

© О.А. Муха¹, І.О. Лутс¹, А.А. Юрченко¹, Д.В. Савельєв¹

¹ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ОБҐРУНТУВАННЯ УЛАШТУВАННЯ АСПІРАЦІЙНОГО УКРИТТЯ ПРИ ПЕРЕВАНТАЖЕННІ ГІРНИЧОЇ МАСИ НА КОНВЕЄРАХ

© O. Mukha¹, I. Luts¹, A. Yurchenko¹, D. Saveliev¹

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

SUBSTANTIATION OF THE DEVICE OF ASPIRATION SHIPS AT OVERLOADING OF ROCK MASS ON CONVEYORS

Мета. Розробка математичної моделі процесу пилоутворення на пунктах перевантаження гірничої маси на конвеєрних лініях і визначення критичної швидкості руху повітряного потоку в вертикальному напрямку, при якій пилові частинки будуть переходити у завислий стан, що викликає необхідність застосування технічних засобів придушення пилу.

Методика дослідження. Для досягнення поставленої мети використано методи фізичного і математичного моделювання поведінки пилових частинок в пунктах перевантаження гірничої маси на конвеєрах і процесу пилоутворення в цих місцях.

Результати дослідження. Виконано аналіз теоретичних досліджень запиленості повітря в підземних конвеєрних штреках, процесів пилоутворення на пунктах перевантаження гірничої маси, досліджено характер руху пилових частинок в пунктах перевантаження, розроблена математична модель пилоутворення в цих місцях. Отримано аналітичний вираз для розрахунку швидкості руху повітря в вертикальному напрямку на пунктах перевантаження гірничої маси, при якій пилові частинки будуть перебувати у завислому стані, як критерію необхідності улаштування аспіраційного укриття.

Наукова новизна. Отримали подальший розвиток теоретичні положення, які встановлюють режим руху пилових частинок в пункті перевантаження гірничої маси на конвеєрах, розроблена математична модель процесу пилоутворення на перевантажувальних пунктах. Обґрунтовано використання значення вертикальної складової повітряного потоку в місці перевантаження гірничої маси на конвеєрах як критерію необхідності встановлення технічних засобів пилоподавлення.

Практичне значення. Отримані результати досліджень можуть бути використані при обґрунтуванні необхідності улаштування аспіраційних укриттів або інших засобів боротьби з пилом в місцях перевантаження гірничої маси на конвеєрах. Результати досліджень можуть бути використані в інших галузях промисловості, де здійснюється транспортування сипучих вантажів за допомогою конвеєрних ліній.

Ключові слова: конвеєрний штрек, пункт перевантаження, пилоутворення, математична модель, аспіраційне укриття, рух повітря, критична швидкість.

Вступ. Встановлено, що запиленість повітря у виробках вугільних шахт із конвеєрною доставкою вугілля без застосування будь-яких засобів боротьби з пилом, за винятком знепилюючої вентиляції, коливається від 25 до 100 мг/м³, що вказує на наявність суттєвих джерел пилоутворення, що впливають на рівень запиленості шахтної атмосфери [1-3].

Загальну картину розподілу концентрації пилу за перерізом конвеєрної виробки слід розглядати як результат накладання пилових потоків, обумовлених декількома джерелами надходження пилу, основним з яких є пункт перевантаження вугілля на конвеєрах або в місці сполучення конвеєрного штреку з лавою.

Основною причиною винесення пилу з гірничої маси, що транспортується, при її перевантаженні (рис. 1) є ежекція – формування спрямованих повітряних течій у потоці гірничої маси за рахунок динамічної взаємодії падаючих частинок з повітрям [4, 5].

