

УДК 519.87:[504.6:622.235]

О. О. МЕДВЕДЄВА¹, В. В. БІЛЯЄВА², П. С. КІРІЧЕНКО³, В. А. КОЗАЧИНА^{4*},
А. Ю. УСЕНКО⁵

¹Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, вул. Сімферопольська, 2а, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (098) 506 98 00, ел. пошта medvedevaolga1702@gmail.com, ORCID 0000-0001-5575-713X

²Каф. «Природничо-наукових та загально інженерних дисциплін», ТОВ «Технічний університет «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»», Південне шосе, 80, Запоріжжя, Україна, 69008, тел. +38 (056) 374 98 22, ел. пошта v.v.biliaieva@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-2399-3124

³Каф. «Теплогазоводопостачання, водовідведення і вентиляція», Криворізький національний університет, вул. Віталія Матусевича, 11, Кривий Ріг, Україна, 50027, тел. +38 (056) 409 06 06, ел. пошта pasha_129@ukr.net, ORCID 0000-0002-0793-9593

^{4*}Каф. «Гідравліка, водопостачання та фізика», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта v.kozachyna@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532

⁵Каф. «Енергетичних систем та енергоменеджменту», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДМІ, пр. Науки, 4, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (056) 374 98 22, ел. пошта usenko.pte@ukr.net, ORCID 0000-0001-7467-6220

Математичне моделювання забруднення повітря після вибуху в кар'єрі: експрес прогноз

Мета. Розробка CFD моделі, що дає можливість оперативно прогнозувати рівень пилового забруднення атмосферного повітря після вибуху в кар'єрі, розробка швидкої розрахункової моделі CFD. **Методика.** Для рішення задачі аеродинаміки та масопереносу використовуються фундаментальні рівняння механіки суцільного середовища. Поле швидкості повітряного потоку моделюється за допомогою рівняння Лапласа для потенціалу швидкості. Чисельне інтегрування рівняння Лапласу здійснюється за допомогою метода розщеплення. Після розщеплення будуються різницеві рівняння, що можуть бути вирішені за явною формулою. Для моделювання розповсюдження пилу в атмосферному повітрі використовується модель Г. Марчука. Для чисельного інтегрування рівняння масопереносу використовуються різницеві схеми розщеплення. На першому етапі здійснюється фізичне розщеплення на рівняння дифузії та конвективного переносу пилу. Далі будуються змінно-трикутні різницеві схеми розщеплення. Рельєф місцевості моделюється на прямокутній різницевої сітці за допомогою маркерів. **Результати.** Розроблений комплекс чисельних моделей для рішення задачі: аеродинаміки та масопереносу вагомої домішки в атмосферному повітрі. Для побудови чисельних моделей використані кінцево-різницеві схеми розщеплення, що дозволяють отримати прості розрахункові залежності. Побудовані чисельні моделі дають можливість оперативно розраховувати динаміку пилового забруднення в умовах складного рельєфу місцевості. **Наукова новизна.** Побудовані чисельні моделі для аналізу динаміки пилового забруднення атмосферного повітря після вибуху в кар'єрі. Модель дає можливість враховувати геометричну форму рельєфу, метеоумови, швидкість гравітаційного осадження пилу, атмосферну дифузію, форму пилової хмари після вибуху. Модель може бути використана для експрес оцінювання впливу вибухів на навколишнє середовище. **Практична значимість.** Розроблений спеціалізований пакет комп'ютерних програм для проведення обчислювального експерименту на базі побудованих чисельних моделей. Наведено результати чисельного експерименту.

Ключові слова: забруднення повітря; пилова хмара; кар'єр; CFD моделювання; масоперенос

Вступ

Вибухи в кар'єрах призводять до інтенсивного забруднення атмосферного повітря (рис. 1). Тому, прогнозування динаміки забруднення атмосферного повітря після вибухів в кар'єрах має важливе з точки зору захисту довкілля, охорони праці. Для такого прогнозу важно мати спеціалізовані математичні моделі.

