

# EXPERIMENTAL PHYSICS

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПИЛОУТВОРЕННЯ

**Біляєв М.М.**

*д.т.н., професор,  
кафедра «Гідравліка, водопостачання та фізика»  
Український державний університет науки і технологій  
<https://orcid.org/0000-0002-1531-7882>*

**Козачина В.А.**

*к.т.н., доцент,  
кафедра «Гідравліка, водопостачання та фізика»  
Український державний університет науки і технологій  
<https://orcid.org/0000-0002-6894-5532>*

**Кіріченко П.С.**

*к.т.н., доцент,  
кафедра «Теплогазоводопостачання, водовідведення і вентиляція»  
Криворізький національний університет  
<https://orcid.org/0009-0007-4031-7693>*

**Біляєва В.В.**

*д.т.н., професор,  
кафедра «Енергетичні системи та енергоменеджмент»  
Український державний університет науки і технологій  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2399-3124>*

**Берлов О.В.**

*к.т.н., доцент,  
кафедра «Охорона праці, цивільна та промислова безпека»  
Український державний університет науки і технологій  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7442-0548>*

## MODELING OF THE DUST FORMATION PROCESS

**Biliaiev M.,**

*D. Sc. (Tech.), Prof.,  
dep. «Hydraulics, Water Supply and Physics»  
Ukrainian State University of Science and Technologies  
<https://orcid.org/0000-0002-1531-7882>*

**Kozachyna V.,**

*Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,  
dep. «Hydraulics, Water Supply and Physics»  
Ukrainian State University of Science and Technologies  
<https://orcid.org/0000-0002-6894-5532>*

**Kirichenko P.,**

*Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,  
dep. «Heat, Gas, Water Supply, Water Drainage and Ventilation»  
Kryvyi Rih National University  
<https://orcid.org/0009-0007-4031-7693>*

**Biliaieva V.,**

*D. Sc. (Tech.), Prof.,  
dep. «Energy Systems and Energy Management»  
Ukrainian State University of Science and Technologies  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2399-3124>*

**Berlov O.**

*Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,  
dep. «Labor Protection, Civil and Technogenic Safety»  
Ukrainian State University of Science and Technologies  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7442-0548>*

**Анотація**

Зберігання сипучих матеріалів на промислових майданчиках приводить до суттєвого пилового забруднення робочих зон. Важливою задачею є дослідження закономірностей пилоутворення та забруднення повітря при різних метеоумовах на промислових майданчиках. В статті наведено результати проведених експериментальних досліджень по визначенню інтенсивності емісії пилу від ділянки з вугіллям. Дослідження проведено для різної швидкості повітряного потоку. Отримано емпіричну модель, що дає можливість оцінювати інтенсивність пилоутворення на промислових майданчиках. Визначено закономірність зміни концентрації вугільного пилу на різній відстані від ділянки з вугіллям. Розроблено дві чисельні для прогнозування пилового забруднення повітря на промислових майданчиках. Моделі базуються на використанні кінцево-різницевої схем розщеплення для інтегрування багатовимірного рівняння масопереносу.

**Abstract**

The storage of bulk materials at industrial sites leads to significant dust pollution in work areas. An important task is to study the patterns of dust formation and air pollution under various weather conditions at industrial sites. The article presents the results of experimental studies to determine the intensity of dust emissions from a coal site. The study was conducted for different air flow speeds. An empirical model was obtained that makes it possible to estimate the intensity of dust formation at industrial sites. The pattern of change in coal dust concentration at different distances from the coal site was determined. Two numerical models were developed to predict dust pollution of the air at industrial sites. The models are based on the use of finite difference splitting schemes to integrate a multidimensional mass transfer equation.

**Ключові слова:** пилове забруднення, промисловий майданчик, фізичний експеримент, емпірична модель, чисельне моделювання.

