

## ЛОКАЛІЗАЦІЯ ПИЛОВИХ ВИКИДІВ НА ДРОБИЛЬНО-СОРТУВАЛЬНИХ КОМПЛЕКСАХ КАР'ЄРІВ ГІДРОЗРОШУВАЧАМИ

*В.С. Колесник, А.В. Павличенко, Е.А. Агамалієв*  
*Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Україна*

Виконано обґрунтування методу локалізації пилових викидів в атмосферу, що надходять з вузлів пилоутворення на дробильно-сортувальних комплексах кар'єрів із застосування водоповітряних ежекторів – гідрозрошувачів з високоефективним використанням води, розпиленої окремою форсункою. Їх застосування дозволить зменшити поширення пилу за межі санітарно-захисної зони кар'єру.

Переробку видобутих в кар'єрах твердих корисних копалин зазвичай здійснюють на дробильно-сортувальному заводі, що розташовують стаціонарно на поверхні кар'єру (на борту кар'єра або на промисловому майданчику чи промисловій площадці). Переробка, зокрема, передбачає подрібнення гірничої маси в дробарках, її сортування на грохотах, транспортування стрічковими конвеєрами з перевантажуванням із одного конвеєра на інший. Ці процеси супроводжуються значним виділенням пилу в атмосферу, який являє суттєву небезпеку для довкілля [1-4]. При цьому основними джерелами виділення пилу, зокрема виступають: дробильне обладнання; сортувальне обладнання; місця пересипання матеріалу з дробильних механізмів на конвеєри та конвеєрні стрічки, якими переміщують матеріал та готову продукцію [5-9]. При цьому виділення пилу уздовж цього ланцюга змінюються по мірі утворення і переміщення корисного продукту. В такому разі весь ланцюг виглядає як об'єкт виділення пилу [10-12]. Отже вирішення задачі локалізації пилу в межах розташування переробного комплексу попередить його розсіювання в прилеглій зоні, що, зокрема, важливо для гранітних кар'єрів і кар'єрів інших нерудних та будівельних матеріалів, що часто розташовані в безпосередній близькості від житлової забудови [4, 5, 10-12].

Для ефективної локалізації пилових викидів в процесі переробки мінеральної сировини в кар'єрі можуть бути використані відомі засоби пригнічення пилу, наприклад, гідрозрошувачі з використанням розпиленої води. Внесена в запилений повітряний потік краплинна рідина утворює при взаємодії з частинками пилу напіврідкі аерозолі з твердим ядром підвищеної маси, забезпечуючи локалізацію викидів за рахунок підвищення швидкості осідання таких агломератів.

Для визначення реальної картини розсіювання і осідання утвореного при гідрозрошенні аерозолі у вільній атмосфері необхідна оцінка взаємодії частинок пилу з краплями розпиленої рідини в рухомому потоці та ступеню трансформації дисперсного складу пилу й утворених агрегатів.

Проаналізуємо процес взаємодії частинок пилу з краплями води в запиленому повітряному потоці з використанням положень, отриманих з цього питання в роботі [13], що базуються на випадковому характері взаємодії частинок і крапель. Так, імовірність зустрічі частинок пилу радіуса  $r$  з краплями води радіуса  $R$  пропорційна їх кількості в одиниці об'єму, ефективному перетину їх взаємодії  $\pi(r+R)^2$  і ступеня захоплення частинок краплями при певній швидкості їх відносного руху. Тоді для пилових частинок радіуса  $r_i$ , що рухаються відносно крапель розміром  $r_j$  зі швидкістю  $v_{ij}$ , зміна концентрації частинок  $dv_{ij}$  при коефіцієнті захоплення  $E_{ij}$ , котрий враховує ефективність взаємодії кожної частинки і краплі, за проміжок часу  $dt$  дорівнюватиме:

$$dv_{ij} = -v_{ij} N_j \pi (r_i + R_j)^2 v_{ij} E_{ij} dt, \quad (1)$$

де  $v_{ij}$  і  $N_j$  – рахункові концентрації частинок пилу в одиниці об'єму, взаємодіючих з краплями рідини  $j$ -го розміру, і цих крапель, відповідно.