З точки зору моделювання, розрахунок поширення пилу після вибуху в кар'єрі – це задача нестационарного масопереносу. Для рішення задач даного класу широко використовуються аналітичні моделі [6–14] та CFD моделі [1–3]. Аналітичні моделі потребують незначної кількості початкових даних та дають можливість аналізувати динаміки забруднення атмосферного повітря, але без урахування впливу рельєфу

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

на цей процес. CFD моделі дають можливість отримати детальну інформацію про формування областей пилового забруднення, але потрібна значна кількість науково-обґрунтованої інформації в якості початкових даних. Реалізація математичних моделей даного класу потребує дуже потужних комп'ютерів та значного часу на проведення розрахунку. На етапі науково-дослідницьких робіт, що пов'язані з оцінюванням впливу вибухів на забруднення навколишнього середовища це є досить не зручним. В багатьох випадках, при проведенні наукових досліджень, потрібно робити значну кількість розрахунків (наприклад, визначення областей забруднення при різних метеоумовах, різної потужності вибуху тощо). Тому, для практики, важливо мати математичні моделі, що враховують такі важливі фактори, як рельєф, метеоумови тощо, а з іншого боку, потребують мало часу при реалізації на комп'ютері.

Загальновідомо, що забруднення від транспортних засобів на міських вулицях є дуже інтенсивним і може завдати шкоди людині. Для зменшення інтенсивності забруднення повітря від дорожнього руху пропонуються різні заходи пом'якшення.



Рис. 1. Пилогазова хмара в кар'єрі
[https://doi.org/10.15421/2018_277]

Fig. 1. Dust cloud in the quarry
[https://doi.org/10.15421/2018_277]

Мета

Метою даної роботи є розробка швидко розрахункової CFD моделі для аналізу забруднення атмосферного повітря після вибуху в кар'єрі. Створення пакету прикладних програм для рішення задач нестационарного розповсюдження пилу в атмосфері в умовах складного рельєфу місцевості.

Методика

Після вибуху в кар'єрі формується пилогазова хмара, що починає рухатися в напрямку вітру. Особливістю даного процесу є те, що рух хмари відбувається в умовах складного рельєфу місцевості. Це значно ускладнює розробку математичних моделей для оцінювання впливу вибухів в кар'єрах на забруднення навколишнього середовища. Для отримання науково обґрунтованої інформації потрібно, щоб математична модель враховувала не тільки метеоумови, но також рельєф місцевості [4]. Тому, першим, важливим етапом моделювання є розробка математичної моделі для розрахунку поля швидкості повітряного потоку в умовах складного рельєфу місцевості [4].

В даній роботі для рішення цієї задачі використовується рівняння Лапласа для потенціалу швидкості:

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

де P – потенціал швидкості повітряного потоку.

Якщо поле потенціалу швидкості розраховано, то компоненти вектору швидкості повітряного потоку визначаються так:

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

Для рівняння (1) ставляться граничні умови, що наведені в роботі [4].

Рішення рівняння (1) знаходиться чисельним шляхом. Для цього використовуються дві різницеві схеми. Для побудови чисельної моделі використовується метод розщеплення для «нестационарного» рівняння, що має наступний вигляд:

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

тут t – фіктивний час.

Далі, при побудові першої схеми реалізується таке розщеплення рівняння (2):

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}; \quad (3)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}. \quad (4)$$

Невідоме значення потенціалу швидкості P визначається на базі рівняння (3) так [5]:

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

Невідоме значення потенціалу швидкості P визначається на базі рівняння (4) так:

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

Так як розрахунок здійснюється за «фіктивним» часом, то для його зупинки потрібно щоб була виконана умова:

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

де ε – мале число; n – номер ітерації.

Друга різницєва схема для чисельного рішення задачі аеродинаміки має вигляд [5]:

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

$$\frac{P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \left[\frac{P_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[\frac{P_{i,j+1}^{n+\frac{1}{2}} - P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right]. \quad (5)$$

Як можна бачити з (5) рішення задачі по визначенню потенціалу швидкості розщеплюється на два кроки. На кожному кроці потенціал швидкості визначається методом «рахунку, що біжить».