**Keywords:** dust pollution, industrial site, physical experiment, empirical model, numerical simulation.

**Вступ**

Проблема забруднення повітря вугільним пилом привертає до себе увагу в різних країнах світу, що пов'язано з добуванням вугілля, його транспортування та зберіганням на територіях промислових об'єктів [1, 4, 10]. Зберігання вугілля на промислових майданчиках супроводжується інтенсивним виносом з них вугільного пилу і, як наслідок, забрудненням повітря та підстильної поверхні в робочих зонах.

У зв'язку з цим актуальним завданням є розробка методів, які спрямовані на визначення закономірностей пилоутворення та зниження рівня забруднення навколишнього природного середовища при зберіганні вугілля на промислових майданчиках.

Для рішення таких складних задач широко використовується метод фізичного моделювання [1, 5-8] та метод математичного моделювання на базі чисельних моделей [1-3]. Але, в даний час неможливо казати про вирішення усього комплексу складних задач, що пов'язані з прогнозуванням пилового забруднення на промислових майданчиках. Актуальною задачею залишається розробка ефективних математичних моделей, що відносяться до

групи «operational models», що дозволяють оперативно, за короткий час, отримувати дані щодо інтенсивності процесів пилоутворення та формування областей пилового забруднення на промислових майданчиках.

**Мета**

Метою даної роботи є:

- експериментальне дослідження процесу пилоутворення при різній швидкості повітряного потоку;
- розробка чисельних моделей для прогнозування пилового забруднення повітря на промислових майданчиках.

**Методика**

Дослідження проводилися лабораторним шляхом. Для побудови чисельних моделей пилового забруднення повітря на промисловому майданчику використовувалися кінцево-різницеві схеми чисельного інтегрування фундаментальних рівнянь механіки суцільного середовища.

Для проведення експериментальних досліджень використовувалося вугілля з Павлоградського району Дніпропетровської області (Україна). Експериментальна установка розташовувалася на столі, потік повітря створювався за рахунок використання повітрорудки (рис. 1).

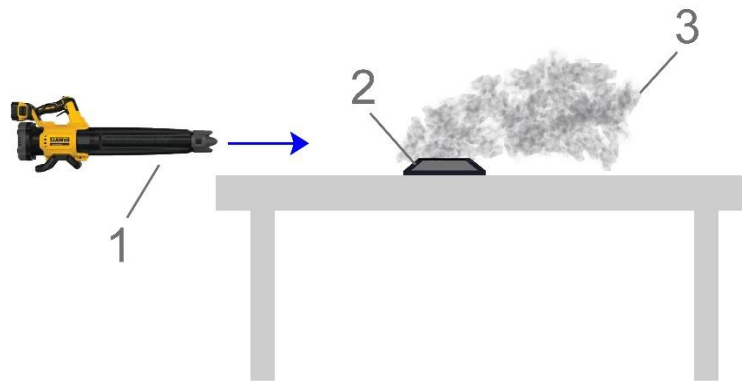


Рис. 1. Схема експериментальної установки:  
1 – повітрорудка; 2 – область розташування вугілля; 3 – пилова хмара

Фото дослідної установки показана на рис. 2.

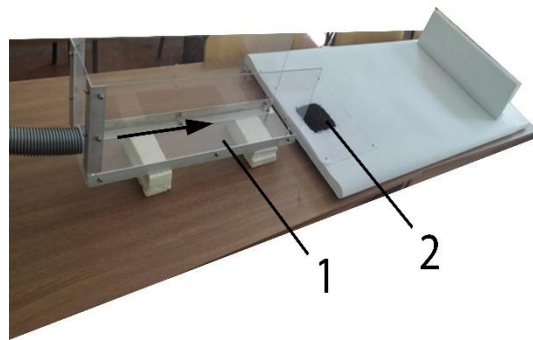


Рис. 2. Дослідна установка: 1 – повітряний короб від повітрорудки; 2 – вугілля

Вугілля розташовувалося в межах прямокутника (площинне джерело забруднення), його розміри: 10см×10см, висота вугілля 0,5 см. Експеримент виконувався при температурі повітря 20 °С, вологість повітря 63 %. При проведенні експериментів, за критерій подібності приймалось число Рейнольдса:

$$Re = \frac{V \cdot L}{\nu}$$

де  $V$  – швидкість набігаючого потоку повітря,  $\nu = 15,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  – кінематичний коефіцієнт в'язкості.