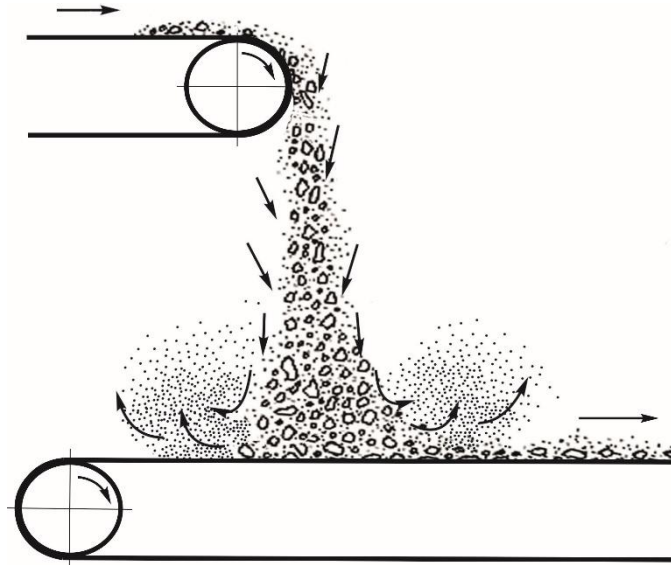


Рис. 1. Повітряні потоки при вільному падінні сипучої маси

Пилоутворення на пунктах перевантаження пояснюється, головним чином, наявністю в гірничій масі пилоподібних фракцій, здатних перебувати певний час у завислому стані. Вони утворюються не тільки під час механічного подрібнення при відбійці гірничої маси від масиву гірських порід, а й у результаті зіткнення частинок друг з одним, і навіть з різними конструктивними елементами гірничого устаткування.

При розгляді механізму пиловиділення при перевантаженні гірничої маси можна виділити три стадії, що послідовно змінюють одна одну [4]:

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

Характерною особливістю першої стадії є розрив аутогезійних сил зчеплення між пиловими частинками в момент скидання потоку гірничої маси з барабанного приводного верхнього конвеєра. При цьому починає формуватися аеродисперсна система – пиловий аерозоль.

У процесі вільного падіння розрив конгломерату частинок посилюється в результаті динамічної взаємодії з повітрям та зіткнення з більшими частинками.

Виникаючий ежекційний потік повітря інтенсивно насичується пиловими

частинками і в момент укладання гірничої маси на нижній конвеєр утворює струмінь запиленого повітря, що настається. На цій стадії відбувається, з одного боку, інерційна сепарація частинок і випадання їх на поверхню покладеного матеріалу, а з іншого – здув дрібних частинок, що осіли, і винесення їх цим струменем в атмосферу конвеєрної виробки.

Пилоутворення на пунктах перевантаження істотно залежить від висоти перепаду, швидкості руху матеріалу в момент його скидання та від кута скидання. Зміна останнього від -45° до $+45^\circ$ призводить до зростання запиленості в 1,5-2,0 рази. При від'ємних кутах скидання, тобто при транспортуванні матеріалу вниз по виробці, збільшення швидкості руху стрічки сприяє зменшенню пилоутворення, а при транспортуванні вгору, навпаки, до значного збільшення пилоутворення та запиленості повітря [6]. Істотний вплив на пилоутворення мають також: температура, вологість гірничої маси та її гранулометричний склад.

Метою роботи є розробка математичної моделі процесу пилоутворення на пунктах перевантаження гірничої маси на конвеєрних лініях і визначення критичної швидкості руху повітряного потоку в вертикальному напрямку, при якій пилові частинки будуть переходити у завислий стан, що викликає необхідність застосування технічних засобів придушення пилу. В роботі поставлено завдання аналізу фізичних процесів пилоутворення при перевантаженні вугілля на конвеєрах та встановлення критеріїв, при критичних значеннях яких необхідно улаштування аспіраційного укриття на пункті перевантаження.

Основна частина. При дослідженні процесу пилоутворення на пунктах перевантаження на конвеєрах не встановлено значення параметрів, що впливають на процес пилоутворення, при яких необхідно улаштування аспіраційного укриття або інших засобів пилоподавлення для зниження запиленості атмосфери в гірничій виробці.

