максимуму, м; d – діаметр частинки, м.

Дослідженнями встановлено [16], що при зазорі $4 \cdot 10^{-10}$ м сила адгезії максимальна і дорівнює

$$F_{\text{адг}} = 1,2 \cdot 10^{-7} d.$$

Сили адгезії зменшуються пропорційно квадрату розміру зазору. Тому дрібні частинки (порядку менше 50 мкм) мають велику площу зіткнення, по відношенню до розміру великої частки, та їх величина сили адгезії більша, ніж у великих частинок. Тому для відриву більших частинок від поверхні необхідна менша сила, ніж для підйому дрібних частинок, менше 50 мкм. Отже, великі частинки понад 50 мкм відриваються від поверхні спочатку при менших швидкостях повітряного потоку.

6. Підйомна сила повітряного потоку $F_{нід}$ визначається за формулою [16–18]:

$$F_{нід} = c_y S_m \frac{v^2 \rho_e}{2} = c_y \frac{\pi d^2}{4} \frac{v^2 \rho_e}{2},$$

де c_y – коефіцієнт підйомної сили.

Нерівномірна швидкість обтікання частинок і викликана циркуляція повітря по контуру частинки породжує ефект Магнуса (рис. 3) і створює силу, що діє на частинку в перпендикулярному напрямку потоку і називається поперечною або підйомною силою $F_{нід}$, або силою Магнуса

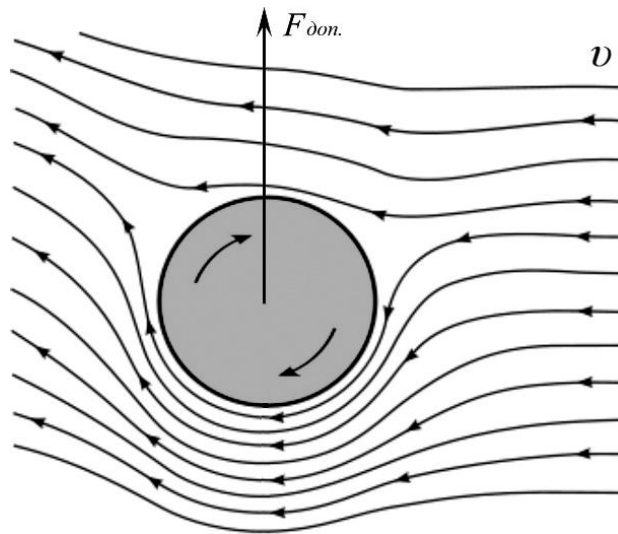


Рис. 3. Ефект Магнуса при впливу на частинку, що обертається, нерівномірності швидкості її обтікання

Визначити силу Магнуса можна з наступного рівняння [16, 17]:

$$F_{нід} = \frac{1}{8} \pi d^3 \rho_c (v - v_c) \omega, \quad (11)$$

де ω – кутова швидкість частинки, значення якої приймають позитивним для верхнього обертання, радіан /с; v_c – швидкість частинки у потоці, м/с.

7. Силу тертя між частинкою і площиною $F_{мер}$ можна виразити наступним чином [16]:

$$F_{мер} = k(F_g + F_{ад}),$$

де k – коефіцієнт тертя.

Після того, як сила тиску повітряного потоку на частинку перевищить силу тертя, виникає ковзання її по поверхні. Сила тертя завжди спрямована протилежно до переміщення частинки.

З урахуванням (4) та (10) отримаємо

$$F_{мер} = \frac{k}{16} \left(\tau d^3 \rho_c + \frac{h \omega d}{\pi z_0^2} \right). \quad (12)$$

Диференціальне рівняння кількості руху частинки у загальному вигляді, згідно з другим законом Ньютона, має вигляд

$$m \frac{\partial v}{\partial t} = \sum F_i \quad (13)$$

де $\sum F_i$ – сума раніше встановлених сил, що діють на пилову частку.

У рівняння (13) вводимо ті сили, які є визначальними у цьому випадку, тобто сили, які діють на частинку, викликаючи її вертикальне переміщення. У цьому випадку рівняння руху частинки в проєкції на вісь має такий вигляд:

$$m \frac{\partial v}{\partial t} = F_{\text{лме}} + F_{\text{нід.}} - F_g - F_{\text{адз}} - F_{\text{аер.оп.}} \quad (14)$$

З урахуванням виразів (2), (4), (7), (10) та (11) отримаємо математичну модель балансу сил, що діють на одиночну частинку пилу в умовах відбійки гірської маси комбайном.