Розділивши змінні, отримаємо:

$$\frac{dv_{ij}}{v_{ij}} = -N_j \pi (r_i + R_j)^2 v_{ij} E_{ij} dt.$$

Інтеграл цього рівняння при початковій (до зрошення) рахунковій концентрації частинок пилу  $v_{ij} = v_{ij}(0)$  при  $t=0$  має вигляд:

$$P_{ij} = \frac{v_{ij}}{v_{ij}(0)} = \exp \left[ -\pi (r_i + R_j)^2 \int_0^t N_j v_{ij} E_{ij} dt \right]. \quad (2)$$

Вираз (2) визначає імовірність того, що частинка радіусом  $r_i$  не вловлюється краплями радіуса  $R_j$  за час  $t$ . Оскільки уловлювання пилових частинок краплями різного розміру – процес незалежний, ймовірність того, що частинки  $i$ -ої фракції не будуть вловлюватись краплями всіх розмірів запишеться як добуток відповідних ймовірностей:

$$P_i = P_{i1} \cdot P_{i2} \cdot \dots \cdot P_{im}$$

або

$$P_i = \frac{v_i}{v_i(0)} = \exp \left[ -\pi \sum_{j=1}^m (r_i + R_j)^2 \int_0^t N_j v_{ij} E_{ij} dt \right]. \quad (3)$$

Очевидно, що відносна частка частинок  $i$ -ої фракції пилу, що чисельно дорівнює  $P_i$ , продовжить свій рух, осідаючи з потоку пропорційно швидкості свого осідання (витання) в повітрі. Уловлені ж частинки, частка яких складає  $1 - P_i$ , утворюють з краплями агрегати у вигляді напіврідких частинок з твердим ядром. Швидкість їх осідання (витання) у повітрі прямо пропорційна розмірам та масі частинок-агрегатів, що утворилися, тому інтенсивність їх осідання істотно вище.

Рахункові концентрації частинок пилу у формулі (3) зазвичай змінюють на масові, а крапель – на об'ємні, вважаючи їх сферичними:

$$v_i = \frac{3n_i}{4\pi\rho r_i^3}; v_i(0) = \frac{3n_i(0)}{4\pi\rho r_i^3}; N_j = \frac{3V_j}{4\pi R_j^3},$$

де  $n_i$  – кінцева, а  $n_i(0)$  початкова масова концентрація  $i$ -ої фракції пилу,  $\text{мг/м}^3$ ;  $\rho$  – густина речовини пилу,  $\text{кг/м}^3$ ;  $V_j$  – об'єм крапель  $j$ -ї фракції,  $\text{дм}^3/\text{м}^3$ .

З урахуванням дисперсного розподілу фракцій пилу та крапель вважають:

$$n_i(0) = \xi_i n(0), \text{ а } V_j = \psi_j V. \quad (4)$$

де  $\xi_i$  – масова частка  $i$ -ої фракції;  $n(0)$  – початкова загальна масова концентрація частинок пилу всіх розмірів,  $\text{мг/м}^3$ ;  $\psi_j$  – об'ємна частка крапель  $j$ -ої фракції;  $V$  – загальна об'ємна концентрація крапель всіх розмірів,  $\text{дм}^3/\text{м}^3$  ( $\text{л/м}^3$ ).

Оскільки  $\frac{v_i}{v_i(0)} = \frac{n_i}{n_i(0)}$ , вираз може бути переписано у вигляді:

$$P_i = \exp \left[ -\frac{3}{4} \sum_{j=1}^m \frac{(r_i + R_j)^2}{R_j^3} \int_0^t V_j v_{ij} E_{ij} dt \right]. \quad (5)$$

Тут складова  $(r_i + R_j)^2 / R_j^3$  визначає ступінь дисперсності крапель, що впливає на ефективність захоплення, тобто її зустрічі з частинкою пилу, а сума від 1 до  $m$  характеризує питому поверхню розпиленої рідини.

Масова доля частинок пилу всіх  $k$  фракцій, не захоплених краплями рідини всіх розмірів, представляється як:

$$P = \sum_1^k n_i / \sum_1^k n_i(0) = \sum_1^k n_i / n(0) = \sum_1^k P_i n_i(0) / n(0).$$

Підставлення в останній вираз формули (5), з урахуванням (4), дає:

$$P = \sum_{i=1}^k \xi_i \exp \left[ -\frac{3}{4} \sum_{j=1}^m \frac{(r_i + R_j)^2}{R_j^3} \int_0^t \psi_j V \cdot v_{ij} E_{ij} dt \right]. \quad (6)$$

Стосовно розв'язуваної задачі, формула (6) характеризує відносний вміст маси частинок пилу в одиниці об'єму повітря, не захоплених краплями, тобто пилу, що залишиться сухим, при випадковому характері взаємодії його частинок з розпиленою в потоці рідиною. Очевидно, що величина  $1-P$  буде дорівнювати відносному вмісту змоченого пилу. З урахуванням цього, задачу розсіювання частинок в атмосфері можна вирішувати окремо для сухого і для змоченого пилу, а загальне рішення представити як суперпозицію цих часткових рішень.