Значення компонент швидкості розраховується на бічних сторонах контрольного об'єму наступним чином [5]:

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

Для визначення концентрації пилу в атмосферному повітрі при русі пилової хмари використовується рівняння Г. Марчука (профільна задача) [4]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial (v - w_s)C}{\partial y} =$$

$$= \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right), \quad (6)$$

де C – концентрація пилу в атмосферному повітрі; u, v – компоненти вектору швидкості повітряного потоку; $\mu = (\mu_x, \mu_y)$ – коефіцієнти атмосферної дифузії; w_s – швидкість гравітаційного осадження пилу t це час.

Початкові та граничні умови для рівняння (4) описані в [1, 3, 5]. На місце вибуху в кар'єрі задається форма пилогазової хмари та концентрація пилу в хмарі.

Для чисельного рішення рівняння Г. Марчука здійснюється його фізичне розщеплення так [5]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = 0;$$

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

Далі здійснюється така трансформація похідних:

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

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

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

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

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

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

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

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

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

На наступному кроці записується змінно-трикутна схема розщеплення:

– перший крок:

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

– другий крок :

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

Дана схема дозволяє визначати концентрацію пилу на кожному кроці за явною схемою.

Чисельне інтегрування рівняння дифузії використовується кінцево-різницева схема сумарної апроксимації. Схема розщеплення має вигляд:

– перший крок:

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

– другий крок:

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

Особливістю даної різницевої схеми є те, що визначення концентрації пилу також здійснюється за явною формулою.

Рельєф місцевості моделюється на прямокутній різницевій сітці за допомогою маркерів.

Здійснено кодування розроблених чисельних моделей, мова програмування – FORTRAN. Розроблений комплекс комп'ютерних програм включає в себе підпрограми типу SUBROUTINE:

1. DK1 – розрахунок потенціалу швидкості на базі першої чисельної моделі.

2. DK2 – розрахунок потенціалу швидкості на базі другої чисельної моделі

3. DK3 – реалізація граничних умов в областях складної геометричної форми.

4. DKK – розрахунок поля швидкості повітряного потоку.

5. DE1 – розрахунок концентрації пилу на першому кроці розщеплення (рівняння переносу).

6. DE2 – розрахунок концентрації пилу на другому кроці розщеплення (рівняння переносу).

7. DE3 – розрахунок концентрації пилу на першому кроці розщеплення (рівняння дифузії).

8. DE4 – розрахунок концентрації пилу на першому кроці розщеплення (рівняння дифузії).

9. DPP – друк результатів обчислювального експерименту.

10. VDF – файл початкових даних.

Результати

Розроблені чисельні моделі аеродинаміки та масопереносу були використані для рішення модельної задачі. Розглядався процес руху пилової хмари після вибуху в кар'єрі в умовах складного рельєфу. Мета розрахунку – аналіз стійкості побудованих чисельних моделей при рішенні задач масопереносу в областях складної геометричної форми.

Схема розрахункової області показана на рис.2. Як можна бачити з рис. 2 в розрахунковій області розташовані дві впадини. Перша впадина – кар'єр, де формується пилогазова хмара. На дні другої впадини розташована акваторія річки. Швидкість вітру 8 м/с; швидкість гравітаційного осадження пилу 0,0002 м/с. Коефіцієнти атмосферної дифузії розраховуються так:

$$\mu_x = 0,1u(x,y), \quad \mu_y = 0,1v(x,y).$$

Тобто, коефіцієнти атмосферної дифузії залежать від координат та локальної швидкості повітряного потоку.

Динаміка формування області забруднення показана на рис. 3–5.

