

УДК 519.6:331.45

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.270225.57.1129

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗАХИСНИХ БАР'ЄРІВ НА ЗМЕНШЕННЯ РИЗИКУ ВИНИКНЕННЯ ЗАХВОРЮВАНЬ У ПРАЦІВНИКІВ

БІЛЯЄВ М. М.¹, *докт. техн. наук, проф.*,
БЕРЛОВ О. В.^{2*}, *канд. техн. наук, доц.*,
КОЗАЧИНА В. А.³, *канд. техн. наук, доц.*,
МАШИХІНА П. Б.⁴, *канд. техн. наук, доц.*,
ТИМОШЕНКО О. А.⁵, *канд. техн. наук, доц.*

¹ Кафедра гідравліки, водопостачання та фізики, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту», вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 373-15-09, e-mail: biliaiev.m@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1531-7882

^{2*} Кафедра охорони праці, цивільної та техногенної безпеки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-57, e-mail: berlov.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-7442-0548

³ Кафедра гідравліки, водопостачання та фізики, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту», вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 373-15-09, e-mail: v.kozachyna@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-6894-5532

⁴ Кафедра гідравліки, водопостачання та фізики, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту», вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 373-15-09, e-mail: gidro_eko@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-3057-9204

⁵ Кафедра екології та охорони навколишнього середовища, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 452-43-63, e-mail: mitomdnipro1997@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3114-9820

Анотація. *Постановка проблеми.* Викиди від автотранспорту створюють значні зони хімічного забруднення повітря біля автодоріг. Поблизу автомобільних доріг часто розташовуються торговельні павільйони. Таке розташування людей протягом робочого дня біля магістралі створює ризик захворювання працівників. Тому важливо знизити інтенсивність забруднення повітря. Найпростішим і найефективнішим способом захисту від забруднення атмосферного повітря поблизу автомобільних доріг є використання бар'єрів. Для обґрунтування параметрів захисного бар'єру потрібно мати спеціалізовані математичні моделі. **Мета роботи.** Розробка чисельних моделей для розрахунку рівня забруднення робочих зон біля автодоріг з метою визначення ефективності використання захисних бар'єрів для зниження ризику захворювань у працівників. **Методика.** Для математичного моделювання поширення домішки при наявності захисних бар'єрів використовуються двовимірні рівняння аеродинаміки та масопереносу. Розроблена чисельна модель дозволяє врахувати профіль швидкості повітряного потоку, атмосферну дифузію, інтенсивність емісії домішки, швидкість гравітаційного осадження домішки в повітрі. Для чисельного інтегрування моделюючих рівнянь аеродинаміки та масопереносу використовуються кінцево-різницеві схеми розщеплення. **Наукова новизна.** Запропонована ефективна чисельна модель, що дозволяє визначати поле концентрації небезпечної речовини біля автотраси. Модель дозволяє аналізувати зони забруднення повітря з урахуванням впливу захисного бар'єру, що розташований біля автодороги. На базі даних про розподіл концентрації небезпечної речовини визначається ризик появи захворювань у людини, що знаходиться в зоні впливу викидів від автотранспорту. **Практична значущість.** Побудована модель може бути використана для експрес прогнозу рівня небезпеки для працівників, чия робоча зона розташовується біля автодороги. **Висновки.** Здійснена програмна реалізація розробленої чисельної моделі, проведений обчислювальний експеримент, що проілюстрував ефективність використання розробленої чисельної моделі для рішення прикладних задач.

Ключові слова: *математичне моделювання; захисний бар'єр; викиди авто; ризик захворювань; забруднення повітря*

RESEARCH OF THE INFLUENCE OF PROTECTIVE BARRIERS ON REDUCING THE RISK OF ILLNESSES IN WORKERS

BILIAIEV M.M.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
BERLOV O.V.^{2*}, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,

KOZACHYNA V.A.³, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
MASHYKHINA P.B.⁴, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
TYMOSHENKO O.A.⁵, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

¹ Department of Hydraulics, Water Supply and Physics, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Dnipro Institute of Infrastructure and Transport”, 2, Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (056) 373-15-09, e-mail: biliaiev.m@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1531-7882

^{2*} Department of Labor Protection, Civil and Technogenic Safety, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-57, e-mail: berlov.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-7442-0548