Практичне використання отриманих формул вимагає врахування загальної концентрації всіх крапель розпиленої рідини  $V$ , яка визначається: фактичним дисперсним складом крапель, що залежить від типу зрошувача та тиску рідини, що в нього подається; рахунковою (масовою) концентрацією частинок пилу; коефіцієнтом захоплення частинок краплями та продуктивністю зрошувача, що залежить від його конструкції.

Проаналізуємо деякі з наведених чинників для наступного їх урахування. Так, оцінити дисперсний склад крапель у факелі певної зрошувальної форсунки можливо оцінити експериментально безпосередньо в потоці за методикою [14]. Суть її полягає в пропущенні когерентного (лазерного) пучка світла через контрольоване дисперсне середовище (факел розпиленних крапель або пробу пилу), а про середній розмір частинок, що аналізуються, судять за розміром центральної світлої плями дифракційної картини, що одержують на екрані, розміщеному на достатньому віддаленні від лазера.

Визначення дисперсного складу пилу також здійснюють за цією методикою. Для цього попередньо готується проба пилу, як для традиційного мікроскопічного аналізу, характерного для певного технологічного процесу [15]. При цьому скляну пластинку змащують тонким шаром вазеліну. Підготовлену у такий спосіб пластинку на короткий час поміщають в запилений потік для налипання частинок. Отриману пробу пилу накривають чистим покривним склом і в лабораторних умовах розміщують на шляху лазерного пучка замість розпилювача води, для визначення розмірів частинок.

Зауважимо, що після оцінки розмірів частинок (пилу і крапель) обчислюють необхідну величину  $(r_i + R_j)^2 / R_j^3$ , що входить у формули (5) або (6), зокрема, для характерних розмірів частинок пилу.

Стосовно концентрації частинок пилу відмітимо, що її визначають широко розповсюдженим гравіметричним методом [16, 17].

Визначення коефіцієнта захоплення частинок пилу краплями води – більш складне завдання. При ряді допущень його величина визначається зі спільного рішення рівняння нерозривності потоку і рівняння руху частинки в системі координат, пов'язаній з обтічною краплею. Не наводячи цих рівнянь, як приклад, відобразимо на тривимірному графіку (рис. 1) значення коефіцієнта захоплення  $E_{ij}$  частинок краплями води радіуса  $R_j$ , наприклад: 20 мкм, при різних швидкостях їх взаємного руху. Причому, для відображення вибрані значення ефективності захоплення частинок пилу діаметром від 2 до 60 мкм краплями, що, зокрема, утворюються при роботі конусної форсункою типу КФ 7,5-40 з мінімальним тиском води при відносній швидкості руху частинок від 5 до 40 м/с.

Аналіз представлених на рис. 1 залежностей показує, що найбільша ефективність взаємодії частинок з краплями спостерігається в області майже горизонтального плато, що займає найбільшу поверхню тривимірного графіка, де  $E_{ij}$  змінюється в межах 0,95-1. Така величина характерна для високої відносної швидкості, великих частинок пилу та дрібних крапель. Зниження швидкості та розмірів частинок від максимальних значень, а також збільшення

розміру крапель призводить до переміщення значень  $E_{ij}$  з цього плато в ліву передню область тривимірного графіка до певного мінімуму.

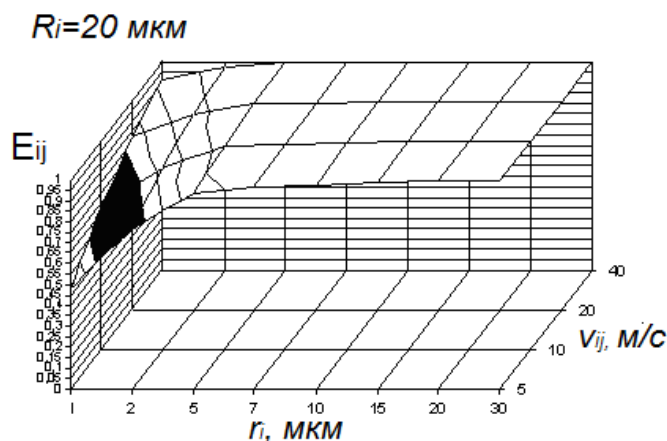


Рис. 1. Залежність ефективності захоплення частинок різного радіусу  $r_i$  краплями при різній відносній швидкості їх руху  $v_{ij}$  для крапель радіуса  $R_j=20$  мкм (діаметр крапель  $2 R_j$  відповідно дорівнює 40 мкм)