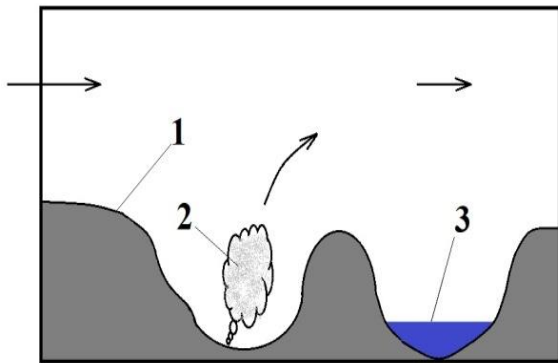


Рис. 2. Схема розрахункової області:
1 – рельєф; 2 – пилогазова хмара; 3 – річка

Fig. 2. Scheme of the calculation area:
1 – relief; 2 – dust cloud; 3 – river

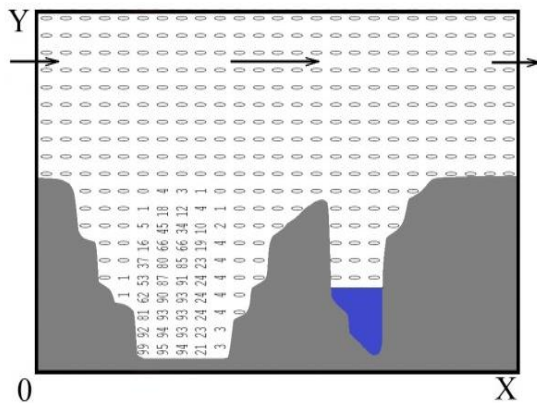


Рис. 3. Концентрація г/м³ пилу в області дослідження, $t = 0,1$

Fig. 3. Concentration g/m³ of dust in the study area, $t = 0.1$

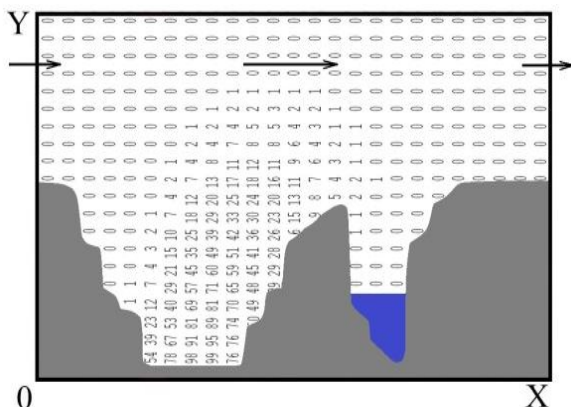


Рис. 4. Концентрація г/м³ пилу в області дослідження, $t = 0,2$

Fig. 4. Concentration g/m³ of dust in the study area, $t = 0.2$

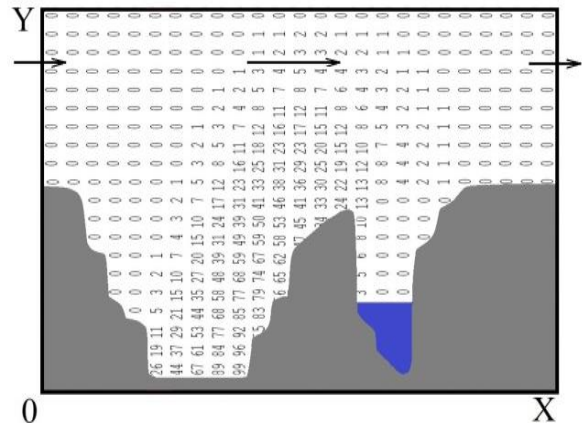


Рис. 5. Концентрація г/м³ пилу в області дослідження, $t = 0,3$

Fig. 5. Concentration g/m³ of dust in the study area, $t = 0.3$

Як можна бачити з наведених рисунків, область забруднення, після вибуху, збільшується в розмірах. Так як розглядалося моделювання легкоवाгової домішки, то можна бачити, що пил, внаслідок атмосферної дифузії, виходить з кар'єру.

