

УДК 622.272: 697.956

О.Є. ЛАПШИН, д-р техн. наук, проф., І.А. ФЕДУСОВ, аспірант
Криворізький національний університет

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ДИНАМІКИ ПИЛОВИХ ПОТОКІВ В ГІРНИЧИХ ВИРОБКАХ

У статті проаналізовані результати проб повітря на запиленість пристовбурових виробок шахти «Октябрська» та шахти «Родіна» ПАТ «КЗРК», які виконала промсанлабораторія цього підприємства в 2013-2015 роках. Мета яка була поставлена авторами, це математично дослідити та вивести залежність, яку можна використовувати при розрахунку ефективності осідання рудникового пилу різного дисперсного складу в гірничих виробках рудникових шахт, була досягнута. Оскільки на дно гірничих виробок осідає значно більше пилу, чим на стінки і особливо покрівлю, то осідання пилу автори розглядали тільки під дією гравітаційних сил. В основу теорії процес осідання аерозолів в великій кількості робіт, авторами положена закономірність руху окремо взятої пилінки. Авторами була описана математична модель ефективності осідання рудникового пилу різного дисперсного складу в гірничій виробці з урахування початкової концентрації пилу, та швидкості потоку повітря в гірничих виробках пристовбурових комплексів рудникових шахт. Отримані рівняння руху і осідання пилу в гірничих виробках орієнтовані на їх можливу експериментальну перевірку, усі параметри які потрібні для обчислень що входять в ці рівняння, вимірюються сучасними приладами або стаціонарними датчиками які встановлені в пристовбуровому комплексі шахти.

Ключові слова: математичне моделювання, пил, осідання пилу, концентрація пилу, гірничі виробки, турбулентний рух, рівняння руху пилу, рівняння осідання пилу.

Постановка проблеми. Пристовбуровий комплекс містить у собі ряд виробок спеціального призначення, основними з яких є клітьовий і скіповий руд двори. У скіповому руд дворі відбувається розвантаження рухомого складу з рудою й порожньою породою; з нього потік гірської маси надходить на підземну дробарку, у центральний бункер, дозатор й, нарешті, у скіпи. Всі ці процеси супроводжуються досить інтенсивним пило виділенням, обумовленим великою висотою перепадів гірської маси, при яких відбувається не тільки диспергування пилу, що втримується в ній, але й утворення нової в момент зіткнень і дроблення шматків. Дані по запиленість повітря при різних технологічних операціях у руд дворі наведені в табл. № 1, 2

Проаналізувавши результати проб повітря на запиленість пристовбурових виробках шахти «Октябрська» та шахти «Родіна» ПАТ «КЗРК» (табл. 1,2), які були виконані промсанлабораторією цього підприємства в 2013-2015 р. Було встановлено, що фактична запиленість повітря на робочих місцях перевищує гранично допустиму концентрацію. Особливо в пристовбурових виробках (дозатор, дробілка, опрокид)

Таблиця 1

Результати проб повітря на запиленість в підземних виробках ш. «Октябрська» ПАТ «КЗРК»

Найменування місця відбору проб	Процес	Горизонт, м	Температура, °С	Вологість, %	Фактична запиленість на робочому місці, мг/м ³				
					07.11.2013	12.12.2013	14.04.2014	15.08.2014	09.10.2014
Опрокид	розвантаження	1265	19,6	96	-	2,5	2,4	2,4	2,5
Дробарка	дроблення	1285	19,6	96	-	2,8	2,7	2,5	2,8
Дозатор	завантаження	1318	19,6	96	2,7	-	2,6	2,4	2,6

Високі рівні запиленості, не зважаючи на використання проти пилових респіраторів, спричиняють захворюваність персоналу який обслуговує технологічний процес на силікоз, пиловий бронхіт та інші хвороби.

Захворюваність цими професійними недугами коливається в значних межах.

