

TECHNICAL SCIENCES**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ТА ТЕОРЕТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПИЛОВОГО ЗАБРУДНЕННЯ****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>*

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL MODELING OF DUST POLLUTION PROCESSES**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

Пилове забруднення повітря має місце в різних промислових областях, особливо, в гірничій промисловості. Пилове забруднення повітря є причиною професійних захворювань у людей. Це потребує поглибленого дослідження процесів пилоутворення, розповсюдження пилу в робочих зонах. В статті наведено результати лабораторних досліджень по визначенню інтенсивності емісії мінерального пилу від забрудненої ділянки. Лабораторні дослідження проведено при різній швидкості повітряного потоку. Обробка даних експериментів дозволило отримати емпіричну модель. Емпірична модель дає можливість оцінювати інтенсивність емісії мінерального пилу. Розроблено чисельні моделі аеродинаміки та масопереносу для прогнозування пилового забруднення повітря в робочих зонах. Моделі базуються на використанні кінцево-різницевого схем розщеплення для інтегрування фундаментальних рівнянь механіки суцільного середовища.

Abstract

Dust air pollution occurs in various industrial areas, especially in the mining industry. Dust pollution is a cause of occupational diseases in humans. This requires an in-depth study of the processes of dust formation and dust distribution in work areas. The article presents the results of laboratory studies to determine the intensity of mineral dust emissions from a polluted site. Laboratory studies were conducted at different air flow rates. Processing of the experimental data allowed us to obtain an empirical model. The empirical model makes it possible to estimate the intensity of mineral dust emissions. Numerical models of aerodynamics and mass transfer have been developed to predict dust air pollution in work areas. The models are based on the use of finite-difference splitting schemes to integrate the fundamental equations of the mechanics of a continuous medium.

Ключові слова: пилове забруднення, робоча зона, лабораторний експеримент, емпірична модель, математичне моделювання.

Keywords: dust pollution, working area, laboratory experiment, empirical model, mathematical modeling.

Вступ

Об'єкти гірничого комплексу України відносяться до підприємств, де має місце дуже інтенсивне забруднення атмосферного повітря пилом, хімічно небезпечними та радіоактивними речовинами. Забруднення повітря відбувається при видобуванні корисних копалин, їх зберіганні, транспортуванні та обробці [1, 4, 10]. Забрудненню піддається повітря на промислових майданчиках підприємств, всередині промислових будівель, а також в селітебних зонах, що прилягають до промислової агломерації. У зв'язку з цим актуальною проблемою є розробка методів оцінювання рівня забруднення повітря при різних метеоумовах та в різних масштабах – local (масштаб підприємства), urban (масштаб 10-20 км). Створення прогнозних моделей базується на використанні метод фізичного моделювання [1, 5-8] та різних методах математичного моделювання: аналітичні моделі, чисельні моделі, CFD моделі [1-3].

Для практики важливо мати математичні моделі, що з одного боку, дають можливість врахувати основні фізичні фактори, що впливають на процес масопереносу, а, з іншого боку, потребують незначного часу при реалізації на комп'ютері. Слід підкреслити, що для побудови науково обґрунтованих математичних моделей для задач даного класу потрібно використовувати результати фізичних експериментів, що дають можливість визначити «вхідні» параметри для багатопараметричної математичної моделі.

Мета

Експериментальне визначення інтенсивності емісії мінерального пилу при різній швидкості повітряного потоку; розробка чисельних моделей для прогнозування пилового забруднення повітря.

Методика

Дослідження проводилися лабораторним шляхом. Для проведення експериментальних досліджень використовувався мінеральний пил з гірничого комплексу м. Кривий Ріг. Експериментальна установка розташовувалася на столі, потік повітря створювався за рахунок використання повітродувки. Фото дослідної установки показано на рис. 1.

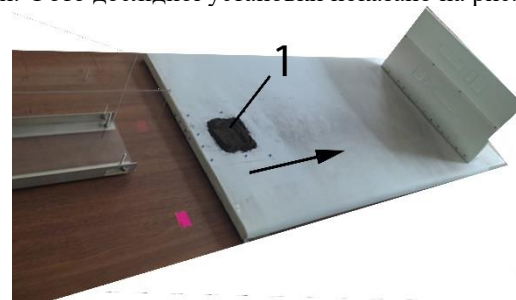


Рис. 1. Дослідна установка: 1 – область пилоутворення (мінеральний пил)

Мінеральний пил розташовувався в межах прямокутника (майданчик), його розміри: 10см×10см, висота мінерального пилу 0,5 см Експеримент виконувався при температурі повітря 20 °С, вологість повітря 64%. При проведенні експериментів, за критерій подібності приймалося 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 приймалося довжина моделі майданчику, тобто $L=10 \text{ см}$.