Для вирішення цього завдання авторами статі запропоновано розробити математичну модель процесу пилоутворення на пунктах перевантаження гірничої маси на конвеєрних лініях для визначення вертикальної складової швидкості руху повітряного потоку, за якої пилові частинки переходитимуть у завислий стан.

При перевантаженні та завантаженні гірничої маси утворюються повітряні потоки, які переводять частинки у завислий стан. При цьому виникають такі сили аеродинамічного впливу повітряних потоків на пилову частинку:

- сила лобового тиску ежектуючого потоку F_L у вертикальній площині, що спрямована знизу вгору;
- підйомна сила F_{Π} вентиляційного потоку, що прагне підняти частинку пилу вгору;
- бічна лобова сила F_{LB} вентиляційного потоку, що переміщує частинку в горизонтальній площині і сприяє її поширенню вздовж виробки [7];
- сила Стокса F_C , що перешкоджає переміщенню частинки;
- сила тяжіння F_T ;
- сила притягання $F_{\Pi P}$ між окремими частинками;

- сила Магнуса F_M , що виникає при обертальному русі частинок у потоці та спрямована вгору;
- сила опору руху частинки в горизонтальному напрямку F_{TP} .

Баланс сил, що діє на пилову частинку, представлений на рис. 2.

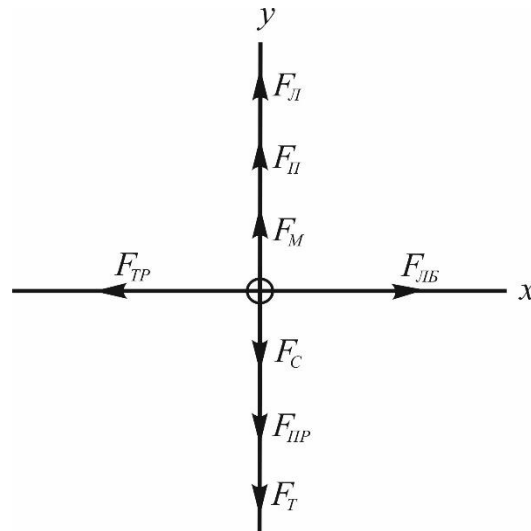


Рис. 2. Баланс сил, що діє на пилову частинку

Умовою для переміщення частки вгору є перевищення сумарно діючих сил лобового тиску ежектуючого потоку F_L , підйомної сили $F_П$ вентиляційного потоку і сили Магнуса F_M над силами тяжіння F_T , притягання $F_ПР$ і Стокса F_C .

У цьому випадку необхідно, щоб аеродинамічні сили повітряного потоку були більшими за суму сил, що перешкоджають руху частинки вгору

$$F_L + F_П + F_M > F_T + F_ПР + F_C. \quad (1)$$

У цьому випадку визначальним параметром, при якому пилові частинки заданої щільності починають переходити у завислий стан, є швидкість висхідних потоків повітря (критична швидкість).

Сила лобового тиску F_L визначається за формулою

$$F_L = c_L S_M \frac{v^2 \rho_v}{2}, \quad (2)$$

де c_L – коефіцієнт лобового тиску; v – швидкість вертикального повітряного потоку, що виникає в момент укладання гірничої маси на нижній конвеєр, м/с; ρ_v – густина повітря, кг/м³; S_M – міделевий переріз частки, м².

Коефіцієнт лобового тиску c_L залежить від числа Рейнольдса Re і для кулі величина c_L може бути визначена за такими залежностями [8]:

$$c_L = \frac{24}{Re}, \text{ при } Re < 1; \quad (3)$$

$$c_L = 24(Re)^{0,1311 \lg Re - 0,95}, \text{ при } 1 \leq Re \leq 2000; \quad (4)$$

$$c_L = 0,47 \text{ при } Re > 2000 \quad (5)$$

Міделевий переріз частки визначається з виразу

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

де d – діаметр пилової частинки, м.