$$m \frac{\partial v}{\partial t} = 0,0267 \cdot d^2 y \left(\frac{P_2}{T_2} - \frac{P_1}{T_1} \right) + \frac{1}{8} \pi d^3 \rho_q (v - v_q) \omega - \frac{\tau d^3}{16} \rho_q - \frac{h \omega d}{16 \cdot \pi z_0^2} - 3\pi \mu d \frac{v_q}{2} \quad (15)$$

Підставивши значення відомих постійних параметрів та виконавши нескладні перетворення, отримаємо

$$m \frac{\partial v}{\partial t} = 0,0267 \cdot d^2 y \left(\frac{P_2}{T_2} - \frac{P_1}{T_1} \right) + 0,3925 \cdot d^3 \rho_q \omega v - 0,3925 \cdot d^3 \rho_q \omega v_q - \\ - 0,0625 \cdot \tau d^3 \rho_q - 0,0199 \frac{h \omega d}{z_0^2} - 0,85 \cdot 10^{-4} \cdot d v_q \quad (16)$$

При вирішенні рівняння (16) щодо v отримаємо вираз для визначення критичної швидкості повітряного потоку, при якій частинки переходитимуть у зважений стан

$$v = \frac{d^3 \rho_q \omega v_q + 0,16 \cdot \tau d^3 \rho_q + 0,05 \frac{h \omega d}{z_0^2} + 0,22 \cdot 10^{-3} \cdot d v_q - 0,07 \cdot d^2 y \left(\frac{P_2}{T_2} - \frac{P_1}{T_1} \right)}{d^3 \rho_q \omega} \quad (17)$$

При відомій швидкості потоку v , вирішуючи рівняння (17) відносно y , отримаємо вираз для визначення поширення пилу по осі ординат (за перерізом гірничої виробки)

$$y = \frac{14,7 \cdot d^3 \rho_q \omega v_q + 2,34 \cdot \tau d^3 \rho_q + 0,745 \frac{h \omega d}{z_0^2} + 0,32 \cdot 10^{-2} \cdot d v_q - 14,7 \cdot d^3 \rho_q \omega v}{d^2 \left(\frac{P_2}{T_2} - \frac{P_1}{T_1} \right)} \quad (18)$$

Висновки. Розподіл концентрації пилу за перерізом підготовчої виробки під час її провітрювання при роботі комбайна необхідно розглядати як результат накладення пилових потоків, обумовлених кількома джерелами пилоутворення.

Велику роль в переході дрібних частинок у зважений стан при падінні зруйнованої гірської маси грає явище формування спрямованих повітряних течій у потоці гірської маси за допомогою динамічної взаємодії падаючих частинок з повітрям.

Істотний вплив на зміну запиленості рудникової атмосфери в привибійному просторі надають динамічні характеристики повітряних потоків.

В результаті аналізу сил, що діють на пилову частинку, розроблено математичну модель пилоутворення при роботі комбайна, що дозволяє визначати критичні параметри повітряного потоку, які впливають на характеристики утворення і поширення дрібнодисперсного пилу.