Швидкість повітряного потоку вимірювалася за допомогою анемометра НТ-9830 (рис. 3). При проведенні експерименту здійснювалася відеозйомка.



Рис. 2. Анемометр HT-9830

При проведенні експериментальних досліджень вимірювалася маса мінерального пилу, що виносилася з моделі майданчику за певний час (120 с). Далі здійснювався «збір» пилу, що був винесений з майданчику та проводилося його зважування. Дана процедура повторювалася для різної швидкості набігаючого повітря.

Результати обробки даних експериментальних вимірювань показано на рис. 3. На цьому рисунку наведено залежність інтенсивності пилоутворення при різній швидкості набігаючого потоку повітря. У зв'язку з тим, що 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. 3.

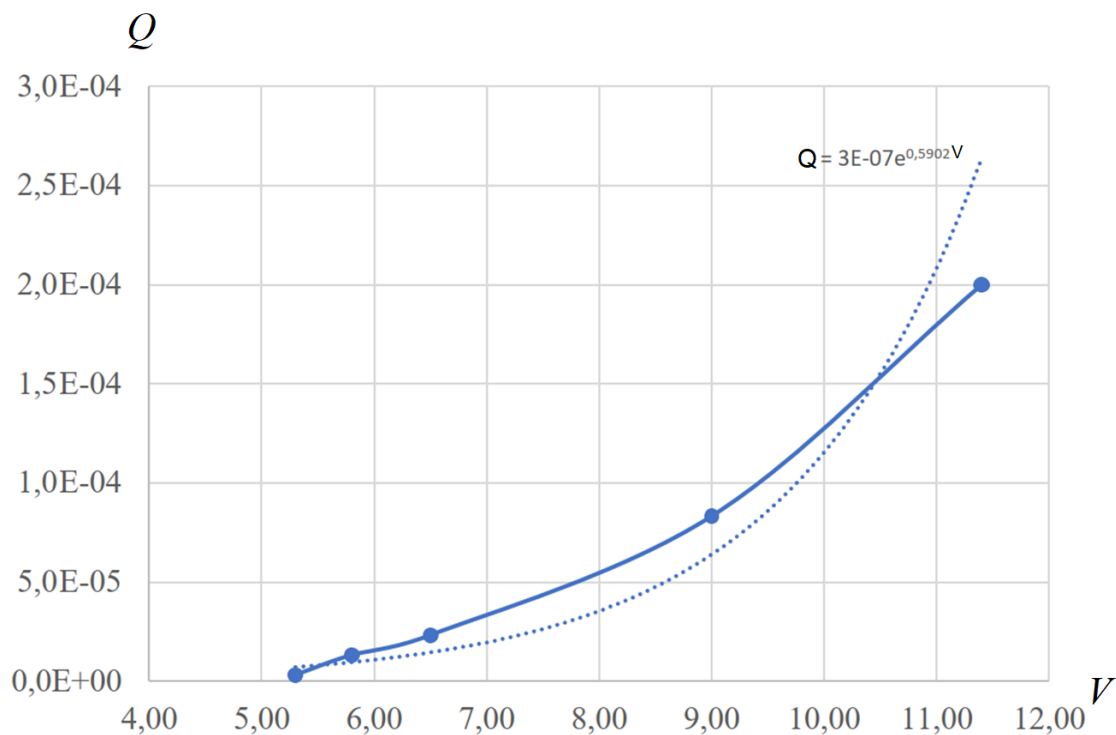


Рис. 3. Інтенсивність пилоутворення при різній швидкості повітряного потоку

Результати експериментальних досліджень показали, що початок відриву часток мінерального пилу починається при швидкості повітряного потоку порядку $v_s = 5,1 \div 5,3$ м/с. Тобто, при розробці заходів по зменшенню процесу пилоутворення на промисловому майданчику потрібно забезпечити швидкість повітряного потоку не більш цієї величини.

Дані на рис. 3 показують, що пилоутворення різко зростає при швидкості повітряного потоку більш 8 м/с.