³ Department of Hydraulics, Water Supply and Physics, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Dnipro Institute of Infrastructure and Transport”, 2, Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (056) 373-15-09, e-mail: y.kozachyna@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-6894-5532

⁴ Department of Hydraulics, Water Supply and Physics, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Dnipro Institute of Infrastructure and Transport”, 2, Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (056) 373-15-09, e-mail: gidro_eko@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-3057-9204

⁵ Department of Ecology and Environmental Protection, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (050) 452-43-63, e-mail: mitomdnipro1997@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3114-9820

Abstract. Problem statement. Emissions from motor vehicles create significant areas of chemical air pollution near highways. Shopping malls are often located near highways. This arrangement of people during the working day near the highway creates a risk of workers becoming ill. Therefore, it is important to reduce the intensity of air pollution. The simplest and most effective way to protect against atmospheric air pollution near highways is to use barriers. To substantiate the parameters of the protective barrier, you need to have specialized mathematical models.

The purpose of the article. Development of numerical models to calculate the level of contamination of work areas near highways in order to determine the effectiveness of using protective barriers to reduce the risk of diseases in workers.

Methodology. For mathematical modeling of impurity propagation in the presence of protective barriers, two-dimensional equations of aerodynamics and mass transfer are used. The developed numerical model allows taking into account the air flow velocity profile, atmospheric diffusion, impurity emission intensity, and the rate of gravitational deposition of the impurity in the air. Finite-difference splitting schemes are used for numerical integration of the modeling equations of aerodynamics and mass transfer.

Scientific novelty. An effective numerical model is proposed that allows determining the field of concentration of a hazardous substance near a highway. The model allows analyzing air pollution zones taking into account the influence of a protective barrier located near the highway. Based on the data on the distribution of the concentration of a hazardous substance, the risk of developing diseases in a person located in the zone of influence of vehicle emissions is determined.

Practical significance. The constructed model can be used to quickly predict the level of danger for workers whose work area is located near the road. **Conclusions.** A software implementation of the developed numerical model was carried out, and a computational experiment was conducted, which illustrated the effectiveness of using the developed numerical model for solving applied problems.

Keywords: *mathematical modeling; protective barrier; car emissions; disease risk; air pollution*

Постановка проблеми. Відомо, що інтенсивне забруднення повітря відбувається поблизу автомобільних доріг. Викиди автомобілів містять значну кількість шкідливих речовин, небезпечних для здоров'я. Поблизу автомобільних доріг часто розташовуються торговельні павільйони. Таке розташування людей протягом робочого дня біля магістралі створює ризик захворювання працівників. Тому важливо знизити інтенсивність забруднення повітря. Найпростішим і найефективнішим способом захисту від забруднення атмосферного повітря поблизу автомобільних доріг є використання бар'єрів (рис. 1) [1–5; 7]. Для оцінки ефективності бар'єрів широко

використовуються експериментальні методи (рис. 2, 3). Але використання таких методів дослідження є трудомістким і дорогим.



Рис. 1. Захисний бар'єр біля автотраси [2]

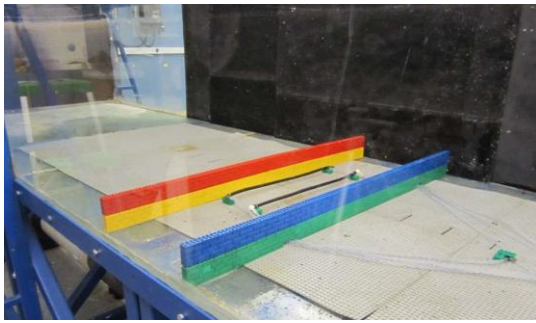


Рис. 2. Розташування моделі захисних бар'єрів в лабораторії [2]

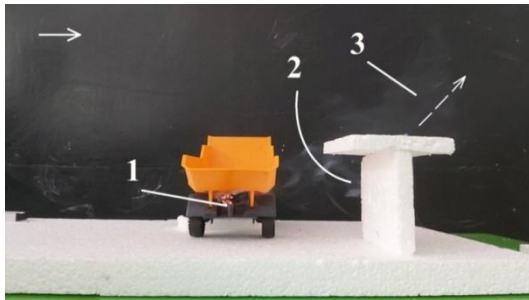


Рис. 3. Експериментальне дослідження зон забруднення з використанням бар'єру Т-форми: 1 – місце емісії CO; 2 – область забруднення під пластиною; 3 – область забруднення над пластиною [3]

Для практики важливо мати обчислювальні методи, які дозволяють швидко визначити ефективність бар'єрів для конкретних умов. До таких методів належать, серед інших, модель Гауса [2], різні CFD моделі (рис. 4) [2; 4].

