

EXPERIMENTAL PHYSICS**ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНИ ВОЛОГОСТІ ВУГІЛЛЯ ПРИ РІЗНІЙ ШВИДКОСТІ ПОВІТРЯНОГО ПОТОКУ****Біляєв М.М.***д.т.н., професор,**кафедра «Гідравліка, водопостачання та фізика»**Український державний університет науки і технологій**ORCID: <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**ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6894-5532>***Кіріченко П.С.***к.т.н., доцент,**кафедра «Теплогазоводопостачання, водовідведення і вентиляція»**Криворізький національний університет**ORCID: <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>***Семененко П.В.***к.т.н.,**кафедра «Гідравліка, водопостачання та фізика»**Український державний університет науки і технологій**ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0447-5591>***STUDY OF CHANGES IN COAL MOISTURE CONTENT AT DIFFERENT AIR FLOW RATES****Biliaiev M.,***D. Sc. (Tech.), Prof.,**dep. «Hydraulics, Water Supply and Physics»**Ukrainian State University of Science and Technologies**ORCID: <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**ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6894-5532>***Kirichenko P.,***Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,**dep. «Heat, Gas, Water Supply, Water Drainage and Ventilation»**Kyryvi Rih National University**ORCID: <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>***Semenenko P.***Cand. Sc. (Tech.),**dep. «Hydraulics, Water Supply and Physics»**Ukrainian State University of Science and Technologies**ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0447-5591>*

Анотація

Пилове забруднення повітря в робочих зонах є дуже небезпечним явищем, що суттєво впливає на стан здоров'я працівників. Джерелом пилоутворення є різні технологічні процеси на підприємствах, складування вугілля в штабелях, винесення мінерального пилу від хвостосховищ тощо. Особливо важливим аспектом є зменшення інтенсивності пилоутворення на промислових майданчиках. Для цього дуже поширеним є використання подачі води на поверхню пилоутворення. Але з часом вологість змоченої поверхні зменшується, тому важливо визначати час, коли необхідною є наступна подача. В статті наведено результати лабораторних досліджень по визначенню динаміки зменшення вологості вугілля при різній швидкості повітряного потоку. На базі отриманих результатів експерименту побудовано емпіричну модель для визначення часу, коли потрібно повторити зрошування поверхні пилоутворення. Наведено чисельну модель для оцінювання концентрації водяного пару біля поверхні пилоутворення.

Abstract

Dust pollution in work areas is a very dangerous phenomenon that significantly affects the health of employees. The source of dust generation is various technological processes at enterprises, coal stacking, mineral dust from tailing pits, etc. A particularly important aspect is to reduce the intensity of dust formation at industrial sites. For this purpose, it is very common to use water supply to the surface of dust formation. However, over time, the humidity of the wetted surface decreases, so it is important to determine the time when the next supply is needed. The article presents the results of laboratory studies to determine the dynamics of coal moisture reduction at different air flow rates. On the basis of the obtained experimental results, an empirical model was built to determine the time when it is necessary to repeat the irrigation of the dust formation surface. A numerical model for estimating the concentration of water vapor near the surface of dust formation is presented.

Ключові слова: пилове забруднення, робоча зона, фізичний експеримент, емпірична модель, чисельне моделювання.

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

Вступ

Пилове забруднення повітря робочих зон на промислових майданчиках залишається дуже небезпечним явищем на різних промислових підприємствах [1, 4, 9, 10]. Дуже інтенсивне пилове забруднення повітря має місце біля штабелів вугілля, хвостосховищ, місць, де здійснюється складування відходів різних підприємств. Винесення пилу призводить до довгострокового та інтенсивного забруднення повітря в робочих зонах. Тут можна виділити два процеси пилового забруднення повітря в робочих зонах – первинне забруднення, коли пил потрапляє в робочу зону внаслідок переносу повітряним потоком від джерела пилоутворення, та вторинне забруднення – коли має місце забруднення повітря в робочих зонах внаслідок динамічного впливу на пил, що осів на поверхню землі промислового майданчику (підлогу робочої зони). Формування пилових хмар та їх рух може викликати пилове забруднення повітря на значній відстані від джерел пилоутворення. Тобто, під вплив джерела пилоутворення потрапляють робочі зони, де мають місце інші технологічні процеси. Тому значна кіль-

кість наукових досліджень присвячена дослідженню процесів пилоутворення та розповсюдження пилу в повітрі. В рамках даного наукового напрямку широко використовуються лабораторні методи дослідження, емпіричні моделі, аналітичні моделі та CFD моделі для аналізу процесів забруднення повітря в робочих зонах [1-3, 5-8]. Розглядаючи проблему пилового забруднення робочих зон, слід виділити таку важливу задачу, як боротьба з пилоутворенням. Наукові дослідження в даному напрямку залишаються актуальними та потребують подальших розробок.