В якості лінійного масштабу  $L$  приймалася довжина моделі майданчику, тобто  $L = 10 \text{ см}$ .

Для вимірювання швидкості повітряного потоку використовувався анемометр НТ-9830 (рис. 3). Концентрація пилу (PM2.5) вимірювалася за допомогою вимірювача WP6910. При проведенні експерименту здійснювалася відеозйомка.



Рис. 3. Анемометр НТ-9830

На першому етапі досліджень вимірювалася маса вугільного пилу, що виносилася з моделі майданчику за певний час (120 с). Далі здійснювався «збір» пилу, що був винесений з майданчику (рис. 4) та проводилося його зважування. Дана процедура повторювалася для різної швидкості набігаючого повітря.

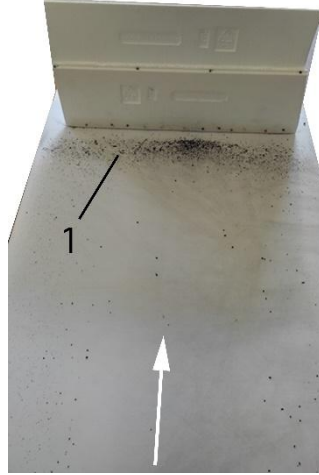
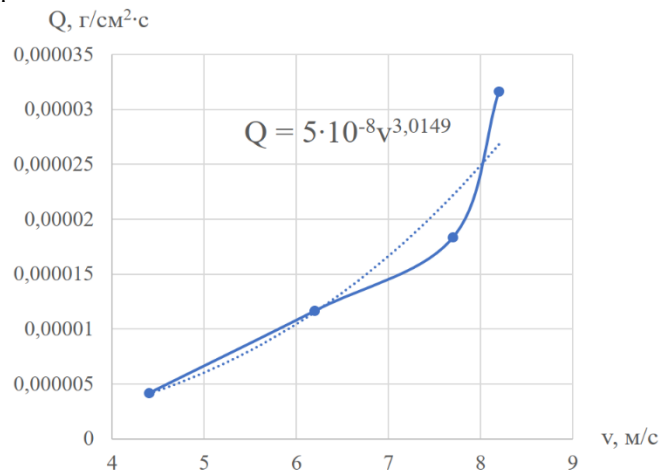


Рис. 4. Вугільний тил, що був винесений з моделі майданчика:  
1 – область забруднення

Результати обробки даних експериментальних вимірювань показано на рис. 5. На цьому рисунку наведено залежність інтенсивність пилоутворення при різній швидкості набігаючого потоку повітря. Так як вимірювання здійснювалися при турбулентному режимі, то анемометр показував певний діапазон швидкості повітряного потоку. При обробці даних розраховувалось середнє значення швидкості повітряного потоку, що наведено на рис. 5.



Рису.5. Інтенсивність пилоутворення при різній швидкості повітряного потоку

Результати експериментальних досліджень показали, що початок відриву часток вугільного пилу починається при швидкості повітряного потоку порядку  $v_s=3.9\div 4.2$  м/с. Тобто, при розробці заходів по зменшенню процесу пилоутворення на промисловому майданчику (наприклад, при використанні захисних екранів) потрібно забезпечити швидкість повітряного потоку на промисловому майданчику не більше цієї величини.

Дані на рис. 6 показано, що пилоутворення різко зростає при швидкості повітряного потоку більше 7 м/с.

Обробка даних експериментів дає наступну емпіричну залежність для визначення інтенсивності пилоутворення при різній швидкості повітряного потоку:

$$Q = 5 \cdot 10^{-8} \cdot v^{3.0149}, \frac{g}{c \cdot cm^2} \quad (1)$$

де  $Q$  – інтенсивність виносу вугільного пилу;  $V$  – швидкість повітряного потоку, м/с.

