

## **ЗАХИСТ ПОВІТРЯ НА ПРОМИСЛОВИХ МАЙДАНЧИКАХ ГІРНИЧИХ ПІДПРИЄМСТВ ВІД ЗАБРУДНЕННЯ МІНЕРАЛЬНИМ ПИЛОМ**

*О. Є. Лапшин, докт. техн. наук (Криворізький технічний університет)*

*Предложена математическая модель оценки уровня загрязнения воздуха на промышленных площадках минеральной пылью. Разработана технология создания на поверхностях штабелей горной массы, отвалов вскрышных пород и сухих пляжей шламохранилищ противозерозионного слоя из известковой эмульсии, обеспечивающего защиту воздуха от загрязнения пылью.*

Технологія гірничих робіт при розробці рудних родовищ передбачає накопичення мінеральної сировини у відкритих штабелях, розміщення розкривних порід у відвалах і відходів після збагачення – у шламосховищах.

Така технологія має певні переваги: практично необмежені ємності штабелів, відвалів і шламосховищ; можливість усереднення якості сировини при перевантаженні її з штабелів у вагони; зменшення транспортних затрат завдяки розміщенню відвалів і шламосховищ поблизу кар'єрів і збагачувальних фабрик.

Слід, однак, зазначити, що застосування цієї технології призводить до того, що із землекористування вилучаються значні земельні території. Крім того, поверхні відкритих штабелів, відвалів і сухих пляжів шламосховищ через ерозійні явища стають техногенними джерелами виділення пилу. Численні результати спостережень свідчать про те, що концентрація пилу в повітрі на проммайданчиках шахт і гірничо-збагачувальних комбінатів (ГЗК) Кривбасу перевищує гранично допустимі рівні (ГДК). Ерозійні процеси відбуваються навіть при швидкості вітру 2...2,5 м/с, а при швидкості понад 6 м/с на проммайданчиках виникають пилові бурі, які призводять до забруднення повітря за межами територій промислових підприємств [1]. Таким чином, захист повітря від забруднення мінеральним пилом на проммайданчиках гірничих підприємств є актуальною науково-технічною задачею, результати розв'язання якої можуть бути використані в галузі охорони праці, при розв'язанні соціальних та екологічних проблем.

Метою статті є удосконалення методу розрахунку рівня концентрації пилу у повітрі на проммайданчиках гірничих підприємств та розроблення заходів щодо захисту повітря від забруднення.

На рис. 1, 2 наведено результати спостережень щодо забруднення повітря мінеральним пилом на проммайданчику шахти «Родіна» (Криворізький залізорудний комбінат) внаслідок ерозійних процесів, що відбуваються на поверхні штабелів залізної руди. При швидкості вітру 2,5...8 м/с забруднення повітря спостерігається далеко за межами проммайданчику шахти.

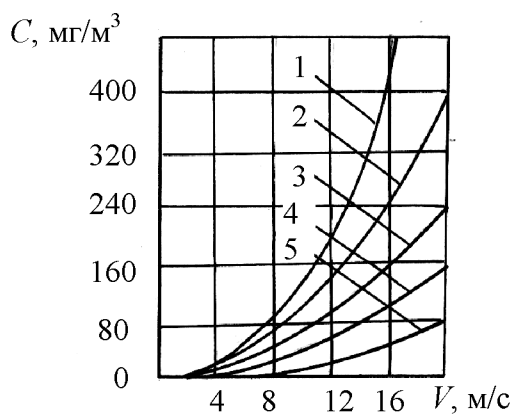


Рис. 1. Зміна концентрації пилу в повітрі  $C$  залежно від швидкості вітру  $V$  та вологості гірничої маси: 1 – гірничча маса суха; 2–5 – вологість 1,5; 2,5; 4,0; 5% відповідно

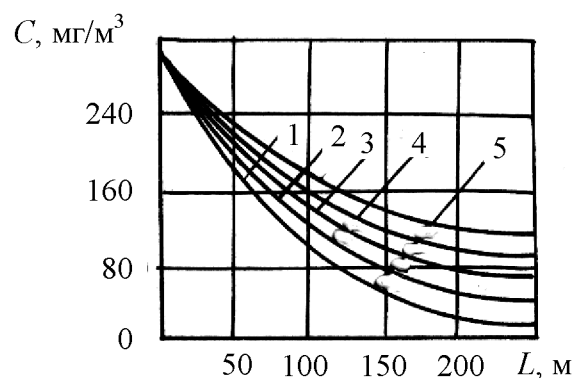


Рис. 2. Зменшення концентрації пилу  $C$  з відстанню до штабеля гірничої маси  $L$  вологістю 3% залежно від швидкості вітру: 1–5 – при швидкості вітру 2,5; 4,5; 6,0; 8,5 м/с відповідно