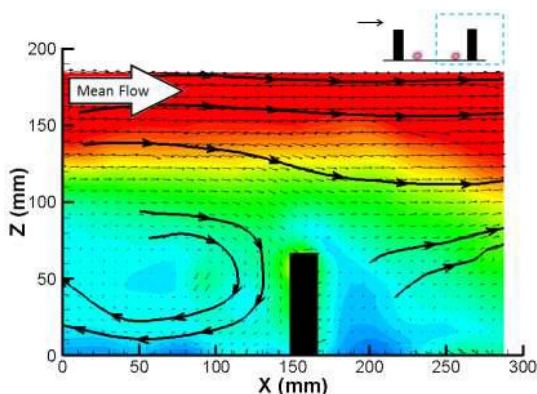


Рис. 4. CFD моделювання зони забруднення біля бар'єру [2]

Для практики також важливо мати швидкі обчислювальні моделі для оцінки ефективності бар'єрів для конкретних умов. Нижче розглядається така модель CFD для аналізу інтенсивності зон забруднення поблизу автомагістралі та оцінки

ефективності використання бар'єрів різної форми для зменшення інтенсивності забруднення повітря біля павільйонів.

Мета статті – розробка чисельних моделей для розрахунку рівня забруднення робочих зон біля автодоріг з метою визначення ефективності використання захисних бар'єрів для зниження ризику захворювань у працівників.

Методика. У цій статті розглядалося забруднення CO біля дороги з бар'єром. Для розрахунку зон забруднення повітря (викиди продуктів згоряння) використовували рівняння масопереносу [3; 5; 6]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + Q_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i), \quad (1)$$

де C – концентрація CO в повітрі, u , v – складові вектора швидкості вітру, x_i , y_i – декартові координати джерела викидів, t – час, μ_x , μ_y – коефіцієнти турбулентної дифузії в атмосфері, $\delta(x_i, y_i)$ – дельта-функція Дірака, Q – інтенсивність викидів CO. Коефіцієнти турбулентної дифузії в атмосфері були визначені наступним чином:

$$\mu_x = 0,1 \cdot u, \quad \mu_y = 0,1 \cdot v.$$

Граничні умови для (1) були такими:

1. На межі входу повітряного потоку: $C = 0$.

2. На межі витоку потоку з розрахункової області: $\partial C / \partial n = 0$.

3. На твердих межах і на поверхнях $y = 0$, $y = L_y$ (L_y – верхня межа області): $\partial C / \partial n = 0$, де n – одиничний вектор зовнішньої нормалі до поверхні.

Для часу $t = 0$ початкова умова була $C = 0$.

Чисельне інтегрування рівняння масообміну (1) проводилось з використанням різницевої схеми та прямокутної сітки. Для формування геометричного вигляду розрахункової області (форма бар'єру, його положення, положення павільйону тощо) використовувалися маркери [6].

Спочатку (1) було виконаємо розщеплення різницевого рівняння (1) таким

чином :

- на *першому кроці* розщеплення $k = \frac{1}{4}$ різницеве рівняння має вигляд :

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^{n+k} - C_{ij}^n}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^+ C^k + L_y^+ C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \\ = \frac{1}{4}(M_{xx}^+ C^k + M_{xx}^- C^k + M_{yy}^+ C^n + \\ + M_{yy}^- C^n) + \sum_{l=1}^N \frac{Q_l}{4} \delta_l ; \end{aligned} \quad (2)$$

- на *другому кроці* розщеплення $k = n + \frac{1}{2}$, $c = n + \frac{1}{4}$ різницеве рівняння має вигляд :

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^- C^k + L_y^- C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \\ = \frac{1}{4}(M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + M_{yy}^- C^k + \\ + M_{yy}^+ C^c) + \sum_{l=1}^N \frac{Q_l}{4} \delta_l ; \end{aligned} \quad (3)$$