Мета

Експериментальне визначення інтенсивності випаровування води зі зволоженої поверхні вугілля при різній швидкості повітряного потоку; розробка чисельних моделей для прогнозування концентрації водяного пару біля зволоженої поверхні вугілля.

Методика

Подача води на поверхню сипучих матеріалів (вугілля, мінеральний пил тощо) є методом боротьби з пилоутворенням, який дуже широко використовується в світі (рис. 1).



Рис. 1. Зволоження поверхні штабелю вугілля [11]

Але після закінчення процесу зволоження поверхні сипучого матеріалу починається випаровування води, що призводить до зменшення вологості поверхневого шару матеріалу та з часом, при певній вологості, знову почнеться процес пилоутворення. Тому дуже важливо визначати час, коли потрібно знову повторити процес зрошування поверхні.

Далі розглядається рішення задачі по визначенню часу, коли потрібно починати новий цикл

зрошування у зв'язку з випаровуванням води з поверхні вугілля.

Дослідження проводилися лабораторним шляхом. Для проведення експериментальних досліджень використовувалось вугілля з Павлоградського району Дніпропетровської області. Фото дослідної установки показано на рис. 2.

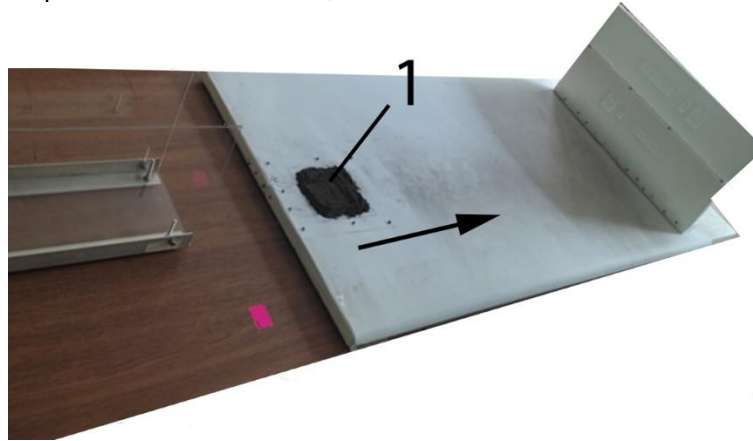


Рис. 2. Дослідна установка: 1 – область пилоутворення (вугільний пил)

Вугільний пил розташовувався в межах прямокутника (майданчик). Температура повітря 20 °С. Перед проведенням досліджень по визначенню зміни вологості вугільного пилу при обдуві моделі майданчика зразок вугільного пилу знаходився у сушильній шафі (шафа сушильна, модель 2В-151) при температурі +40 °С протягом 1 год. Після цього зразок вугілля було зважено. Далі в зразок додавалась вода в кількості, необхідній для отримання потрібного значення вологості зразка. Вологість зразка визначалася так:

$$P = \frac{M_{вл} - M_c}{M_c} 100\% \quad (1)$$

де P – вологість, %; M_c – маса сухого зразка; $M_{вл}$ – маса вологого зразка.

Далі зразок розташовувався на експериментальному майданчику (рис. 2) та здійснювався обдув

його протягом 2 хв. Потім зразок зважувався, визначалась остаточна вологість та експеримент з даним зразком продовжувався далі. Експеримент проводився для різної швидкості повітряного потоку. Швидкість повітряного потоку вимірювалась за допомогою анемометра НТ-9830. При проведенні експерименту здійснювалась відеозйомка.

Так як вимірювання здійснювалися при турбулентному режимі, то анемометр показував певний діапазон швидкості повітряного потоку. При обробці даних, для побудови графічної залежності розраховувалось середнє значення швидкості повітряного потоку. Початкова вологість зразка вугілля була 10 %.