Результати спостережень можуть бути використані для визначення меж забруднення територій пилом (поблизу майже всіх гірничих підприємств Кривого Рогу розташовані житлові масиви) та розроблення заходів щодо попередження ерозії поверхонь штабелів руди, відвалів та сухих пляжів шламосховищ.

Інтенсивність виділення пилу залежить від швидкості вітру, що діє на поверхню штабеля, відвалу або пляжу шламосховища (див. рис. 1). Згідно з чинними методиками процес атмосферної дифузії пилу ділять на незалежні процеси горизонтальної і вертикальної дифузії [2–4]. При такому припущенні зміна концентрацій у пиловій хмарі описується добутком функцій горизонтального  $G(x,y)$  і вертикального  $W(x,z)$  поширення пилу

$$C(x, y, z) = G(x, y)W(x, z). \quad (1)$$

Для джерел пиловиділення, що мають характерний розмір  $l_0$ , функція горизонтального поширення  $G(x, y)$  має вигляд [4]

$$G(x, y) = \left[1 + \sigma_y^2(x)/l_0^2\right]^{-1} \exp\left\{-y^2/2[l_0^2 + \sigma_y^2(x)]\right\}, \quad (2)$$

де  $x$  – відстань від джерела пиловиділення за напрямком вітру, м;  $y$  – відстань від центра пилової хмари в напрямку, перпендикулярному швидкості вітру, м;  $\sigma_y^2(x)$  – дисперсія відстаней частинок пилу від центра хмари сумішей, що розраховується за формулою [3]

$$\sigma_y^2(x) = (x\sigma_\theta)^2 / (1 + 10^{-4}x). \quad (3)$$

У формулі (3) через  $\sigma_\theta$  позначене середнє квадратичне відхилення вітру від його переважного напрямку, що залежить від класу  $n$  стійкості атмосфери (табл. 1).

Таблиця 1. Параметри стійкості атмосфери

Параметри	Стан атмосфери						
	Стійкість			Нейтральний	Нестійкість		
	сильна	помірна	слабка		слабка	помірна	сильна
Клас стійкості, $n$	I	II	III	IV	V	VI	VII
$\varepsilon$	0,3	0,2	0,1	0	-0,1	-0,2	-0,3
$\sigma_\theta$	0,04	0,04	0,06	0,08	0,11	0,16	0,22

Диференціальне рівняння вертикальної турбулентної дифузії має вигляд [3]

$$\frac{\partial W(x, z)}{\partial x} = \frac{K}{U} \frac{\partial^2 W(x, z)}{\partial z^2}, \quad (4)$$

при початкових і граничних умовах

$$W(0, z) = 0; \quad K \frac{\partial W(x, 0)}{\partial z} = -i\delta(x); \quad W(x, \infty) = 0, \quad (5)$$

де  $W(x, z)$  – концентрація домішок, мг/м<sup>3</sup>;  $z$  – висота поширення пилу над поверхнею території, м;  $K_T$  – усереднений по висоті  $h$  приземного шару повітря коефіцієнт турбулентної дифузії, мг/с;  $\delta(x)$  – імпульсна функція, яка приймає значення

$$\delta(x) = \begin{cases} 1, & \text{для } 0 \leq x \leq L, \\ 0, & \text{для } x > L, \end{cases} \quad (6)$$

де  $L$  – довжина штабеля, відвалу або шламосховища.

Розв'язання диференціального рівняння (4) з умовами (5) класичним або операційним методом Лапласа дає такий результат:

$$W(x, z) = \frac{2i_n}{\sqrt{K_T U}} \begin{cases} \sqrt{x} i\Phi^* \left( z/2\sqrt{U/K_x} \right) & \text{для } x \leq L, \\ \sqrt{x} i\Phi^* \left( z/2\sqrt{U/K_x} \right) - \sqrt{x-L} i\Phi^* \left( z/2\sqrt{U/K(x-L)} \right) & \text{для } x \geq L, \end{cases} \quad (7)$$

де  $i\Phi^*(t)$  – інтеграл від функції помилок Гаусса, що досить добре апроксимується виразом

$$i\Phi^*(t) = 0,5642 \exp \left[ -\left( 1,2t + t^2 \right) \right]. \quad (8)$$

У практичних задачах важливо знати закономірність зміни приземних ( $z \rightarrow 0$ ) концентрацій пилу по осі хмари ( $y = 0$ ), де вони мають бути максимальними для довільної відстані  $x$ .