Так за певними даними на ПАТ «Суша Балка» та ПАТ «КЖРК» і інших підприємствах вона має тенденцію на зростання з 2000 р.

Це приводить до соціальних, прямих і не прямих матеріальних витрат.

Свіже повітря, що надходить на основний горизонт для вентиляції підготовчих й очисних вибоїв, проходить через руд двір. Тому знепилювальній операцій, виконуваних в пристовбурових виробках, необхідно приділяти велику увагу.

Саме розповсюдження пилових потоків в гірничих виробках є проблемою що стоїть перед вирішенням. Для її рішення потрібно розробити математичну модель процесу розповсюдження в виробках з подальшим використанням цих даних для створення заходів по знепиленню.

Таблиця 2

Результати проб повітря на запиленість в підземних виробках ш. «Родіна» ПАТ «КЗРК»

Найменування місця відбору проб	Процес	Горизонт, м	Температура, °С	Вологість, %	Запиленість на робихісцях, мг/м ³		
					05.01.2015	10.02.2015	10.03.2015
Опрокид	розвантаження	1315	19,6	96	2,5	2,5	2,4
Дробарка	дроблення	1335	19,6	96	2,6	2,6	2,7
Дозатор	завантаження	1372	19,6	96	2,4	2,4	2,5

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Визначення відстані на якій буде осідати пил в гірничих виробках, присвячена велика кількість літератури. Але, ефективність визначення цієї відстані залежить від великої кількості факторів які впливають на повітряний потік і теоретично недостатньо обґрунтовано.

Цією проблемою займалися такі вчені: Г.А. Жовтуха, В.І. Стуканов, А.П. Янов, Н.М. Сердюк, Ф.Г. Ващенко та ін.

Для визначення максимальної відстані від місця пилоутворення необхідна розробка математичних моделей, які дозволитимуть в різних діапазонах проводити оцінку динаміки пилових потоків в гірничих виробках та вносити відповідні корективи.

Мета роботи. Математично дослідити та вивести залежність, яку можна використовувати при розрахунку ефективності осідання рудникового пилу різного дисперсного складу в гірничих виробках рудникових шахт.

Викладення матеріалу та результати. В основу теорії процес осідання аерозолів в великій кількості робіт положена закономірність руху окремо взятої пилинки.

На відміну від відомих робіт [8], у цій статті розповсюдження та осідання пилу розглядається на основі статистичних закономірностей, властивих великим сукупностям однотипних об'єктів [12]. Оскільки на дно гірничих виробок осідає значно більше пилу, чим на стінки і особливо покрівлю, то осідання пилу розглядалося тільки під дією гравітаційних сил.

При визначенні закономірностей гравітаційного осідання пилу довжину горизонтальних виробок позначаємо L , висоту H_0 і початкове положення пилинок h_0 . При турбулентному русі на швидкість осідання пилу, що підкоряється закону Стокса і визначається виразом

$$v_c = 2r^2 \rho g / 9\mu \quad (1)$$

де r - радіус пилинки, мм; ρ - густина повітря, кг/м³; μ - динамічна в'язкість повітря, Па·с,

При турбулентному русі потоку на швидкість осідання пилу накладається вертикальна складова швидкості пульсації f , яка підчиняється розподілу Гаусса, тому густина миттєвого розподілу вертикальних швидкостей руху пилинок матиме вигляд

$$\varphi(v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(v_c - v)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (2)$$

σ - поперечна складова середньо квадратичної швидкості пульсації.