- на *третьому кроці* розщеплення $k = n + \frac{3}{4}$, $c = n + \frac{1}{2}$ різницеве рівняння має вигляд :

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^+ C^k + L_y^- C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \\ = \frac{1}{4}(M_{xx}^- C^c + M_{xx}^+ C^k + M_{yy}^- C^k + \\ + M_{yy}^+ C^c) + \sum_{l=1}^N \frac{Q_l}{4} \delta_l ; \end{aligned} \quad (4)$$

- на *четвертому кроці* розщеплення $k = n + 1$, $c = n + \frac{3}{4}$ різницеве рівняння має вигляд :

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^- C^k + L_y^+ C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \\ = \frac{1}{4}(M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + M_{yy}^- C^c + \\ + M_{yy}^+ C^k) + \sum_{l=1}^N \frac{Q_l}{4} \delta_l ; \end{aligned} \quad (5)$$

Значення різницевих операторів $L_x^+, L_x^-, L_y^+, L_y^-$ наведені в [6].

З рівнянь (2) – (5) невідоме значення

концентрації пилу на верхньому часовому шарі визначається за явною формулою біжучого рахунку. Початкова умова для цих рівнянь записується у вигляді :

$$C^1| = C(x, y, t^n), C^k| = C^{k-1}|.$$

Щоб реалізувати граничну умову на твердих стінках вигляду :

$$\frac{\partial C}{\partial n} = 0,$$

застосовуються фіктивні комірки.

Бар'єр, павільйон (споруда) впливають на характер вітрового потоку біля дороги. Для розрахунку поля швидкостей використовувалася модель потенційного потоку. У цьому випадку основним рівнянням було рівняння Лапласу:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0, \quad (6)$$

де P – потенціал швидкості.

Граничні умови для (4) розглянуті в [6]. На межі притоку потоку в розрахункову область використовувався наступний профіль швидкості вітру :

$$u(y) = u_1 \cdot (y/y_1)^{n_1},$$

де u_1 – швидкість вітру на висоті $y_1 = 1$ м.

Складові швидкості вітру визначали наступним чином:

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

Для чисельного інтегрування (6) його записали у вигляді :

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}, \quad (7)$$

де t – фіктивний час. При $t \rightarrow \infty$ розв'язок (7) буде прагнути до «сталого» розв'язку, тобто до розв'язку (6).

На наступному кроці здійснюється геометричне розщеплення рівняння (7) таким чином :

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}. \quad (9)$$

Далі для визначення невідомого значення P на базі рівняння (8) 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 (9) застосовується залежність :

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

Обчислення закінчуються, коли виконувалася наступна умова :

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

де ε – мале число ($\varepsilon = 0,001$), n – номер ітерації.

Після розрахунку поля потенціалу швидкості розраховували складові вектора швидкості повітряного потоку за залежностями :

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

Для оцінки ефективності бар'єру використовувався наступний параметр :

$$HQ = \frac{C_R}{R_{fc}},$$

де HQ – показник ризику потенційної небезпеки (Hazard Quotient); C_R – концентрація CO в точці розташування рецептора; R_{fc} – референтна концентрація ($R_{fc} = 3 \text{ мг/м}^3$). Якщо $HQ \ll 1$, це означає, що ризик для здоров'я мінімальний.

Для кодування розробленої чисельної моделі використовувався FORTRAN.

Результати. Розроблена чисельна модель була використана для розрахунку зон забруднення при викидах CO з дороги із

захисним бар'єром, що мав складну форму. Було розглянуто чотири сценарії: сценарій № 1 – відсутність захисного бар'єру (рис. 4); сценарій № 2 – вертикальний Г-подібний бар'єр, $H = 2,5$ м, довжина горизонтального елемента 1 м (рис. 5); сценарій № 3 – Г-подібний бар'єр, $H = 5$ м, довжина горизонтального елемента 1 м (рис. 6); сценарій № 4 – бар'єр с додатковим елементом, що має складну форму (рис. 7).