Розрахункова формула приземних концентрацій з урахуванням формул (1), (2), (7) матиме такий кінцевий вигляд:

$$C(x,0,0) = \frac{1,13}{\sqrt{K_T U}} \left( \sqrt{x_1 + L} - \sqrt{x_1} \right) \left[ 1 + \frac{\sigma_y(x)}{l_0^2} \right]^{-1}, \quad (9)$$

де  $x_1$  – відстань від кінця джерела пиловиділення за віссю хмари, м.

Розрахунок приземних концентрацій пилу з використанням формули (9) здійснюється у такій послідовності.

1. Визначається клас стійкості атмосфери  $n$  за стандартними метеорологічними даними: швидкість вітру  $V_{10}$  на висоті флюгера  $z_{10} = 10$  м, видимість  $S_m$  (км), загальна і нижня хмарність (бали) [5]. За класом стійкості атмосфери  $n$  приймаються безрозмірні параметри  $\varepsilon$  і  $\sigma_\theta$  (див. табл. 1).

2. Для відповідного класу стійкості атмосфери розраховується коефіцієнт турбулентної дифузії  $K_T$  і швидкість вітру  $U$  у приземному шарі за формулами

$$K_T = b U_{10} \cdot 10^\varepsilon \cdot h^{1-\varepsilon} / 2 - \varepsilon, \quad (10)$$

$$U = (V_{10} / (1 + m)) (h/10)^m, \quad (11)$$

де  $m$  – показник, що залежить від швидкості вітру, визначається за експериментальними даними [3].

Наприклад, при шорсткості територій  $Z_\infty = 0,1$  мм показник  $m$  визначається за емпіричною формулою

$$m = 0,28 + (\varepsilon = 0,3)(0,0168 V_{10} + 0,24). \quad (12)$$

3. Для шорсткості  $Z_\infty = 0,1$  м розраховується допоміжний параметр  $b$  за формулою

$$b = 0,01^{-0,37\varepsilon} \cdot 0,217 \left[ 0,38(1 - 4,6\varepsilon \cdot 0,01^{-0,37\varepsilon}) / 1 - \varepsilon \right], \quad (13)$$

за допомогою якого визначається висота приземного шару атмосфери  $h$  [2]:

$$h = 500 \cdot 10\varepsilon b U_{10}. \quad (14)$$

За результатами експериментальних даних, отриманих у лабораторних та промислових умовах, інтенсивність виділення пилу з  $1 \text{ м}^2$  поверхні гірничої маси ( $\text{мг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ) визначається за формулою [7]

$$q_{\text{п}} = K_{\text{п}} K_{\text{в}} l^{-0,25} j U_{10}^{1,75}, \quad (15)$$

де  $K_{\text{п}} = 1,3 \dots 1,6$  – коефіцієнт, який враховує кількість пилових частинок у гірничій масі;  $K_{\text{в}} = 0,2 \dots 0,9$  – коефіцієнт, що враховує вологість гірничої маси;  $\varphi$  – вологість гірничої маси, %.

4. Визначають загальну кількість пилу, яка виділилась з поверхні гірничої маси за певний час:

$$Q_3 = K_3 K_{\text{н}} S_{\text{с}} q_{\text{п}}^t, \quad (16)$$

де  $K_3 = 0,1 \dots 0,9$  – коефіцієнт, що залежить від умов захисту місця зберігання гірничої маси від вітру;  $K_{\text{н}} = 0,17 \dots 0,19$  – коефіцієнт нестационарності дії вітру

на території підприємства;  $S_c$  – середня площа поверхні гірничої маси,  $m^2$ ;  $t$  – час зберігання гірничої маси у відкритому штабелі, год.

5. Після отримання розрахункових величин  $K$ ,  $U$ ,  $q_{\text{п}}$  визначається приземна концентрація пилу в хмаровому викиді на території підприємства та за його межами за формулою (9).