Якщо в початковий момент пилінка знаходиться в точці h_0 , то через час τ_0 щільність вірогідності розподілу пилинок по висоті буде

$$\varphi(h) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}(\sigma\tau_0)} \exp\left[-\frac{(h_1 - h_0 + v_c\tau_0)^2}{2(\sigma\tau_0)^2}\right] \quad (3)$$

До множивши вираз (3) на величину інтервала dh_1 , отримаємо перехідну ймовірність із стану h_0 і h_1 , h_1+dh_1

$$\varphi(h_1)dh_1 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}(\sigma\tau_0)} \exp\left[-\frac{(h_1 + h_0 + v_c\tau_0)^2}{2(\sigma\tau_0)^2}\right] dh_0 \quad (4)$$

Ймовірність переходу із стану h_1 в стан (h_2, h_2+dh_2)

$$\varphi(h_2)dh_2 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}(\sigma\tau_0)} \exp\left[-\frac{(h_2 - h_1 + v_c\tau_0)^2}{2(\sigma\tau_0)^2}\right] dh_0 \quad (5)$$

Ймовірність переходу через два стани

$$\varphi'(h_2)dh_2 = \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(h_1)dh_1\varphi(h_2)dh_2 \quad (6)$$

Підставивши в вираз (6) значення з (4) та (5) та про інтегрувати їх, отримаємо

$$\varphi'(h_2)dh_2 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}(\sqrt{2}\sigma\tau_0)} \exp\left[-\frac{(h_2 - h_0 + 2v_c\tau_0)^2}{2(\sqrt{2}\sigma\tau_0)^2}\right] dh_2 \quad (7)$$

через n станів

$$\varphi'(h_n)dh_n = \frac{1}{\sqrt{2\pi}(\sqrt{n}\sigma\tau_0)} \exp\left[-\frac{(h_n - h_0 + 2v_c\tau_0)^2}{2(\sqrt{n}\sigma\tau_0)^2}\right] dh_n \quad (8)$$

Якщо $n\tau_0 = \tau$, а $n = 2f\tau$, то

$$\varphi'(h_n)dh_n = \frac{1}{\frac{\sqrt{2\pi}\sigma\tau}{\sqrt{2f\tau}}} \exp\left[-\frac{(h_n - h_0 + 2v_c\tau_0)^2}{2\left(\frac{\sigma\tau}{\sqrt{2f\tau}}\right)^2}\right] dh_n \quad (9)$$

де n - число на півперіодів коливань; f - частота пульсації.

Ефективність осідання пилу дорівнює вірогідності того, що часточка пилу виявиться в стані $h_n = 0$, тому при постійному початковому розподілі концентрації пилу визначиться виразом

$$\eta = \frac{1}{H_0} \int_0^{H_0} dh_0 \int_{-\infty}^0 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma\tau} \exp\left[-\frac{(h_n - h_0 + 2v_c\tau_0)^2}{2\left(\frac{\sigma\tau}{\sqrt{2f\tau}}\right)^2}\right] dh_n \quad (10)$$

Після інтегрування виразу (10) і перетворень з заміни $\tau = L_0/v$ та $f = \beta v$, де v - швидкість повітря в гірничій виробці, $\beta = 10$ - коефіцієнт пропорційності, отримаємо

$$\eta_1 = \frac{1}{2} \left\{ \begin{aligned} & \left(-\frac{1}{2} + \frac{v_c L_0}{2H_0 v} \right) \Delta \left[\frac{v_c}{\sqrt{2}\sigma} \left(1 - \frac{H_0 v}{v_c L_0} \right) \sqrt{2\beta L_0} \right] - \\ & - \frac{1}{2} \frac{v_c L_0}{H_0 v} \Delta \left(\frac{v_c}{\sqrt{2}\sigma} \sqrt{2\beta L_0} \right) \end{aligned} \right\} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \quad (11)$$

$$\times \left\{ \frac{v_c L_0}{H_0 v} \frac{1}{\frac{v_c}{\sigma} \sqrt{2\beta L_0}} \exp\left[-\frac{v_c^2}{2\sigma^2} \left(1 - \frac{H_0 v}{v_c L_0} \right)^2 2\beta L_0 \right] - \exp\left(-\frac{v_c^2}{2\sigma^2} 2\beta L_0 \right) \right\},$$

де $\Delta(x) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\tau^2} d\tau$ - інтеграл ймовірності.