При внесенні розпиленої води в запилений потік високі значення відносної швидкості частинок і крапель спостерігаються у факелі розпилу гідрофорсунки, де зазвичай і відбувається найбільш ефективно їх взаємодія. На більшій відстані краплі підхоплюються потоком, набуваючи його швидкості. В результаті, відносні швидкості частинок і крапель в поздовжньому напрямку потоку падають практично до нуля.

Для узагальнення виконаного теоретичного аналізу були розраховані залежності коефіцієнта захоплення частинок краплями від розмірів частинок пилу, що очікуються при зрошенні запиленого повітряного струменя, швидкість якого постійна (рис. 2).

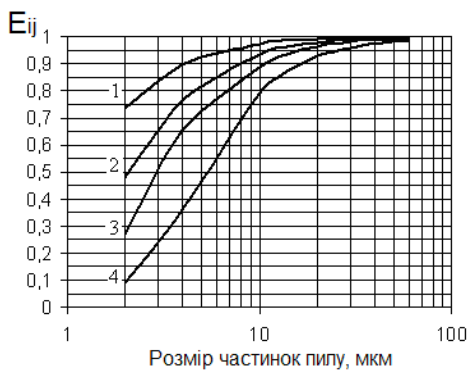


Рис. 2. Залежності коефіцієнта захоплення частинок краплями –  $E_{ij}$  від розмірів частинок при відносній швидкості їх руху 5 м/с: 1, 2, 3, 4 – для діаметрів крапель 10; 40; 100 і 600 мкм, відповідно

Ці залежності використовувалися для визначення розміру напіврідких частинок-агрегатів і частинок пилу, не захопленої краплями, тобто їх дисперсного складу, як важливого показника, необхідного для розрахункового визначення фактичних полів розсіювання і осідання пилу у вільній атмосфері, як за стандартизованою методикою [18], так і за методикою розробленою авторами для полідисперсних частинок, яка реалізована в програмному пакеті «Scilab» [19]. Остання методика дозволяє шляхом обчислювального експерименту на математичній моделі отримувати двовимірні діаграми розсіювання і осідання частинок у напрямку вітру при певній інтенсивності пилового викиду, г/с (в точці з визначеними територіальними координатами), швидкості вітру, м/с, при найбільш характерному коефіцієнті дифузії,  $m^2/s$ , та дисперсному складі частинок, що задається у формі таблиці.

Зіставлення діаграм інтенсивності осідання пилового викиду в атмосферу на території, що оточує кар'єрний дробильно-сортувальний комплекс до і після застосування зрошування для пригнічення пилу в найбільш небезпечних вузлах дозволяє визначити ефективність локалізації пилового викиду з указаного комплексу за ступенем переміщення області найбільшої інтенсивності осідання пилу у бік цього комплексу, тобто локалізується поблизу нього.

Тепер щодо продуктивності зрошувача, яка очевидно залежить від його конструкції. Перспективним, на наш погляд, є використання установок типу водоповітряний ежектор (ВПЕ), який являє собою гідрозрошувач з підвищеною ефективністю використання окремої гідрофорсунки, розроблений за участю авторів для пригнічення пилу, схема якого наведена на рис. 3 а. Це пристрій в якому робочим (ежекційним) середовищем служить вода, що подається під тиском до сопла гідрофорсунки 2, на виході з якої вона набуває великої швидкості і розпилюється на дрібні краплі. Виходячи з сопла у приймальну камеру змішування 3, струмінь води захоплює за собою запилене повітря, яке надходить через конфузур 1, після чого суміш потрапляє в камеру змішування 3 і дифузур 5, де і відбувається імовірнісний процес взаємодії частинок пилу з краплями води.