Перевірка запропонованої математичної моделі для визначення концентрацій пилу, що виділяється з поверхонь штабелів відвалів, сухих пляжів шламосховищ здійснювалася шляхом вимірювання забруднення атмосфери пилом на промайданчиках шахт Кривбасу та за їх межами. Розрахункові  $C_p(x_1)$  та експериментальні  $C_e(x_1)$  значення концентрацій пилу наведено в табл. 2.

Таблиця 2. Результати вимірювань і розрахунку концентрацій пилу в атмосфері при зберіганні гірничої маси у відкритих штабелях

Вихідні дані	$V_{10} = 8 \text{ м/с}; \varepsilon = 0; \delta_0 = 0,08; L = 120 \text{ м}; l_0 = 25 \text{ м}$							
Розрахункові значення	$m = 0,168; K = 15,67 \text{ м}^2/\text{с}; U = 10,5 \text{ м/с}; q = 57,08 \text{ мг/м}^2 \cdot \text{с}$							
Відстань від штабеля $x_1$ , м	10	25	50	100	200	300	400	500
$C_p(x_1)$ , мг/м <sup>3</sup>	40,0	28,0	21,7	14,3	8,8	6,7	2,5	1,8
$C_e(x_1)$ , мг/м <sup>3</sup>	35,36	29,18	23,20	16,27	9,21	8,24	3,75	2,59

Порівняння результатів розрахунку з експериментальними даними свідчить про задовільний збіг, причому розрахункові значення, як правило, перевищують дані вимірювань. Це перевищення можна пояснити тим, що деякі фактори – коливання швидкості вітру, більша інтенсивність осадження частинок пилу при взаємодії їх у повітрі, зміна фізичних властивостей повітря – не враховуються в математичній моделі. Однак у даному випадку це не є недоліком, оскільки дещо завищені розрахункові результати забруднення атмосфери спонукають гірничі підприємства застосовувати ефективніші заходи щодо зменшення інтенсивності виділення пилу на промислових територіях.

Як свідчать дані розрахунку та вимірювань, висока концентрація пилу спостерігається не тільки на територіях підприємства, а й далеко за їх межами.

Серед знепилюючих заходів, рекомендованих автором статті до застосування на територіях гірничих підприємств Кривбасу, слід зазначити такі:

1) зволоження до 4...5% верхнього шару гірничої маси на складах, відвалах та сухих пляжах шламосховищ з використанням технічної води у кількості

$$V = q_{\text{в}} S_{\text{зв}}, \quad (17)$$

де  $q_{\text{в}}$  – кількість вологи, що випаровується з  $1 \text{ м}^2$  поверхні за час між періодами зволоження,  $\text{кг/м}^2$ ;  $S_{\text{зв}}$  – площа поверхні, яка зволожується,  $\text{м}^2$ .

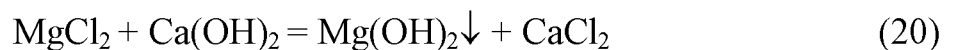
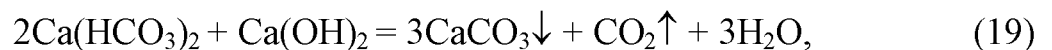
З урахуванням витрати води на зволоження та інтенсивності випаровування вологи час роботи зрошувальної установки

$$T = q_{\text{в}} S_{\text{зв}} / 60 Q_{\text{зр}}, \quad (18)$$

де  $Q_{\text{зр}}$  – продуктивність зрошувальної установки,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

2) нанесення на поверхні, що зазнають вітрової ерозії, пилов'язуючих розчинів (витрата таких розчинів, в залежності від температури повітря, становить 1,0...1,5 л/м<sup>2</sup>). Для цього можуть використовуватись відходи хімічної промисловості: сульфітно-спиртова барда (ССБ), пластифікатор формиатно-спиртовий (ПФС), лужний стік виробництва капролактаму (ЛСПК). Після нанесення цих розчинів на поверхню утворюється тверда кірка, стійка до вітрової ерозії;

3) при тривалому зберіганні гірничої маси в штабелях високу ефективність знепилення її поверхні має вапняна емульсія, яка містить: шахтну воду – 90...95 %; гашене вапно (відходи виробництва ацетилену) – 5...10 % [7]. При змішуванні шахтної води з гашеним вапном солі кальцію та магнію, що містяться у шахтній воді, переводяться у нерозчинні осад за схемою



з утворенням розчину, що має зв'язуючі властивості.

