

TECHNICAL SCIENCES**ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПИЛОВОГО ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ НА ПРОМИСЛОВИХ МАЙДАНЧИКАХ: ЕКСПРЕС МОДЕЛЮВАННЯ****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>*

NUMERICAL MODELING OF DUST AIR POLLUTION AT INDUSTRIAL SITES: EXPRESS MODELING**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»
Kryvyi 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

Боротьба з пилом є важливим напрямом в галузі охорони праці та екологічної безпеки. Для оцінювання ефективності використання того або іншого засобу боротьби з пиловим забрудненням повітря потрібно мати спеціальні методи розрахунку. В роботі розглянуто побудову чисельних моделей аеродинаміки та масопереносу, що дають можливість методом обчислювального експерименту визначати ефективність використання захисних екранів для зниження пилового забруднення повітря на промислових майданчиках. Побудова чисельних моделей базується на інтегруванні фундаментальних рівнянь механіки суцільного середовища за допомогою кінцево-різницевої схем. Наведено результати обчислювального експерименту.

Abstract

Dust control is an important area of occupational health and safety. To evaluate the effectiveness of using a particular means of protecting against dust air pollution, it is necessary to have special calculation methods. This paper considers the construction of numerical models of aerodynamics and mass transfer, which make it possible to determine the effectiveness of using protective screens to reduce dust air pollution at industrial sites by computational experiment. The construction of numerical models is based on the integration of the fundamental equations of continuum mechanics using finite-difference schemes. The results of a computational experiment are presented.

Ключові слова: промисловий майданчик, пилове забруднення повітря, масоперенос, чисельне моделювання.

Keywords: industrial site, dust air pollution, mass transfer, numerical modeling.

Вступ

Боротьба з пиловим забрудненням повітря на промислових майданчиках відноситься до особливо важливих задач в галузі охорони праці та екологічної безпеки [1, 4, 10]. На практиці використовують різні засоби боротьби з пилоутворенням та зменшенням інтенсивності та розмірів пилового забруднення в повітрі. Кожен засіб має свої переваги та недоліки. Але на практиці, при розробці стратегії боротьби з пилом, потрібно мати методи розрахунку ефективності використання того або іншого засобу. В першу чергу, це відноситься до теоретичних методів визначення ефективності засобів боротьби з пилом, оскільки проведення фізичних експериментів в даній області потребує значного часу та досить великих коштів. Тому, зокрема в роботі проєктних організацій, значна увага приділяється використанню математичних моделей. До таких моделей висувається ряд вимог, а саме, швидкість розрахунку та врахування найбільш важливих фізичних факторів, що впливають на формування концентраційних полів. Аналіз літературних джерел [1-3, 5-8] показав, що розвиток таких теоретичних методів дослідження залишається важливою задачею.

Мета

Побудова чисельних моделей аеродинаміки та масопереносу для оцінювання концентраційних полів пилу на промислових майданчиках при використанні захисних екранів.

Методика

Для прогнозування пилового забруднення на промисловому майданчику, де є області пилоутворення, потрібно вирішити дві задачі:

1) задача аеродинаміки – визначення поля швидкості повітряного потоку на промисловому майданчику за наявності перешкод;

2) задача масопереносу – розрахувати концентраційне поле пилу на промисловому майданчику.

Модель аеродинаміки. Так як розглядається задача по визначенню ефективності захисного ек-

рану для зменшення пилоутворення на промисловому майданчику, то потрібно визначити деформацію поля швидкості повітряного потоку під впливом екрану. Наявність захисного екрану на промисловому майданчику призводить до зменшення пилоутворення шляхом зміни аеродинаміки потоків на майданчику. Але для практики важливо мати швидкорозрахункові методи визначення концентраційних полів пилу при різних метеоумовах, параметрів екрану тощо. Далі розглядається побудова таких моделей.

Для розрахунку поля швидкості на промисловому майданчику використовується модель потенціального руху. В цьому випадку, використовується наступне рівняння:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0, \quad (1)$$

де P – потенціал швидкості.

Компоненти вектора швидкості вітру визначаються так:

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}, v = \frac{\partial P}{\partial y}. \quad (2)$$

Якщо розглядається тривимірна задача аеродинаміки, то моделююче рівняння аеродинаміки має вигляд:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = 0. \quad (3)$$

Компоненти вектора швидкості вітру для тривимірного процесу руху визначаються так:

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}; v = \frac{\partial P}{\partial y}; w = \frac{\partial P}{\partial z}. \quad (4)$$

Граничні умови для рівняння Лапласа розглянуто в [7].