Вихідні дані були такими : $u_1 = 5,3$ м/с; висота павільйону 5 м; бар'єр знаходився в 7 м від павільйону; розміри розрахункової області $25 \text{ м} \times 12,5 \text{ м}$; Швидкість викиду CO складала 17 мг/с. Точка «інтересу» (рецептор) знаходилася біля стіни павільйону на висоті 1,7 м (рис. 4, а). Результати чисельного експерименту (зони забруднення) показані на рисунках нижче. Кожне число на цих малюнках показує концентрацію забруднювача у відсотках від максимальної концентрації C_{max} .

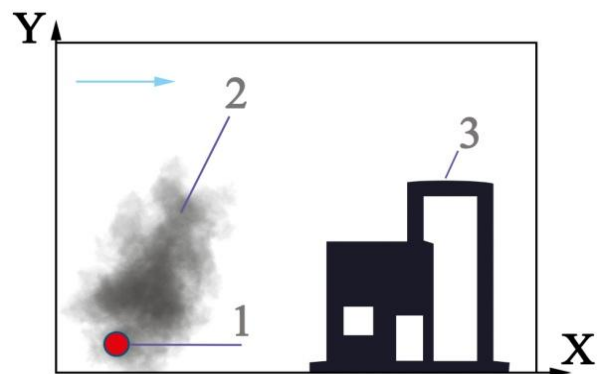


Рис. 5. Схема розрахункової області (сценарій № 1, нема бар'єру)

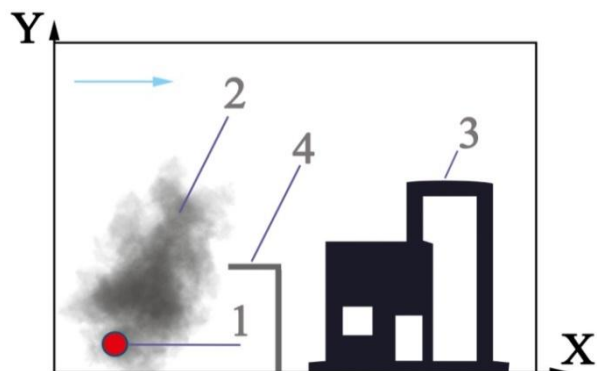


Рис. 6. Схема розрахункової області (сценарій № 2, висота бар'єру $H = 2.5$ м)

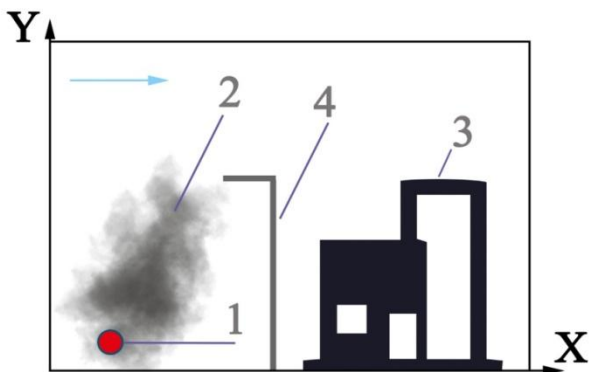


Рис. 7. Схема розрахункової області (сценарій № 3, висота бар'єру $H = 5$ м)

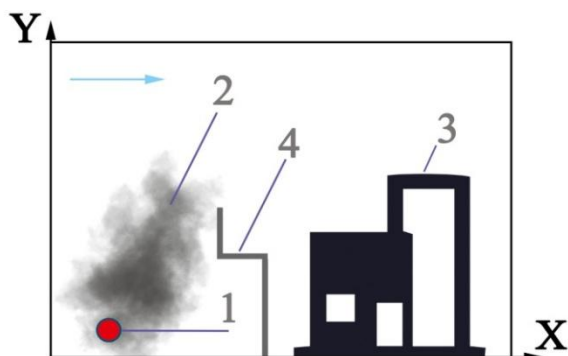


Рис. 8. Схема розрахункової області (сценарій № 4, бар'єр с додатковим елементом)