Проведений обчислювальний експеримент підтвердив стійкість та працездатність розроблених чисельних моделей для аналізу областей забруднення в умовах складного рельєфу.

Час розрахунку 2 с.

Наукова новизна та практична значимість

Побудовані чисельні моделі для аналізу динаміки пилового забруднення атмосферного повітря після вибуху в кар'єрі. Модель дає можливість враховувати геометричну форму рельєфу, метеоумови, швидкість гравітаційного осадження пилу, атмосферну дифузію, форму пилової хмари після вибуху.

Модель може бути використана для експрес оцінювання впливу вибухів на навколишнє середовище.

Висновки

Розроблений комплекс чисельних моделей для рішення наступних задач:

- аеродинаміки повітряного потоку;
- масопереносу вагової домішки в атмосферному повітрі.

Для побудови чисельних моделей використані кінцево-різницеві схеми розщеплення, що дозволяють отримати прості розрахункові залежності.

Побудовані чисельні моделі дають можливість оперативно розраховувати динаміку пи-

лового забруднення в умовах складного рельєфу місцевості.

Подальший розвиток досліджень буде здійснюватися в напрямку створення 3D CFD моделей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

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. Біляєв М. М., Калашніков І. В., Біляєва В. В., Козачина В. А., Берлов О. В. *Технології захисту навколишнього середовища: захист повітряного середовища* : монографія. Запоріжжя : СТАТУС, 2025. 244 с.
3. Згуровский М. З., Скопецкий В. В., Хрущ В. К., Беляев Н. Н. *Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде*. Киев : Наукова думка, 1997. 368 с.
4. Марчук Г. И. *Математическое моделирование в проблеме окружающей среды*. Москва : Наука, 1982. 320 с.
5. Самарский А. А. *Теория разностных схем*. Москва : Наука, 1983. 616 с.
6. Agibayeva A., Khalikhan R., Guney M., Karaca F., Torezhan A., Avcu E. An Air Quality Modeling and Disability-Adjusted Life Years (DALY) Risk Assessment Case Study: Comparing Statistical and Machine Learning Approaches for PM2.5 Forecasting. *Sustainability*. 2022. Vol. 14, Iss. 24. 16641. DOI: <https://doi.org/10.3390/su142416641>
7. Bseibsu A., Madhuranthakam C. M. R., Yetilmezsoy K., Almansoori A., Elkamel A. Numerical Simulation of Dispersion Patterns and Air Emissions for Optimal Location of New Industries Accounting for Environmental Risks. *Pollutants*. 2022. Vol. 2, Iss. 4. P 444–461. DOI: <https://doi.org/10.3390/pollutants2040030>
8. Eslamidoost Z., Arabzadeh M., Oskoie V., Dehghani S., Samaei M., Hashemi H., Baghapour M. Dispersion of NO2 pollutant in a gas refinery with AERMOD model: A case study in the Middle East. *Journal of Air Pollution and Health*. 2022. Vol. 7, No 3. P. 309–322. DOI: <https://doi.org/10.18502/japh.v7i3.10544>
9. Eslamidoost Z., Samaei M. R., Hashemi H., Baghapour M. A., Arabzadeh M., Dehghani S., Rajabi S. Assessment of air quality using AERMOD modeling: a case study in the Middle East. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2023. Vol. 195, Iss. 11. Art. 1272. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11879-2>
10. Nath A., Dhal G. C. CALINE4 and AERMOD modelling for roadway vehicle-related air pollution: a recent review in India. *Environmental Science and Pollution Research*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34701-z>
11. Normatova M., Pardayeva S. Reducing dust pollution in the production of mass explosions in quarries. *E3S Web of Conferences*. 2024. Vol. 525. Art. 01003. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202452501003>
12. Rezaali M., Fouladi-Fard R., O'Shaughnessy P., Naddafi K., Karimi A. Assessment of AERMOD and ADMS for NOx dispersion modeling with a combination of line and point sources. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 2025. Vol. 39, Iss. 2. P. 813–827. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00477-024-02903-z>
13. Shuvalov V., Khazins V., Krashennnikov A., Soloviev S. Formation and Evolution of a Dust Cloud as a Result of TNT Detonation in a Borehole: Numerical Simulation. *Mining*. 2023. Vol. 3, Iss. 2. P. 261–270. DOI: <https://doi.org/10.3390/mining3020016>
14. Tan A. Z. L., Ho W. S., Hassim M. H., Abdullah F., Lim L. Y. Evaluation of industrial air pollution contribution by type of industry in Pasir Gudang using AERMOD. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2025. Vol. 197. Art. 385. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-025-13797-x>