Емпіричну модель (1) можна використовувати при проведенні досліджень методом чисельного моделювання з метою прогнозування рівня пилового забруднення робочих зон на промислових майданчиках.

На другому етапі досліджень вимірювалася концентрація пилу PM2.5 на висоті 10см та різній відстані від площинного джерела пилового забруднення. Вимірювання здійснювалось також при різній швидкості набігаючого повітряного потоку. Так як вимірювання здійснювалось при турбулентному режимі, то детектор концентрації пилу показував певний діапазон вимірюваної величини. При обробці даних розраховувалось середнє значення концентрації пилу з діапазону, що показував детектор.

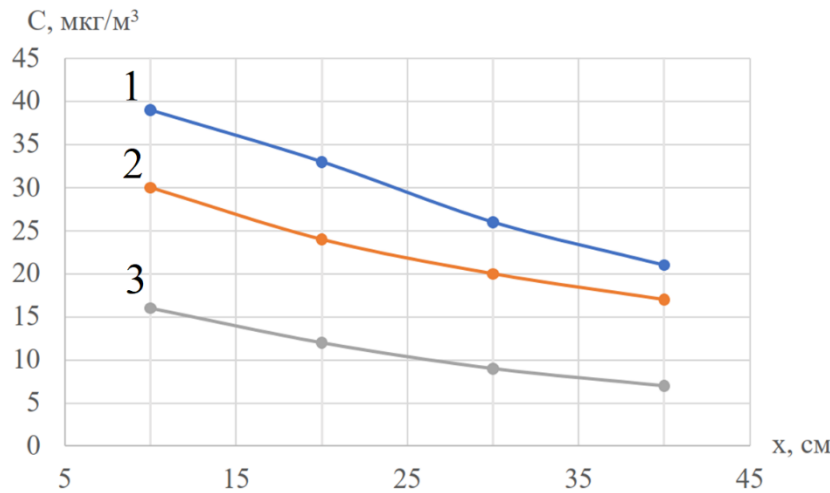


Рис.6. Концентрація пилу (PM2.5) на різній відстані від області пилоутворення:  
1 –  $V=8.2$  м/с; 2 –  $V=7.7$  м/с; 3 –  $V=4.5$  м/с

Як можна бачити з рис. 6, концентрація пилу зменшується практично в 2 рази на відстані  $4L$  від джерела забруднення.

На наступному етапі було розроблено дві чисельні моделі для прогнозування пилового забруднення повітря на промислових майданчиках. Моделююче рівняння має вигляд:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial (v-w)C}{\partial y} = \text{div}(\mu \cdot \text{grad}C) + \sum_{i=1}^N Q_i(t)\delta(x-x_i)\delta(y-y_i), \quad (2)$$

де  $C$  – значення концентрації пилу;  $u, v$  – компоненти вектору швидкості повітряного потоку в проекції на осі координат  $x, y$ , відповідно;  $w$  – швидкість гравітаційного осадження пилу;  $x_i, y_i$  – декартові координати  $i$ -ого точкового джерела емісії пилу;  $t$  – час;  $\mu_x, \mu_y$  – коефіцієнти турбулентної дифузії;

$\delta(x-x_i)\delta(y-y_i)$  – дельта функція Дірака, за допомогою якої в моделі задається місце емісії пилу. Інтегральність емісії пилу дорівнює  $Q$ .

Відзначимо, що для визначення  $Q$  можна використовувати модель (1).

Перша чисельна модель прогнозування пилового забруднення повітря базується на наступному розщепленні рівняння масопереносу (2):

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right), \quad (4)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = Q_i \delta(x-x_i) \delta(y-y_i), \quad (5)$$

де прийнято:  $v=v-w$ .