Для розв'язання рівняння (1) використовується явна різницева схема:

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

Розрахунок закінчується коли виконується умова:

$$\left| P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^n \right| \leq \varepsilon, \quad (5)$$

де $P_{i,j}^{n+1}$ – значення потенціалу швидкості на новій ітерації; $P_{i,j}^n$ – значення потенціалу швидкості на попередній ітерації; ε – мале число.

Значення компонент швидкості розраховується на сторонах комірок так:

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

Для чисельного інтегрування рівняння (3) використовується метод умовної апроксимації. Для цього рівняння (3) приводиться до «нестационарного» вигляду:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2}, \quad (6)$$

де t – фіктивний час.

Далі записується двокрокова схема розщеплення:

$$\frac{P_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} - P_{i,j,k}^n}{\Delta t} = \left[\frac{-P_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i-1,j,k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[\frac{-P_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i,j-1,k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right] + \left[\frac{-P_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i,j,k-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta z^2} \right], \quad (7)$$

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

На кожному кроці розщеплення системи (7) невідоме значення потенціалу швидкості визначається за явною схемою.

Розрахунок закінчується, коли виконується умова, що аналогічна (5).

Значення компонент швидкості розраховується на бічних сторонах контрольного об'єму наступним чином:

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

Здійснено програмну реалізацію побудованих чисельних моделей аеродинаміки.

Математична модель масопереносу. Для опису концентраційних полів на промисловому майданчику використовується наступне моделююче рівняння:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial (v-w)C}{\partial y} = \text{div}(\mu \cdot \text{grad}C) + \sum_{i=1}^N Q_i(t) \delta(x-x_i) \delta(y-y_i). \quad (8)$$

де C – значення концентрації пилу на промисловому майданчику; u, v – компоненти вектору швидкості повітряного потоку в проекції на осі координат x, y , відповідно; 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 . Даний параметр визначається на базі існуючих емпіричних моделей або відомих експериментальних даних.

Аналогічне рівняння використовується для розрахунку тривимірних концентраційних полів пилу на промисловому майданчику.

Для побудови чисельної моделі пилового забруднення повітря на промисловому майданчику здійснюється таке розщеплення моделюючого рівняння:

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

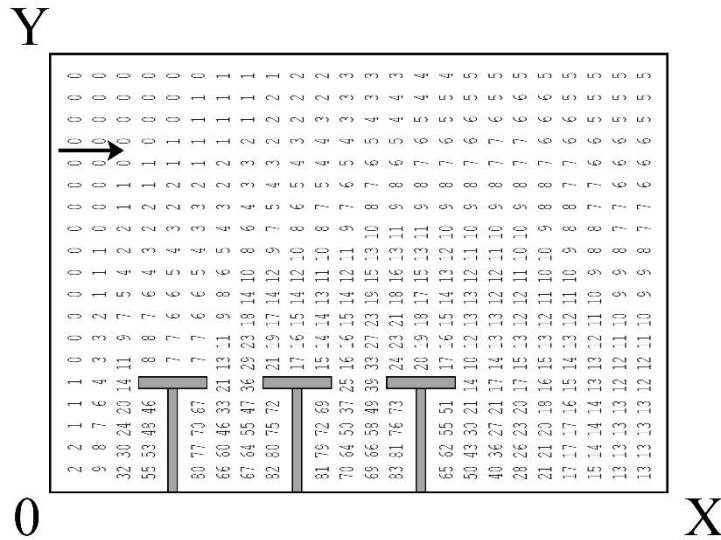


Рис. 3. Концентраційне поле пилу на промисловому майданчику, сценарій № 2.

Як можна бачити з рис. 2 та рис. 3, найбільш інтенсивне пилове забруднення має місце на ділянках, що розташовані між захисними екранами. Також можна побачити, що концентрація пилу над «Т»-подібним захисним екраном менше ніж над вертикальним екраном.

Слід відзначити, що час розрахунку кожного сценарію був 3 с. Таким чином, за допомогою побудованих чисельних моделей можна виконати серію прогнозних розрахунків протягом робочого дня з метою визначення місця раціонального розташування екранів та їх розмірів.

Висновки

1. Побудовано 2D та 3D чисельні моделі для рішення задачі аеродинаміки – визначення поля швидкості повітряного потоку на промисловому майданчику за наявності перешкод (захисні екрани).
2. Побудовано 2D та 3D чисельні моделі для рішення задачі масопереносу – визначення концентраційних полів пилу на промисловому майданчику.
3. Розроблені чисельні враховують найбільш важливі фізичні фактори, що впливають на формування концентраційних полів пилу в повітрі.
4. Моделі можуть бути реалізовані на комп'ютерах малої та середньої потужності.
5. Подальший розвиток даного напрямку буде присвячений дослідженню закономірностей пилоутворення від джерел на різних об'єктах гірничої промисловості.

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. 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.