Якщо враховувати, що в точці H_0 відбувається дзеркальне відображення функції розподілу, то ефективність осідання пилу при цьому буде

$$\eta_2 = \frac{1}{H_0} \int_0^{H_0} dh_0 \int_{2H_0}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \left(\frac{\sigma\tau}{\sqrt{2\beta L_0}}\right)} \exp\left[-\frac{(h_n - h_0 + 2v_c\tau)^2}{2\left(\frac{\sigma\tau}{\sqrt{2\beta L_0}}\right)^2}\right] dh_n. \quad (12)$$

Після інтегрування виразу і деяких перетворень з замінами отримаємо

$$\eta_2 = \frac{1}{2} + \left\{ \begin{aligned} &\left(\frac{1}{2} + \frac{v_c L_0}{2H_0 v}\right) \Delta \left[\frac{v_c}{\sqrt{2\sigma}} \left(1 + \frac{H_0 v}{v_c L_0}\right) \sqrt{2\beta L_0} \right] - \\ &- \left(1 - \frac{v_c L_0}{2H_0 v}\right) \Delta \left[\frac{v_c}{\sqrt{2\sigma}} \left(2 \frac{H_0}{v_c L_0} + 1\right) \sqrt{2\beta L_0} \right] \end{aligned} \right\} + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \times \\ \times \left\{ \begin{aligned} &\frac{v_c L_0}{H_0 v} \frac{1}{\frac{v_c}{\sigma} \sqrt{2\beta L_0}} \exp\left[-\frac{v_c^2}{2\sigma^2} \left(1 + \frac{H_0 v}{v_c L_0}\right)^2 2\beta L_0\right] - \\ &- \exp\left[-\frac{v_c^2}{2\sigma^2} \left(2 \frac{H_0}{v_c L_0} + 1\right) 2\beta L_0\right] \end{aligned} \right\}. \quad (13)$$

Повна ефективність осідання пилу в гірничій виробці буде

$$\eta = \eta_1 + \eta_2 \quad (14)$$

Введемо в формули (11) і (12) безрозмірні параметри Ω та Ψ

$$\Omega = \frac{v_c}{\sigma} \sqrt{2\beta L_0}; \quad \Psi = \frac{H_0 v}{v_c L_0} \quad (15)$$

Підставивши в вираз (13) значення формул (11), (12), (14) отримаємо

$$\eta = 1 - \left\{ \begin{aligned} &\left\{ \left(-\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \frac{1}{\Psi}\right) \Delta \left[\frac{\Omega}{\sqrt{2}} (1 - \Psi) \right] - \frac{1}{2} \frac{1}{\Psi} \Delta \left(\frac{\Omega}{\sqrt{2}} \right) \right\} + \\ &+ \left\{ \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \frac{1}{\Psi}\right) \Delta \left[\frac{\Omega}{\sqrt{2}} (1 - \Psi) \right] - \left(1 + \frac{1}{2\Psi}\right) \Delta \left[\frac{\Omega}{\sqrt{2}} (1 + 2\Psi) \right] \right\} \end{aligned} \right\} - \\ - \left\{ \begin{aligned} &\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\Omega\Psi} \left\{ \exp\left[-\frac{\Omega^2}{2} (1 - \Psi)^2\right] - \exp\left(-\frac{\Omega^2}{2}\right) \right\} - \\ &- \left\{ \exp\left[-\frac{\Omega^2}{2} (1 + \Psi)^2\right] - \exp\left[-\frac{\Omega^2}{2} (1 + 2\Psi)^2\right] \right\} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

При визначенні поперечної складово середньо квадратичної швидкості пульсації можна використати залежність яку запропонували О.Д. Нейков та А.Г. Алексеев [9], яка має вид

$$\sigma = kv\sqrt{\alpha}$$

де α – коефіцієнт аеродинамічного опору, $\text{кгс}\times\text{с}^2/\text{м}^4$, $k = 0,24$ - коефіцієнт пропорційності.