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

$$Q = 3 \cdot 10^{-7} \cdot e^{0.5902V}, \frac{e}{c \cdot \text{см}^2}, \quad (1)$$

де Q – інтенсивність виносу мінерального пилу; V [м/с] – швидкість повітряного потоку.

Модель (1) дає можливість здійснювати експрес оцінювання інтенсивності виносу мінерального пилу від забруднених ділянок та сумісно з моделями розповсюдження зважених домішок може бути використана для оцінювання пилового забруднення робочих зон.

На наступному етапі були розроблені 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; μ_x, μ_y – коефіцієнти турбулентної дифузії; $\delta(x-x_i) \delta(y-y_i)$ – дельта функція Дірака, за допомогою якої в моделі задається місце емісії пилу. Інтенсивність емісії пилу дорівнює Q .

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

Крайові умови для рівняння (2) розглянуті в [1, 2].

Побудова чисельної моделі масопереносу будується на розщепленні рівняння (2):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right), \quad (3)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = 0, \quad (4)$$

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

Для чисельного інтегрування рівняння (2) використовується різницева схема сумарної апроксимації:

$$\frac{C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - C_{i,j}^n}{\Delta t} = \left[\mu_x \frac{-C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[\mu_y \frac{-C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right], \quad (6)$$

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

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

Принцип побудови кінцево-різницевої схеми чисельного інтегрування рівняння переносу (4) розглянемо на спрощеному аналозі цього рівняння – на прикладі одновимірного рівняння переносу (7):

$$\frac{\partial C}{\partial t} + a \frac{\partial C}{\partial x} = 0, \quad (7)$$

де $a > 0$.

Представимо функцію $C(x,t)$, значення якої необхідно визначити на новому часовому кроці t^{n+1} , так (М. М. Беляєв, В. К. Хрущ):

$$C(x, t^{n+1}) = C(x, t^n) + VC(x, t),$$

де $C(x, t^n)$ – відоме значення функції C на часовому кроці t^n ; $VC(x, t)$ – невідомий приріст функції C .

Тоді, рівняння переносу (7) можна записати у вигляді:

$$\frac{\partial VC}{\partial t} + a \frac{\partial VC}{\partial x} = -a \frac{\partial C^n}{\partial x}. \quad (8)$$

В різницевому вигляді (8) можна записати так:

$$\frac{VC_i^{n+1} - VC_i^n}{\Delta t} + a \frac{VC_i^{n+1} - VC_i^{n+1}}{h_x} \beta = -a \frac{C_{i+1}^n - C_{i-1}^n}{2h_x}. \quad (9)$$

Як можна бачити з (9), для апроксимації конвективної похідної VC використовується схема «проти потоку», а для апроксимації конвективної похідної для функції C – центральна апроксимація. Ця кінцево-різницева схема є абсолютно стійкою. При практичній реалізації даної різницевої схеми приймається $\beta=0,5$.

Після визначення величини VC_i^{n+1} з рівняння (9), визначається значення шуканої функції C на новому часовому кроці:

$$C_i^{n+1} = C_i^n + VC_i^{n+1}.$$

Таким же шляхом побудовано чисельну модель для інтегрування двовимірного рівняння (2).

Для чисельного інтегрування рівняння (2) на базі розщеплення (3)-(5) також побудовано іншу чисельна модель. В цій моделі для чисельного інтегрування рівняння дифузії (3) використовується схема сумарної апроксимації (6), а для чисельного інтегрування рівняння переносу (4) використовується змінно-трикутна кінцево-різницева схема. Для побудови цієї схеми здійснюються такі перетворення (Хрущ В. К., Біляєв М. М.):

$$\begin{aligned} \frac{\partial u C}{\partial x} &= \frac{\partial u^+ C}{\partial x} + \frac{\partial u^- C}{\partial x}, \\ \frac{\partial v C}{\partial y} &= \frac{\partial v^+ C}{\partial y} + \frac{\partial v^- C}{\partial y}, \\ u^+ &= \frac{u + |u|}{2}, \quad u^- = \frac{u - |u|}{2}, \\ v^+ &= \frac{v + |v|}{2}, \quad v^- = \frac{v - |v|}{2}, \\ \frac{\partial u^+ C}{\partial x} &\approx \frac{u_{i+1,j}^+ C_{i,j}^{n+1} - u_{i,j}^+ C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^+ C^{n+1}, \\ \frac{\partial u^- C}{\partial x} &\approx \frac{u_{i+1,j}^- C_{i+1,j}^{n+1} - u_{i,j}^- C_{i,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- C^{n+1}, \\ \frac{\partial v^+ C}{\partial y} &\approx \frac{v_{i,j+1}^+ C_{i,j}^{n+1} - v_{i,j}^+ C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^+ C^{n+1}, \\ \frac{\partial v^- C}{\partial y} &\approx \frac{v_{i,j+1}^- C_{i,j+1}^{n+1} - v_{i,j}^- C_{i,j}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^- C^{n+1}. \end{aligned}$$