Після обробки даних вимірювань була побудована графічна залежність зміни вологості зразка вугілля з часом при різній швидкості повітряного потоку (рис. 3).

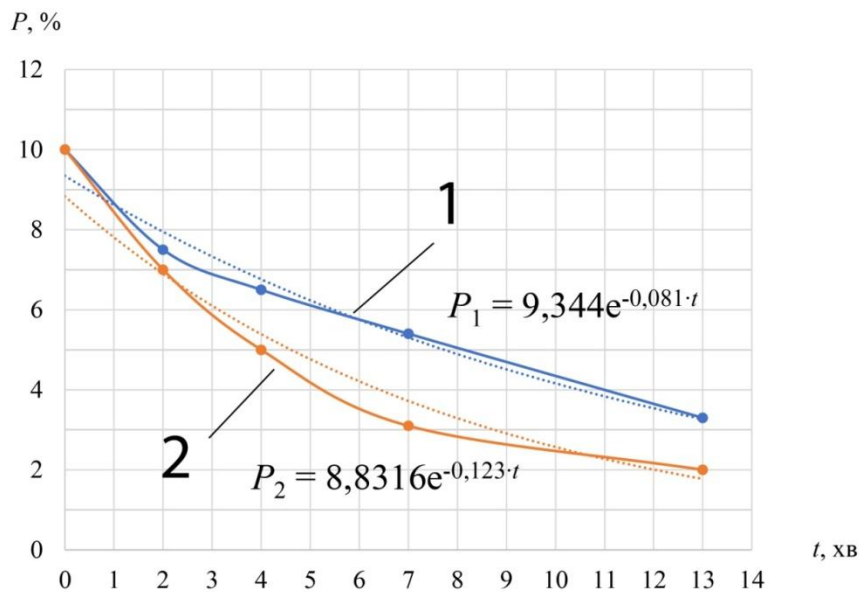


Рис. 3. Зміна вологості вугілля з часом:

1 – швидкість повітряного потоку 4,6 м/с; 2 – швидкість повітряного потоку 7,1 м/с

Аналіз даних на рис. 3 показує таку закономірність: зниження вологості йде швидко протягом перших 7-8 хв; за цей проміжок часу вологість зменшується в 2 рази, якщо швидкість повітряного потоку 4,6 м/с, та в 3 рази, якщо швидкість повітряного потоку 7,1 м/с.

Експериментальні дані (рис. 3) дозволяють встановити таку закономірність: йде інтенсивне зменшення вологості вугілля протягом перших 8 хв. Також можна бачити, що на цьому проміжку часу для $V=4,6$ м/с швидкість «падіння вологості» менша, ніж для швидкості повітряного потоку $V=7,1$ м/с:

$$\text{grad}P = \frac{5\% - 10\%}{8} = -0,625 \text{ для } V = 4,6 \text{ м/с};$$

$$\text{grad}P = \frac{2,9\% - 10\%}{8} = -0,887 \text{ для } V = 7,1 \text{ м/с}$$

Обробка експериментальних даних дає можливість отримати такі емпіричні моделі для експрес оцінювання зміни вологості вугілля з часом при різних швидкості повітряного потоку:

$$P_{4,6} = 9,344 \cdot e^{-0,081t}, \quad (2)$$

$$P_{7,1} = 8,831 \cdot e^{-0,123t}. \quad (3)$$

Візуальний аналіз експерименту та аналіз відеозйомки експерименту дозволив визначити таку закономірність пилоутворення:

- при вологості порядку 5 % починається рух часток пилу біля поверхні вугілля, якщо швидкість повітряного потоку порядку 7,1 м/с;

- при вологості порядку 3 % починається активне винесення часток вугільного пилу повітряним потоком, якщо швидкість повітряного потоку порядку 7,1 м/с;

- при вологості порядку 3 % починається рух часток пилу біля поверхні вугілля якщо швидкість повітряного потоку порядку 4,6 м/с;

- при вологості порядку 2 % починається активне винесення часток вугільного пилу повітряним потоком, якщо швидкість повітряного потоку порядку 4,6 м/с;

Різниця в значенні вологості: 2 % (швидкість повітряного потоку 4,6 м/с) та 3 % (швидкість повітряного потоку 7,1 м/с) при якій починається активне винесення часток вугільного пилу, можна пояснити тим, що при малій швидкості повітря кінетичної енергії потоку не вистачає для «відриву» часток пилу від поверхні вугілля.