O. O. MEDVEDIEVA¹, V. V. BILIAIEVA², P. S. KIRICHENKO³, V. A. KOZACHYNA^{4*},
A. Yu. USENKO⁵

¹M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Simferopolska St., 2a, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (098) 506 98 00, e-mail medvedevaolga1702@gmail.com, ORCID 0000-0001-5575-713X

²Dep. «Natural Sciences and General Engineering Disciplines», LLC «Technical University «METINVEST POLYTECHNIC»», Southern Highway, 80, Zaporizhzhia, Ukraine, 69008, tel. +38 (056) 374 98 22, e-mail v.v.biliaieva@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-2399-3124

³Dep. «Heat and gas supply», drainage and ventilation, Kryvyi Rih National University, Vitaly Matusevich St., 11, Kryvyi Rih, 50027, Ukraine, tel. +38 (056) 409 06 06, e-mail pasha_129@ukr.net, ORCID 0000-0002-0793-9593

^{4*}Dep. «Hydraulics, Water Supply and Physics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail v.kozachyna@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532

⁵Dep. «Energy Systems and Energy Management», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DMI, Science Av., 4, Dnipro, Ukraine, 49600, tel. +38 (056) 374 98 22, e-mail usenko.pte@ukr.net, ORCID 0000-0001-7467-6220

Mathematical Modeling of Air Pollution After a Quarry Explosion: Express Forecast

Purpose. Development of a CFD model that makes it possible to quickly predict the level of dust pollution of atmospheric air after an explosion in a quarry, development of a fast CFD calculation model. **Methodology.** To solve the aerodynamics and mass transfer problem, the fundamental equations of continuum mechanics are used. The air flow velocity field is modeled using the Laplace equation for the velocity potential. Numerical integration of the Laplace equation is carried out using the splitting method. After splitting, difference equations are constructed that can be solved by an explicit formula. The G. Marchuk model is used to model the distribution of dust in atmospheric air. Difference splitting schemes are used for numerical integration of the mass transfer equation. At the first stage, physical splitting is carried out into the equations of diffusion and convective dust transport. Then, alternating triangular difference splitting schemes are constructed. The terrain is modeled on a rectangular difference grid using markers. **Findings.** A set of numerical models has been developed to solve the problems of aerodynamics and mass transfer of a significant impurity in atmospheric air. Finite-difference splitting schemes have been used to build numerical models, which allow obtaining simple calculation dependencies. The constructed numerical models make it possible to quickly calculate the dynamics of dust pollution in conditions of complex terrain. **Originality.** Numerical models have been built to analyze the dynamics of dust pollution of atmospheric air after an explosion in a quarry. The model makes it possible to take into account the geometric shape of the relief, weather conditions, the rate of gravitational dust deposition, atmospheric diffusion, and the shape of the dust cloud after the explosion. The model can be used for rapid assessment of the impact of explosions on the environment. **Practical value.** A specialized package of computer programs has been developed to conduct a computational experiment based on the constructed numerical models. The results of the numerical experiment are presented.