З урахуванням (2, 3, 4, 5) сила лобового тиску ежектуючого потоку F_L для різних чисел Re визначається за виразами:

$$F_L^{Re < 1} = \frac{24 \pi d^2 v^2 \rho_v}{Re} = 9,42 \frac{d^2 v^2 \rho_v}{Re} \quad (7)$$

$$F_L^{1 \leq Re \leq 2000} = 24(Re)^{0,1311 \lg Re - 0,95} \frac{\pi d^2 v^2 \rho_v}{4} = 9,42 \cdot (Re)^{0,1311 \lg Re - 0,95} d^2 v^2 \rho_v \quad (8)$$

$$F_L^{Re > 2000} = 0,47 \frac{\pi d^2 v^2 \rho_v}{4} = 0,19 \cdot d^2 v^2 \rho_v. \quad (9)$$

Підйомна сила повітряного потоку F_{Π} визначається за формулою

$$F_{\Pi} = c_y S_M \frac{v^2 \rho_v}{2} = c_y \frac{\pi d^2 v^2 \rho_v}{4}, \quad (10)$$

де c_y – коефіцієнт підйомної сили.

Нерівномірна швидкість обтікання частинок та викликана циркуляція повітря по контуру частинки породжує ефект Магнуса (рис. 3) і створює силу, що діє на частинку перпендикулярно до напрямку потоку і називається поперечною або підйомною силою, або силою Магнуса F_M .

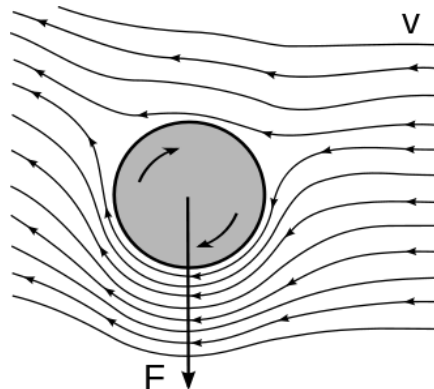


Рис. 3. Вплив на частинки пилу, що обертаються, сил, пов'язаних з ефектом Магнуса

Визначити силу Магнуса можна з наступного рівняння [9]:

$$F_M = \frac{1}{8} \pi^2 d^3 \rho_v (v - v_c) \omega \quad (11)$$

де ω – кутова швидкість частинки, значення якої приймають позитивним для верхнього обертання; v_c – швидкість частки у потоці.

Сила тяжіння F_T визначається за формулою

$$F_T = (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{в}}) \left(\frac{\pi d^3}{6} \right) \quad (12)$$

де $\rho_{\text{ч}}$ – густина частинки, кг/м³.

У зв'язку з тим, що густина повітря дуже незначна в порівнянні з густиною частинки, то її можна не враховувати, і отже вираз (12) набуде вигляду:

$$F_T = \frac{\pi d^3}{6} \rho_{\text{ч}} \quad (13)$$

Сила притягання $F_{\text{ПР}}$ між окремими частинками визначається за формулою [10]

$$F_{\text{ПР}} = \tau \frac{d}{2} \sigma, \quad (14)$$

де τ – коефіцієнт зсуву; σ – вільна енергія одиниці поверхневого опору.

Сила опору Стокса

$$F_C = \varphi \eta \frac{\pi d}{2} v,$$

де φ – коефіцієнт форми частинки в законі Стокса; η – в'язкість повітря, м²/с.

Математичну модель процесу утворення та поширення пилу при перевантаженні гірничої маси можна отримати, виходячи з наступних міркувань.

Рівняння руху частинки відповідно до другого закону Ньютона запишеться як

$$m \frac{\partial v}{\partial t} = \sum P_i \quad (15)$$

де $\sum P_i$ – сума діючих сил, розрахунок яких здійснюється за рівняннями, наведеними вище.