Для чисельного інтегрування рівняння (3) виконуються такі перетворення (Хрущ В. К., Біляєв М. М.):

$$\frac{\partial uC}{\partial x} = \frac{\partial u^+ C}{\partial x} + \frac{\partial u^- C}{\partial x},$$

$$\frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial v^+ C}{\partial y} + \frac{\partial v^- C}{\partial y},$$

$$u^+ = \frac{u + |u|}{2}, \quad u^- = \frac{u - |u|}{2},$$

$$v^+ = \frac{v + |v|}{2}, \quad v^- = \frac{v - |v|}{2},$$

$$\frac{\partial u^+ C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j}^+ C_{i,j}^{n+1} - u_{i,j}^+ C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial u^- C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j}^- C_{i+1,j}^{n+1} - u_{i,j}^- C_{i,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^+ C}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1}^+ C_{i,j}^{n+1} - v_{i,j}^+ C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^- C}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1}^- C_{i,j+1}^{n+1} - v_{i,j}^- C_{i,j}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^- C^{n+1}.$$

Далі здійснюється така схема розщеплення:  
– на першому кроці різницеве рівняння має вигляд:

$$\frac{C_{i,j}^k - C_{i,j}^n}{\Delta t} + L_x^+ C^k + L_y^+ C^k = 0; \quad (6)$$

– на другому кроці розщеплення різницеве рівняння має вигляд:

$$\frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i,j}^k}{\Delta t} + L_x^- C^{n+1} + L_y^- C^{n+1} = 0. \quad (7)$$

Для чисельного інтегрування рівняння (4) використовується різницева схема сумарної апроксимації:

$$\frac{C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - C_{i,j}^n}{\Delta t} = \left[ \mu_x \frac{-C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[ \mu_y \frac{-C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right],$$

$$\frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \left[ \mu_x \frac{C_{i+1,j}^{n+1} - C_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} \right] + \left[ \mu_y \frac{C_{i,j+1}^{n+1} - C_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} \right].$$

Невідоме значення концентрації пилу визначається із різницевої залежності за явною формулою.

Рішення рівняння (5) знаходиться за методом Ейлера:

$$C_{ij}^{n+1} = C_{ij}^n + \Delta t \sum Q_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i).$$

На базі розглянутої чисельної моделі створено код АКО, мова програмування – FORTRAN.

Для побудови другої чисельної моделі масопереносу здійснюється розщеплення рівняння масопереносу таким чином:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right), \quad (8)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right), \quad (9)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \sum_{i=1}^n Q_{Si}(t) \delta(x - x_i) \delta(y - y_i). \quad (10)$$

Для чисельного розв'язання рівняння (8) та (9) використовується двокрокова змінно-трикутна схема розщеплення. Для рівняння (8):

– на першому кроці:

$$C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = C_{i,j}^n - \Delta t \frac{u_{i+1,j}^+ C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - u_{i,j}^+ C_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} + \Delta t \mu_x \frac{-C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta x^2} + \Delta t \mu_x \frac{-C_{i,j}^n + C_{i+1,j}^n}{2\Delta x^2};$$

– на другому кроці:

$$C_{i,j}^{n+1} = C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \Delta t \frac{u_{i+1,j}^- C_{i+1,j}^{n+1} - u_{i,j}^- C_{i,j}^{n+1}}{\Delta x} + \Delta t \mu_x \frac{-C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta x^2} + \Delta t \mu_x \frac{-C_{i,j}^{n+1} + C_{i+1,j}^{n+1}}{2\Delta x^2}$$

$$\text{де } u^+ = \frac{u + |u|}{2}, u^- = \frac{u - |u|}{2}.$$

Для рівняння (9):

– на першому кроці:

$$C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = C_{i,j}^n - \Delta t \frac{v_{i,j+1}^+ C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - v_{i,j}^+ C_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y} + \Delta t \mu_y \frac{-C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta y^2} + \Delta t \mu_y \frac{-C_{i,j}^n + C_{i,j+1}^n}{2\Delta y^2},$$