Таким чином, при використанні в якості боротьби з пилоутворення зволоження водою поверхні вугілля, слід контролювати вологість цієї поверхні, і в разі, коли вологість поверхні вугілля буде порядку 2-3% слід повторити змочування вугілля.

Використовуючи отримані дані – емпіричні моделі (2) та (3), та здійснюючи певне «округлення» чисел в цих моделях, а саме:

$$9.344 \approx 9, \quad 8.831 \approx 9, \quad 0.081 \approx 0.1, \\ 0.123 \approx 0.1,$$

можна отримати емпіричну модель, що поєднує дві моделі (2) та (3):

$$P = 9 \cdot e^{-0.1t} \quad (4)$$

Таким чином, за допомогою моделі (4) можна визначати час, коли вологість вугілля зменшиться та досягне критичної межі $P=3\%$. При такій вологості починається процес пилоутворення, тому слід повторити змочування поверхні вугілля.

На наступному етапі була розроблена чисельна модель для оцінювання концентрації водяної пари біля поверхні, на яку подається вода для зменшення пилоутворення. Моделююче рівняння має вигляд:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = \text{div}(\mu \cdot \text{grad}C) + \sum_{i=1}^N Q_i(t)\delta(x-x_i)\delta(y-y_i), \quad (5)$$

де C – значення концентрації водяної пари в атмосферному повітрі; u, v – компоненти вектору швидкості повітряного потоку; x_i, y_i – декартові координати i -ого точкового джерела емісії пилю; 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 виходу водяної пари від поверхні вугілля. Інтенсивність випаровування води з поверхні, що піддається зрошуванню, дорівнює Q .

Значення параметра Q визначається на базі емпіричної моделі (Мацак В. Г.):

$$Q = (5,83 + 4,1V)P_n \sqrt{M},$$

де V – швидкість повітряного потоку; P_n – тиск насичених парів; M – молекулярна маса води.

Крайові умови для рівняння масопереносу (5) розглянуті в [1, 2].

Побудова чисельної моделі масопереносу заснована на розщепленні рівняння (5) наступним чином:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = 0, \quad (6)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right), \quad (7)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = Q_i \delta(x-x_i) \delta(y-y_i). \quad (8)$$

Принцип побудови кінцево-різницевої схеми чисельного інтегрування рівняння переносу (6) розглянемо на прикладі аналогу рівняння (6) – на рівнянні переносу:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + a \frac{\partial C}{\partial x} = 0, \quad (9)$$

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 (9) можна записати у вигляді:

$$\frac{\partial VC}{\partial t} + a \frac{\partial VC}{\partial x} = -a \frac{\partial C^n}{\partial x}. \quad (10)$$

В різницевому вигляді (10) можна записати так:

$$\frac{VC_i^{n+1} - VC_i^n}{\Delta t} + a \frac{VC_i^{n+1} - VC_{i-1}^{n+1}}{h_x} \beta = -a \frac{C_{i+1}^n - C_{i-1}^n}{2h_x}. \quad (11)$$

Як можна бачити з (11), 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 (11), 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 масопереносу.

Для чисельного інтегрування рівняння (7) використовується схема А. А. Самарського. Для чисельного інтегрування рівняння (8) використовується метод Ейлера.

Для програмування побудованої чисельної моделі використовувався FORTRAN.

Висновки

1. Наведено результати фізичного експерименту по дослідженню динаміки зміни вологості вугілля при різній швидкості повітряного потоку.
2. Отримано емпіричну модель, що дає можливість визначати зміну вологості вугілля при різній швидкості повітряного потоку.
3. Побудована емпірична модель може бути використана для експрес оцінювання вологості вугілля для розробки регламенту зрошування пилоутворюючої поверхні.
4. Побудовано чисельну модель масопереносу для визначення концентраційного поля водяної пари при зрошуванні пилоутворюючої поверхні.
5. Подальший розвиток даного напрямку буде проводитися шляхом розробки тривимірних моделей масопереносу при пилоутворенні.

Список літератури

1. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Берлов О. В., Козачина В. А. CFD-моделювання 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. Беляєв. – 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.
11. EIPPCB (European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau). Integrated Pollution Prevention and Control Reference. Best Available Techniques Reference Document on Emissions from Storage. July 2006.