У вираз (15) вводимо ті сили, які є визначальними у цьому випадку, тобто. сили які діють на частинку, викликаючи її вертикальне переміщення.

Рівняння руху частинки в проекції на вісь y має вигляд:

$$m \frac{\partial v}{\partial t} = F_{\text{Л}} + F_{\text{П}} + F_{\text{М}} - F_T - F_{\text{ПР}} - F_C \quad (16)$$

З урахуванням виразів (2 ... 16) отримаємо математичну модель балансу сил, що діють на одиночну частинку пилу в умовах перевантаження гірничої маси з конвеєра на конвеєр у межах чисел Рейнольдса $1 \leq \text{Re} \leq 2000$ у вигляді

$$m \frac{\partial v}{\partial t} = 0,19 \cdot d^2 v^2 \rho_{\text{в}} + c_y \frac{\pi d^2}{4} \frac{v^2 \rho_{\text{в}}}{2} + \frac{1}{8} \pi^2 d^3 \rho_{\text{ч}} (v - v_{\text{ч}}) \omega - \frac{\pi d^3}{6} \rho_{\text{ч}} - \tau \frac{d}{2} \sigma - \varphi \eta \frac{\pi d}{2} v \quad (17)$$

При вирішенні рівняння (17) відносно v отримаємо вираз для визначення критичного значення швидкості повітряного потоку, при якій частинки переходять у завислий стан

$$v = \frac{\left[(A - 1,57\varphi\eta d)^2 - 2B(0,19 + 0,4c_y) \left(Av_c + 0,52d^3\rho_c + 0,5\tau\sigma \right) \right]^{0,5} - (A - 1,57\varphi\eta d)}{B(0,19 + 0,4c_y)},$$

де $A = 1,23d^3\rho_c\omega$; $B = 2d^2\rho_g$.

Доцільність улаштування аспіраційного укриття залежить від критичної швидкості потоку. Якщо вертикальна складова швидкості повітряного потоку в гірничій виробці перевищує критичну, доцільно встановлювати аспіраційне укриття.

Висновки. Проведені дослідження характеризуються наступними результатами:

- набули подальшого розвитку теоретичні положення, які встановлюють режим руху пилової частинки у пункті перевантаження гірничої маси на конвеєрах;
- розроблено математичну модель процесу пилоутворення на перевантажувальних пунктах;
- отримано аналітичний вираз для розрахунку критичної вертикальної складової швидкості руху повітря в гірничій виробці як критерію необхідності улаштування аспіраційного укриття.

Перелік посилань

1. Журавлев, В.П., Демишева, Е.Ф., & Спирин, Л.А. (1988). *Аэродинамические методы борьбы с угольной пылью*. Издательство Ростовского университета.
2. Яремченко, П.П. (1983). О местах, продолжительности и периодичности измерения запыленности воздуха. *Вопросы вентиляции, охлаждения воздуха, борьбы с пылью и контроль рудничной атмосферы в шахтах*, 88-91.
3. Поздняков, Г.А. (1983). Аэродинамика перехода пыли во взвешенное состояние. *Вопросы вентиляции, охлаждения воздуха, борьбы с пылью и контроль рудничной атмосферы в шахтах*, 88-91.
4. Логачев, И.Н., & Логачев, К.И. (2005). *Аэродинамические основы аспирации*. Химиздат.
5. Новикова, Е.А. (2010). Динамика рудничных аэрозолей, образовавшихся при добыче и транспортировке полезных ископаемых. *Збірник наукових праць НГУ*, 167–177.
6. Лихачев, Л.Я. (1970). *Способы борьбы с пылью в шахтах при работе выемочных комбайнов*.
7. Юрченко, А.А., Литвиненко, А.А., Иконникова, Н.А., & Иконников, М.Ю. (2017). Математическая модель процесса переноса аэрозолей в подземных горных выработках. *Науковий журнал ДДТУ «Математичне моделювання»*, 42-51.
8. Фукс, Н.А. (1955). *Механика аэрозолей*. Издательство АН СССР.
9. Белоусов, В.В. (1988). *Теоретические основы процессов газоочистки*. Metallurgia.
10. Буянов, А.Д., & Павленко, А.Т. (2009). Обеспыливание пылящей массы при грузозачно-погрузочных работах. *Вісник Криворізького національного університету*, 232 – 234.