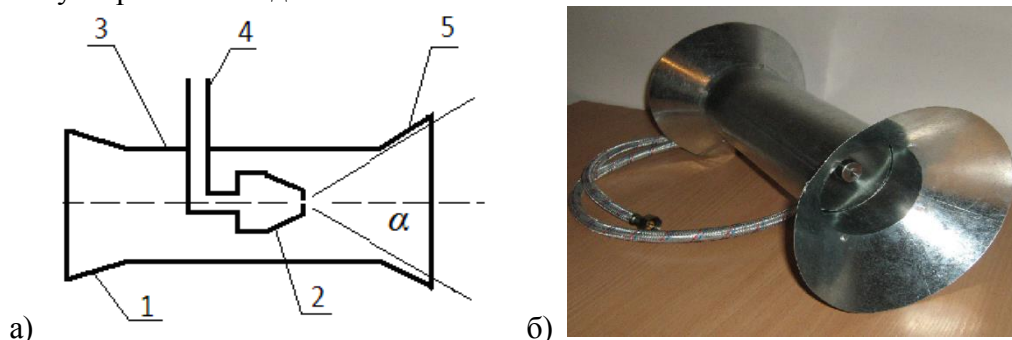


Рис. 3. Експериментальний зразок водоповітряного ежектора (ВПЕ): а) – схема ежектора (1 – конфузур, 2 – гідрофорсунка, 3 – камера змішування, 4 – штуцер, 5 – дифузур); б) – загальний вигляд

Таким чином, на виході з форсунки утворюється конусний водоповітряний струмінь, кут розкриття якого ( $\alpha$ ) практично дорівнює куту конуса дифузора. Завдяки цьому утворюються умови, необхідні для ежекції забрудненого пилом повітря в приймальну камеру, та для динамічної взаємодії частинок пилу і крапель розпиленої рідини, що на виході з ВПЕ призводить до інтенсивної коагуляції і осадження укрупнених частинок-агрегатів (рідина + частинка пилу).

Вибір оптимального режиму роботи ВПЕ залежить від характерних розмірів утворених частинок пилу, що визначаються параметрами дробильно-сортувального устаткування в кар'єрі, тобто тиск і витрати води ВПЕ регулюють для кожного окремого вузла.

Приклад розміщення водоповітряного ежектора (ВПЕ) при завантаженні подрібненої маси з бункера на конвеєр наведена на рис. 4.

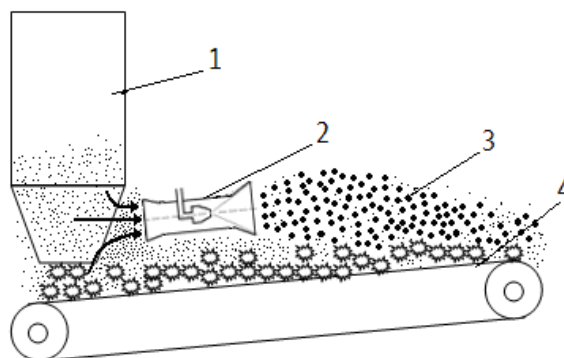


Рис. 4. Варіанти розміщення водоповітряного ежектора (ВПЕ) при завантаженні подрібненої маси з бункера на конвеєр: 1 – подрібнювач, 2 – ВПЕ, 3 – укрупнені аерозольні комплекси –

«рідина + пилова частинка», 4 – конвеєр, стрілками показано напрям руху запиленого повітря, що ежектуються ВПЕ)

Таким чином, застосування ВПЕ у вузлах пилоутворення на дробильно-сортувальному комплексі дозволить зменшити поширення пилу за межі СЗЗ при несприятливих метеорологічних умовах. Зауважимо, що ВПЕ є мобільним за конструкцією, проте потребує джерела води з певним тиском.

Підводячи підсумки виконаного обґрунтування методу локалізації пилових викидів в атмосферу, що надходять з вузлів пилоутворення на дробильно-сортувальних комплексах кар'єрів, із застосування водоповітряних ежекторів (ВПЕ) – гідрозрошувачів з високоефективним використанням розпиленої води, дозволить зменшити поширення пилу за межі СЗЗ кар'єру, мінімізувати вплив пилу на його території та в перспективі зменшити розміри СЗЗ.

#### Список літератури

1. Симоненко, В.И., Черняев, А.В. (2017). Оптимизация применения технологических схем транспортирования горной массы при разработке гранитных месторождений. Збірник наукових праць НГУ. Дніпро: ДВНЗ «НГУ». (52), 109-114. <http://znp.nmu.org.ua/pdf/2017/52/15.pdf>

2. Симоненко, В.І., Павличенко, А.В., Черняєв, О.В., Гриценко, Л.С. (2017). Технологічні аспекти екологозберігаючої доробки нерудних кар'єрів при їх ліквідації та консервації. Вісник національного університету водного господарства та природокористування: Зб. наук. пр., (2), 148-158.