Змінно-трикутна кінцево-різницева схема записується так:

– перший крок:

$$\frac{C_{i,j}^k - C_{i,j}^n}{\Delta t} + L_x^+ C^k + L_y^+ C^k = 0; \quad (10)$$

– другий крок:

$$\frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i,j}^k}{\Delta t} + L_x^- C^{n+1} + L_y^- C^{n+1} = 0. \quad (11)$$

Невідоме значення функції C знаходиться з різницевих рівнянь (10) та (11) за явною формулою.

Для чисельного інтегрування рівняння (5) використовується метод Ейлера.

Здійснено програмну реалізацію побудованих чисельних моделей масопереносу, мовою програмування є FORTRAN.

Для рішення задачі аеродинаміки – визначення поля швидкості повітряного потоку – використовується модель потенціального руху. Моделююче рівняння має вигляд:

$$\frac{\partial P^2}{\partial x^2} + \frac{\partial P^2}{\partial y^2} = 0. \quad (12)$$

де P – потенціал швидкості.

Компоненти вектора швидкості повітряного потоку визначаються так:

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}, v = \frac{\partial P}{\partial y}.$$

Крайові умови для рівняння (12) розглянуто в [1, 2].

Побудова чисельної моделі аеродинаміки базується на приведенні рівняння Лапласа для потенціалу швидкості до виду:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}, \quad (13)$$

де t – фіктивний час.

На наступному кроці здійснюється геометричне розщеплення рівняння (13) таким чином:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}, \quad (14)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}. \quad (15)$$

На наступному кроці для визначення значення P використовується така залежність:

$$P_{i,j}^{n+1} = P_{i,j}^n + Vt \frac{P_{i+1,j}^n - P_{i,j}^n}{\Delta x^2} + Vt \frac{-P_{i,j}^n + P_{i-1,j}^n}{\Delta x^2}.$$

Для визначення невідомого значення P на базі рівняння (15) застосовується залежність:

$$P_{i,j}^{n+1} = P_{i,j}^n + Vt \frac{P_{i,j+1}^n - P_{i,j}^n}{\Delta y^2} + Vt \frac{-P_{i,j}^n + P_{i,j-1}^n}{\Delta y^2}.$$

Розрахунок закінчується, коли виконується умова:

$$\left| P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^n \right| \leq \varepsilon,$$

де ε – мале число; n – номер ітерації.

Також використовується інша різницева схема для чисельного інтегрування рівняння (13) – схема сумарної апроксимації. Моделюючі рівняння для першого та другого кроку розщеплення мають вигляд:

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

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

Після розрахунку поля потенціалу швидкості визначаються компоненти вектора швидкості повітряного потоку на базі таких залежностей:

$$u_{i,j} = \frac{P_{i,j} - P_{i-1,j}}{\Delta x}, v_{i,j} = \frac{P_{i,j} - P_{i,j-1}}{\Delta y}.$$

Здійснена програмна реалізація побудованих чисельних моделей аеродинаміки.

Висновки

1. Наведено результати фізичного експерименту по аналізу інтенсивності пилоутворення від ділянки з мінеральним пилом.
2. Отримано емпіричну модель, що дає можливість визначати інтенсивність емісії мінерального пилу при різній швидкості повітряного потоку.
3. Для прогнозування пилового забруднення повітря на промислових майданчиках розроблено дві багатофакторні чисельні моделі.
4. Побудовано чисельні моделі аеродинаміки для визначення поля швидкості повітряного потоку в робочих зонах.
5. Подальший розвиток даного напрямку буде проводитися шляхом дослідження закономірностей пилоутворення від інших джерел в областях складної геометричної форми.

Список літератури

1. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Берлов О. В., Козачина В. А. CFD-модельовання 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 Winges, 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.