– на другому кроці:

$$C_{i,j}^{n+1} = C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \Delta t \frac{v_{i,j+1}^- C_{i,j+1}^{n+1} - v_{i,j}^- C_{i,j}^{n+1}}{\Delta y} + \Delta t \mu_y \frac{-C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta y^2} + \Delta t \mu_y \frac{-C_{i,j}^{n+1} + C_{i,j+1}^{n+1}}{2\Delta y^2},$$

$$\text{де } v^+ = \frac{v + |v|}{2}, v^- = \frac{v - |v|}{2}.$$

Для чисельного інтегрування рівняння (10) використовується метод Ейлера.

На базі даної чисельної моделі створено код PKIRI-2, мовою програмування є FORTRAN.

### Висновки

1. Наведено результати лабораторного експерименту по аналізу інтенсивності пилоутворення від ділянки з вугіллям.

2. Отримано емпіричну модель, що дає можливість визначити інтенсивність емісії вугільного пилу від ділянки вугілля при різній швидкості повітряного потоку; це дає можливість обґрунтувати початкові дані при створенні чисельної моделі пилоутворення та забруднення повітря на промислових майданчиках.

3. Експериментальним шляхом встановлено закономірність зміни концентрації пилу (в локальному масштабі) на різній відстані від площинного джерела емісії вугільного пилу.

4. Для прогнозування пилового забруднення повітря на промислових майданчиках розроблено дві чисельні моделі; побудовані моделі є багатофакторними та відповідають сучасним трендам в області розробки методів математичного моделювання процесів масопереносу в повітрі.

5. Подальший розвиток даного напрямку буде проводитися в аспекті дослідження закономірностей пилоутворення від інших джерел.

**Список літератури**

1. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Берлов О. В., Козачина В. А. CFD-моделивання в аналізі ефективності систем захисту довкілля та працівників на робочих місцях: монографія. Дніпро : Журфонд, 2022. – 268 с.
2. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде/М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – К.: Наук. думка, 1997. – 368 с.
3. Alvarez J. T., Alvarez I. D.&Lougedo S. T. Dust barriers in open pit blasts. Multifase Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations. WIT Transactions on Ecology and the Environment, Air Pollution XVI, Vol 116. 2008. P. 85-93.
4. Best Practices for Dust Control in Coal Mining. *Information Circular/* Jay F. Colinet et al, IC 9517, Department of Health and Human Services, Pittsburgh, PA, Spokane, WA, January 2010. 30 p.
5. Biliaiev M., Biliaieva V., Berlov O., Kozachyna V., Kirichenko P., Oladipo M.O., Poltoratska V. Modeling Coal Dust Dispersion from Pile with Protection Barriers. E3S Web of Conferences. Vol. 168: 2nd Intern. Conf. Essays of Mining Science and Practice, Dnipro, Ukraine, 22–24 April 2020. P. 1–6. DOI: 10.1051/e3sconf/202016800021.
6. Biliaiev, Mykola & Biliaieva, V & Kozachyna, Vitalii & Berlov, Oleksandr & Oladipo, Mutiu & Kirichenko, P. (2020). Reducing of coal dust release from train wagon with barrier. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 985. 012018. 10.1088/1757-899X/985/1/012018.
7. Ferreira AD, Viegas DX, Sousa ACM. Full-scale measurements for evaluation of coal dust release from train wagons with two different shelter covers. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 91(10), P. 1271–1283
8. Ferreira, AD, Vaz P. A. Wind tunnel study of coal dust release from train wagons. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2004. 92. P. 565–577.
9. Kirk Wings, Richard Steffel Coal Dust from Rail Transport. Ramboll Environ US Corporation, 19020 33rd Avenue, Suite 310, Lynnwood, Washington 98036, 425-412-1800, 14 p.
10. Reed W. R. Significant Dust Dispersion Models for Mining Operations. DHHS (NIOSH) Publication. 2005 – 138, Pittsburgh, PA, 2005. P. 24.