Обчисливши коефіцієнт η можна визначити запиленість повітря C на будь-якій відстані від джерела пилоутворення за формулою

$$C = C_0 \sum_{i=1}^n (1 - \eta_i) m_i \quad (17)$$

де C_0 - початкова запиленість повітря, $\text{мг}/\text{м}^3$; m_i - зміст пилинок цієї фракції по масі в початковому стані; n - кількість фракцій пилу.

Отримані рівняння руху і осідання пилу в гірничих виробках (16), (17) орієнтовані на їх можливу експериментальну перевірку, усі параметри (концентрація і дисперсний склад пилу біля джерела пилоутворення, швидкості повітря та ін.), що входять в них, можуть бути виміряні сучасними приладами або стаціонарними вимірювачами (датчиками).

Висновки і напрямки подальших досліджень. Застосування математичного моделювання процесу осідання пилу в гірничих виробках пристовбурових комплексів, дозволяє визначити основні показники які відповідають за процес його осідання та ефективність.

У подальшому планується проведення науково-пошукових робіт, щодо удосконалення програмного забезпечення по визначенню пиловловлювання в пристовбурових виробках шахт, та розробити дослідний варіант фільтра для уловлювання дрібно дисперсного пилу в гірничих виробках залізрудних шахтах.

Список літератури

1. **Lebecki K.** Zagrozenia pylowe w gornictwie. Katowice: Główny Instytut Gornictwa, 2004. – 399 с.
2. **Szlazak J.** Analiza wypadkowosci w polskim gornictwie wegla kamiennego w latach 1989— 2006// Bezpieczenictwo Pracy Ochrona Srodowiska w Gornictwie, 2007, №9. – 90 с.
3. **Thiemann Manfred.** Messtechnische Ermittlung von Staubquellen und Beurteilung der Wirkung technischer Staubbekämpfungsmassnahmen im Steinkohlenbergbau, 1991, – 109 с.
4. **Алиев Г.М.А.** Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов –М.,«Металлургия», 1986. –544 с.
5. **Бизов В. Ф., Лапшин О. Є.** Охорона праці в гірництві Т. VII. Підручник для студентів вищих навчальних закладів за напрямком «Гірництво». – Кривий Ріг: «Мінерал», 2001. – 251 с., з іл.
6. Борьба с пылью и вредными газами в железорудных шахтах. Под ред. **А.П. Янова.** – М., «Недра», 1984. – 228 с.
7. **Бурчаков А.С., Москаленко Э.М.** Динамика аэрозолей в горных выработках. М., «Наука», 1965.
8. **Воронин В.Н.** Основы рудничной аэрогазодинамики. – М., «Углетехиздат», 1951.492 с.
9. **Гращенков Н.Ф., Петросян А.Э., Фролов М.А.** Рудничная вентиляция. М., «Недра», 1988. – 440 с.
10. **Монин А.С., Яглом А.М.** Статическая гидромеханика. Ч. I. – М., «Наука», 1965. – 639 с.
11. **Нейков О.Д., Алексеев А.Г.** Методическое руководство по расчету необходимого количества воздуха для вентиляции горных выработок. К., «Наукова думка», 1971, – 188 с.
12. Очистка воздуха от пыли на горнорудных предприятиях. Г. А. Жовтуха, В. И. Стуканов, А. П. Янов, Н. М. Сердюк. Киев, «Техніка», 1977. – 150с.
13. Справочник по борьбе с пылью в горнодобывающей промышленности. Под ред. **А.С. Кузьмича.** – М., «Недра», 1982. – 240 с.
14. **Ушаков К.З, Бурчаков А.С., Медведев И.И.** Рудничная аэрология горных предприятий М., «Недра», 1978. – 440 с.
15. **Фукс Н.А.** Механика аэрозолей. М., Изд-во АН СССР, 1955. – 351 с

Рукопис подано до редакції 10.04.15