АННОТАЦИЯ

Цель. Разработка математической модели процесса пылеобразования на пунктах перегрузки горной массы на конвейерных линиях и определение критической скорости движения воздушного потока в вертикальном направлении, при которой пылевые частицы будут переходить во взвешенное состояние, что вызывает необходимость применения технических средств пылеподавления.

Методика исследований. Для достижения поставленной цели использованы методы физического и математического моделирования поведения пылевых частиц в пунктах перегрузки горной массы на конвейерах и процесса пылеобразования в этих местах.

Результаты исследования. Выполнен анализ теоретических исследований запылённости воздуха в подземных конвейерных штреках, процессов пылеобразования на пунктах перегрузки горной массы, исследован характер движения пылевой частицы в пунктах перегрузки, разработана математическая модель пылеобразования в этих местах. Получено аналитическое выражение для расчёта скорости движения воздуха в вертикальном направлении на пунктах перегрузки горной массы, при которой пылевые частицы будут находиться во взвешенном состоянии, как критерия необходимости установки аспирационного укрытия.

Научная новизна. Получили дальнейшее развитие теоретические положения, которые устанавливают режим движения пылевой частицы в пункте перегрузки горной массы на конвейерах, разработана математическая модель процесса пылеобразования на перегрузочных пунктах. Обосновано использование значения вертикальной составляющей воздушного потока в месте перегрузки горной массы на конвейерах как критерия необходимости установки технических средств пылеподавления.

Практическое значение. Полученные результаты исследований могут быть использованы при обосновании необходимости устройства аспирационных укрытий или других средств пылеподавления в местах перегрузки горной массы на конвейерах. Результаты исследований могут быть использованы в других отраслях промышленности, где осуществляется транспортировка сыпучих грузов с помощью конвейерных линий.

Ключевые слова: конвейерный штрек, пункт перегрузки, пылеобразование, математическая модель, аспирационное укрытие, движение воздуха, критическая скорость.

ABSTRACT

Purpose. Development of a mathematical model of the process of dust formation at the points of reloading of rock mass on conveyor lines and determination of the critical speed of air flow in the vertical direction, at which dust particles will become suspended, which necessitates the use of technical means of dust suppression.

Research methodology. To achieve this goal, methods of physical and mathematical modeling of the behavior of dust particles at the points of reloading of rock mass on conveyors and the process of dust formation in these places were used.

Findings. The analysis of theoretical studies of air dustiness in underground conveyor drifts, dust formation processes at the points of rock mass transfer has been carried out, the nature of the movement of a dust particle at transfer points has been investigated, and a mathematical model of dust formation in these places has been developed. An analytical expression is obtained for calculating the speed of air movement in the vertical direction at the points of reloading of the burrowing mass, at which dust particles will be in suspension, as a criterion for the need to install an aspiration shelter.

Scientific novelty. The theoretical provisions that establish the mode of movement of a dust particle at the point of reloading of rock mass on conveyors have been further developed, a mathematical model of the process of dust formation at reloading points has been developed. The use of the value of the vertical component of the air flow at the place of overloading of the rock mass on conveyors as a criterion for the need to install technical means of dust suppression has been substantiated

Practical implications. The obtained research results can be used to substantiate the need for the construction of aspiration shelters, or other means of dust suppression, in the places of overloading the rock mass on conveyors. The research results can be used in other industries where bulk cargo is transported using conveyor lines.

Keywords: *conveyor drift, transfer point, dust generation, mathematical model, aspiration shelter, air movement, critical speed.*