3. Юрченко, А.А. (2013). Исследование коэффициента захвата аэрозольных частиц каплями воды при орошении. Зб. наук. праць НГУ, (39), 187-194.

4. Юрченко А.А. Методика определения параметров скважинных зарядов для снижения пылегазовых выбросов при массовых взрывах в карьерах / А.А. Юрченко // Зб. наук. праць НГУ. – Д.: РВК НГУ, 2006. – № 26, Т. 2. – С. 67 – 75.

5. Симоненко, В.І., Павличенко, А.В., Черняєв, О.В., Гриценко, Л.С. (2015). Екологозберігаючі технології розробки родовищ в умовах зменшеної санітарно-захисної зони. Розробка родовищ, (9), 469-476.

6. Симоненко, В.І., Анісімов, О.О., Руденко, Б.В., & Стріха, В.А. (2014). Щодо оцінки пилоутворення при переробці сировини і відвантаженню продукції нерудних кар'єрів / Вісник національного університету водного господарства та природокористування: зб. наук. праць. Рівне, (65), 458-466. <http://ep3.nuwm.edu.ua/1422/>

7. Симоненко, В.І., Гриценко, Л.С. (2014). Оцінка технології відпрацювання нерудних кар'єрів з підтриманням безпеки в зменшеній санітарно-захисній зоні. Металлургическая и горнорудная промышленность, (1), 80-85.

8. Симоненко, В.І., Черняєв, О.В., Гриценко, Л.С. та інш. (2011). Экологически безопасные и энергосберегающие технологии разработки нерудных полезных ископаемых. Экология и промышленность. (3), 46-53.

9. Симоненко, В.І., Черняєв, О.В., Гриценко, Л.С. (2017). Технологічні аспекти еколого- та ресурсозберігаючих технологій відпрацювання прирощених запасів при ліквідації нерудних кар'єрів. Збірник наукових праць НГУ, (50), 92-100.

10. Мальований, М.С., Петрушка, І.М., Малик, Ю.О. та ін. (2013). Перспективність використання природних сорбентів для забезпечення екологічної безпеки водноресурсного потенціалу держави. Науковий вісник НЛТУ України, 23(4), 68-75.

11. Симоненко В.И. Обґрунтування критеріїв визначення ефективності технологічної схеми застосування дробильно-сортувальних комплексів на кар'єрах будівельних матеріалів [Текст] / В.И. Симоненко, А.В. Мостика, В.Д. Кірнос / Зб. наук. праць НГУ. - Дніпропетровськ: РВК НГУ, 2008. – №31. – С. 69-75.

12. Грищенко, Л.С. (2008). Исследование организации горных работ при применении мобильных дробильно-сортировочных комплексов на нерудных карьерах. Зб. наук. праць НГУ, (30), 77-82.
13. Смачивание пыли и контроль запыленности воздуха в шахтах / Под ред. Г.Д. Лидина. – М.: Наука, 1979. – 196 с.
14. Лекционные эксперименты по оптике: Учебное пособие / С.Н. Пеньков, В.А. Полищук, О.М. Марченко, В.С. Михалев. – Под ред. Н.И. Колитеевского. – Л.: Изд – во Ленинградского ун – та, 1981. – 160 с.
15. Недин, В.В., Нейков, О.Д. (1967). Современные методы исследования рудничной пыли и эффективность противопылевой вентиляции. Недра, 169 с.
16. Инструкция по контролю запыленности воздуха на предприятиях горнорудной и нерудной промышленности. – М.: Недра, 1981. – 18 с.
17. Методические указания на гравиметрическое определение пыли в воздухе рабочей зоны и в системах вентиляционных установок № 1719 – 77 / Утверждены 18.04.77 г. – М.: Изд-во стандартов, 1979. – 18 с.
18. Методика расчета концентрации в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. ОНД-86. Госкомгидромед. – Л.: Гидрометеоиздат, 1987. – 94 с.
19. Колесник, В.Е., Головина, Л.А. (2008). Моделирование процесса распространения пылевого выброса шахтного вентилятора главного проветривания с учетом дисперсного состава и диффузии пыли. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. 29(1), 137-144.
20. Колесник, В.Е., Левченко, М.В., Клочков, В.Г. (2009). Особенности локализации пылевых выбросов в атмосферу гидроорошением. Збірник наукових праць НГУ, (32), 235-245.