При нанесенні вапняного розчину на поверхню гірничої маси механічним розбризкувачем відбувається змивання пилу, зв'язування його і заповнення порожнин між кусками породи. Під час випаровування води утворюється міцний шар товщиною 5...10 мм. З часом міцність шару збільшується внаслідок випаровування та консолідації карбонату кальцію  $\text{CaCO}_3$  і гідроксиду магнію  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ , що випали в осад. Реакція (19) супроводжується виділенням діоксиду вуглецю  $\text{CO}_2$  та значної кількості тепла.

У результаті реакції (20) утворюється розчин хлориду кальцію  $\text{CaCl}_2$ , який має електролітні властивості. До випарування води хлорид кальцію перебуває в розчиненому (іонному) стані  $\text{Ca}^{2+} + 2\text{Cl}^-$ . За відсутності зовнішнього електричного поля іонна атмосфера симетрична і сили, що діють, взаємно зрівноважуються. При нанесенні розчину на поверхню гірничої маси, відвалу або пляжу шламосховища і контакті його з частинками пилу ця рівновага порушується. Пилкові частинки мають електричний потенціал на своїх поверхнях, що приводить до початку руху різнозаряджених іонів. На поверхні частинок і в розчині відбувається іонний обмін, який діє до залишкової нейтралізації електричного шару на поверхні частинок і відновлення рівноваги.

Після затвердіння зв'язуючого розчину на поверхні гірничої маси утворюються темно-коричневі з зеленуватим відтінком кристали, зчеплені сполуками  $\text{CaCO}_3$  та  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ , які випали в осад. Утворена кірка має добрі гігроскопічні властивості, поглинає вологу з повітря і консолідує оброблену поверхню.

Завдяки електролітним властивостям шахтна вода і створений на її основі розчин мають низьку температуру замерзання  $(-6)...(-8)^\circ\text{C}$ , що розширює область його використання в зимових умовах.

Приготування і застосування захисного розчину здійснюється так. Шахтну воду з розрахунку 2 м<sup>3</sup> змішують з 200 кг гашеного вапна, і отриману емульсію шляхом розбризкування або розливання наносять на поверхню

штабеля, відвалу або сухого пляжу шламосховища у кількості 1,0...1,8 л/м<sup>2</sup>. Захисний шар, що утворюється на поверхні гірничої маси, не руйнується під дією вітру, атмосферних опадів або внаслідок коливання температур.

### Висновки

1. Зберігання гірничої маси у відкритих штабелях, накопичення розкритих порід у відвалах і відходів збагачення в шламосховищах супроводжується видуванням пилу в атмосферу. При швидкості вітру більше 6 м/с на території гірничих підприємств виникають пилові бурі.

2. З урахуванням метеорологічних даних запропоновано математичну модель оцінки забруднення мінеральним пилом атмосфери на території гірничих підприємств.

3. Розроблено засіб захисту поверхні штабеля гірничої маси (відвалу або шламосховища) від видування пилу вітром шляхом нанесення емульсії, яка містить шахтну воду (90...95%) і гашене вапно (5...10%).

4. Захисний шар, який утворюється на поверхні штабеля (відвалу або сухого пляжу шламосховища) протидіє вітровій та водній ерозії, що забезпечує захист повітря від забруднення його пилом.

1. *Лапшин О. Є., Гацький А. К.* Покращення умов праці при переробці мінеральної сировини на залізорудних шахтах // Вісник Криворізького технічного університету. – Вип. 2. – Кривий Ріг: КТУ, 2003. – С. 92–94.

2. *Берлянд М. Е.* Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 448 с.

3. *Бызова Н. Л.* Рассеивание примесей в пограничном слое атмосферы. – М.: Гидрометеиздат, 1974. – 191 с.

4. *Левин А. В.* О диффузии пылегазового облака в пограничном слое атмосферы // Тр. УкрНИИПМПИ, 1976. – Вып. 150. – С. 3–18.

5. *Ткаченко А. В.* Методика расчета приземной концентрации по метеорологическим данным // Тр. УкрНИИПМПИ, 1987. – Вып. 224. – С. 3–14.

6. *Борьба с пылью на открытых горных работах.* – К.: Техніка, 1989. – С. 114–120.

7. *А.с. 1796649, МКИ С 09 К 3/22.* О. Е. Лапшин, В. Г. Слюсаренко, В. А. Берестнев. – Опубл. 23.02.93, Бюл. № 7.