Перелік посилань

1. Батур, М. & Бабій, К. (2022). Просторова оцінка забруднення повітря внаслідок гірничодобувної та промислової діяльності: приклад Кривого Рогу, Україна. *IOP Conference, Earth and Environmental Science*, 970, 1–13. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/970/1/012004>
2. Liu, C., Yin, Z., He, Y., & Wang, L. (2022). Climatology of Dust Aerosols over the Jiangnan Plain Revealed with Space-Borne Instruments and MERRA-2 Reanalysis Data during 2006–2021. *Remote Sensing*, 14(17), 4414. <https://doi.org/10.3390/rs14174414>
3. *Respirable dust sampling requirements / ed. by United States. Mine Safety and Health Administration. Arlington, Va. (4015 Wilson Blvd., Arlington, 22203-1984) : U.S. Dept. of Labor, Mine Safety and Health Administration (1994).*
4. Chernykh, I. A., Lind, E. V., & Udaltsov, E. A. (2022). Reducing worker exposure to dust in surface coal mining. *Interexpo GEO-Siberia*, 3, 42–48. <https://doi.org/10.33764/2618-981x-2022-3-42-48>
5. Mine dust. (2014). *Dictionary Geotechnical Engineering/Wörterbuch GeoTechnik*, 871–871. https://doi.org/10.1007/978-3-642-41714-6_131838
6. Wippich, C., Rissler, J., Koppisch, D., & Breuer, D. (2020). Estimating Respirable Dust Exposure from Inhalable Dust Exposure. *Annals of Work Exposures and Health*, 64(4), 430–444. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxaa016>
7. Wippich, C., Breuer, D., Rissler, J., & Koppisch, D. (2023). 29 Estimating Respirable Dust Exposure from Inhalable Dust Exposure. *Annals of Work Exposures and Health*, 67(Supplement_1), i20–i21. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxac087.053>
8. Otgonnasan, A., Yundendorj, G., Tsogtbayar, O., Erdenechimeg, Z., Ganbold, T., Namsrai, T., Damiran, N., & Erdenebayar, E. (2022). Respirable Dust and Respirable Crystalline Silica Concentration in Workers of Copper Mine, Mongolia. *Occupational Diseases and Environmental Medicine*, 10(03), 167–179. <https://doi.org/10.4236/odem.2022.103013>
9. Wu, T., Yang, Z., Wang, A., Zhang, K., & Wang, B. (2021). A study on movement characteristics and distribution law of dust particles in open-pit coal mine. *Scientific Reports*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-94131-6>
10. Nascimento, P., Taylor, S. J., Arnott, W. P., Kocsis, K. C., Wang, X. L., & Firouzkouhi, H. (2021). Development of a real time respirable coal dust and silica dust monitoring instrument based on photoacoustic spectroscopy. *Mine Ventilation*, 233–241. <https://doi.org/10.1201/9781003188476-24>
11. Mukha, O., Cheberiyachko, Y., Sotskov, V., & Kamulin, A. (2019). Studying aerodynamic resistance of a stope involving CAD packages modeling. *E3S Web of Conferences*, 123, 01048. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912301048>
12. Hajizadehmotlagh, M., Fahimi, D., Singhal, A., & Paprotny, I. (2023). Wearable Resonator-Based Respirable Dust Monitor for Underground Coal Mines. *IEEE Sensors Journal*, 23(7), 6680–6687. <https://doi.org/10.1109/jsen.2023.3241601>
13. Das, M., Salinas, V., LeBoeuf, J., Khan, R., Jacques, Q., Camacho, A., Hovingh, M., Zychowski, K., Rezaee, M., Roghanchi, P., & Rubasinghege, G. (2023). A Toxicological Study of the

- Respirable Coal Mine Dust: Assessment of Different Dust Sources within the Same Mine. *Minerals*, 13(3), 433. <https://doi.org/10.3390/min13030433>
14. Dong, H. (2021). Research on Dust Generation Mechanism and Dust Reduction of Tidal Shotcrete in Underground Coal Mine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 693(1), 012081. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/693/1/012081>
 15. Vasiliev, A., Stefanenko, I., Azarov, V., & Nikolenko, D. (2019). The study of the aerodynamic characteristics of dust particles in the air of roadside areas. *E3S Web of Conferences*, 126, 00071. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912600071>
 16. Калінчак, В. В., Черненко, О. С., & Контуш, С. М. (2019). *Фізика медичних аерозолів: навч. посіб.* Одеса: Одес. нац. ун-т ім. І. І. Мечникова.
 17. Rais, N. N. M., Alias, S., & Kamil, N. A. F. M. (2023). Comparison of palm oil fuel ash and quarry dust as binder in solidification and stabilization method. *AIP Conference Proceedings*. <https://doi.org/10.1063/5.0156141>
 18. Thakur, P. (2019). Respirable Dust Sampling and Measurement. *Advanced Mine Ventilation*, 189–210. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100457-9.00012-2>

ABSTRACT

Purpose. The development of a mathematical model of the process of dust formation during rock removal by the executive body of the mining combine, which allows determining the distribution of dust fractions along the cross-section and length of the mine, depending on the speed of movement of the ventilation stream, as well as the distance in the network of mines, on which different fractions are deposited dust

Research methodology. Analytical methods were used in the work - to study the processes of formation and distribution of dust during the operation of the harvester; methods of mathematical modeling - for the development of models for the distribution of carbon dust in the near-bubble space.

Research results. The mechanism of dust formation during the operation of selective action harvesters was established, which allows to evaluate the influence of dynamic characteristics of air flows in the near-excavation space on the level of dustiness of the mine atmosphere and to establish the relationship between air dustiness and the mode of operation of the combine.

A mathematical model of dust formation during the operation of the harvester was developed, which allows determining the critical parameters of the air flow that affect the characteristics of the distribution of fine dust.

The originality. A mathematical model of a formalized description of the process of formation and distribution of dust during the destruction of a mass of rocks by the executive body of the combine was developed and theoretically substantiated, which differs from the known ones in that it takes into account the phenomenon of the formation of directed air currents in the flow of mining mass due to the dynamic interaction of falling particles with air.

Practical value. The practical significance of the obtained results is that the obtained mathematical model of the process of formation and distribution of dust during the destruction of a mass of rocks by a harvester allows determining the optimal places for installing dust-catching equipment for its effective use, as well as the optimal control points for dust concentration.

Keywords: dust generation, air currents, rock chipping, working conditions, fine-dispersed dust.