Key words: air pollution; dust cloud; quarry; CFD modeling; mass transfer

REFERENCES

1. Biliaiev, M. M., Biliaieva, V. V., Berlov, O. V., & Kozachyna, V. A. (2022). *CFD modeliuvannia v analizi efektyvnosti system zakhystu dovkillia ta pratsivnykiv na robochykh mistsiakh*. Dnipro: Zhurfond. (in Ukrainian)
2. Biliaiev M. M., Kalashnikov I. V., Biliaieva V. V., Kozachyna V. A. & Berlov O. V. (2025). *Tekhnolohii zakhystu navkolyshnoho seredovyshcha: zakhyst povitrianoho seredovyshcha*. Zaporizhzhia: STATUS. (in Ukrainian)
3. Zgurovskii, M. Z., Skopetskii, V. V., Khrutch, V. K., & Biliaiev, M. M. (1997). *Chyslennoe modelyrovanye rasprostraneniya zahriazneniya v okruzhaiushchei srede*. Kyiv: Naukova dumka. (in Russian)
4. Marchuk, G. I. (1982). *Matematicheskoye modelirovaniye v probleme okruzhayushchey sredy*. Moscow: Nauka. (in Russian)
5. Samarskiy A. A. (1983). *Teoriya raznostnykh skhem*. Moscow: Nauka. (in Russian)
6. Agibayeva, A., Khalikhan, R., Guney, M., Karaca, F., Torezhan, A., & Avcu, E. (2022). An Air Quality Modeling and Disability-Adjusted Life Years (DALY) Risk Assessment Case Study: Comparing Statistical and Machine Learning Approaches for PM2.5 Forecasting. *Sustainability*, 14(24), 16641. DOI: <https://doi.org/10.3390/su142416641> (in English)

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

7. Bseibsu, A. Madhuranthakam, C. M. R., Yetilmezsoy, K. Almansoori, A., & Elkamel, A. (2022). Numerical Simulation of Dispersion Patterns and Air Emissions for Optimal Location of New Industries Accounting for Environmental Risks. *Pollutants*, 2(4), 444-461. DOI: <https://doi.org/10.3390/pollutants2040030> (in English)
8. Eslamidoost, Z., Arabzadeh, M., Oskoie, V., Dehghani, S., Samaei, M., Hashemi, H., & Baghapour, M. (2022). Dispersion of NO₂ pollutant in a gas refinery with AERMOD model: A case study in the Middle East. *Journal of Air Pollution and Health*, 7(3), 309-322. DOI: <https://doi.org/10.18502/japh.v7i3.10544> (in English)
9. Eslamidoost, Z., Samaei, M. R., Hashemi, H., Baghapour, M. A., Arabzadeh, M., Dehghani, S., & Rajabi, S. (2023). Assessment of air quality using AERMOD modeling: a case study in the Middle East. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(11), 1272. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11879-2> (in English)
10. Nath, A., & Dhal, G. C. (2024). CALINE4 and AERMOD modelling for roadway vehicle-related air pollution: a recent review in India. *Environmental Science and Pollution Research*. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34701-z> (in English)
11. Normatova, M., & Pardayeva, S. (2024). Reducing dust pollution in the production of mass explosions in quarries. *E3S Web of Conferences*, 525, 01003. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202452501003> (in English)
12. Rezaali, M., Fouladi-Fard, R., O'Shaughnessy, P., Naddafi, K., & Karimi, A. (2025). Assessment of AERMOD and ADMS for NO_x dispersion modeling with a combination of line and point sources. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 39(2), 813-827. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00477-024-02903-z> (in English)
13. Shuvalov, V., Khazins, V., Krashennnikov, A., & Soloviev, S. (2023). Formation and Evolution of a Dust Cloud as a Result of TNT Detonation in a Borehole: Numerical Simulation. *Mining*, 3(2), 261-270. DOI: <https://doi.org/10.3390/mining3020016> (in English)
14. Tan, A. Z. L., Ho, W. S., Hassim, M. H. Abdullah F., & Lim L. Y. (2025). Evaluation of industrial air pollution contribution by type of industry in Pasir Gudang using AERMOD. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197, 385. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-025-13797-x> (in English)

Надійшла до редколегії: 21.07.2025

Прийнята до друку: 19.12.2025