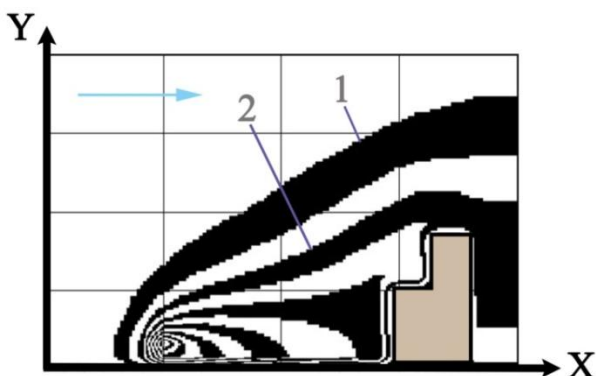


Рис. 9. Схема розрахункової області (сценарій № 1, нема бар'єру). Ізолінії концентрації CO (сценарій № 1): 1 – $C = 0.24$ мг/м³; 2 – $C = 0.56$ мг/м³

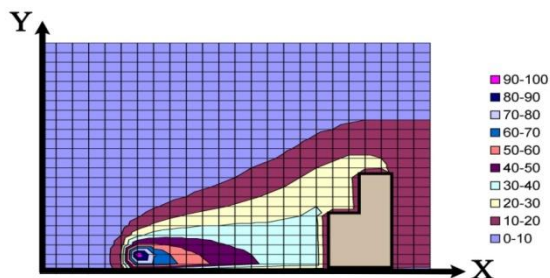


Рис. 10. Поле концентрації CO, сценарій № 2, $C_{max} = 2.41$ мг/м³

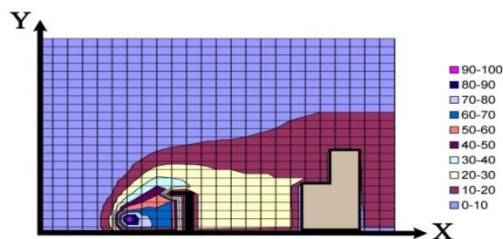


Рис. 11. Поле концентрації CO, сценарій № 3, $C_{max} = 2.88$ мг/м³

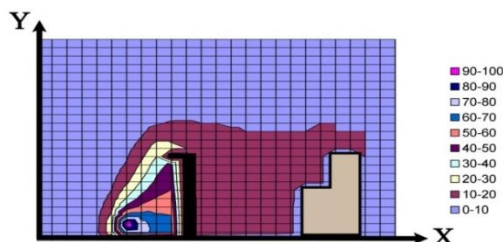


Рис. 12. Поле концентрації CO, сценарій № 3, $C_{max} = 3.29$ мг/м³

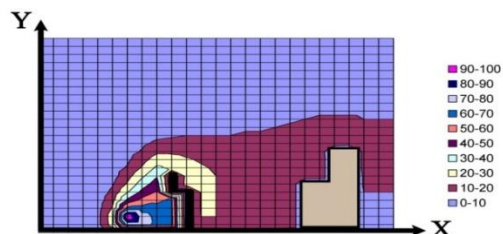


Рис. 13. Поле концентрації CO, сценарій № 4, $C_{max} = 3.12$ мг/м³

Дані, що наведені на рисунках 9–13 показують, що бар'єри викликають деформацію зони забруднення біля дороги. Найбільш забруднена зона утворилася між автомобілем (джерелом викидів) та бар'єром через «гальмування» вітрового потоку в цій області.

У таблиці 1 наведено показник ризику потенційної небезпеки для рецептора (людина біля павільйона).

Таблиця 1

Показник ризику потенційної небезпеки HQ (Hazard Quotient)

Сценарій	HQ
Сценарій № 1	0,27
Сценарій № 2	0,21
Сценарій № 3	0,14
Сценарій № 4	0,18

Дані таблиці 1 показують, що найбільш ефективним є 3-й сценарій, тобто використання бар'єру, що має висоту $H = 5$ м.

Також видно, що якщо використовувати бар'єр $H = 2,5$ м але з додатковим елементом (сценарій № 4), то це дозволяє досягти також непоганий результат.

Варто відзначити, що час обчислення становив 2 секунди для кожного сценарію.

Наукова новизна та практична цінність. Запропонована ефективна чисельна модель, що дозволяє визначити поле концентрації небезпечної речовини біля автотраси. Модель дозволяє аналізувати зони забруднення повітря з урахуванням впливу захисного бар'єру, що розташований біля автодороги. На базі даних про розподіл концентрації небезпечної речовини визначається ризик появи захворювань у людини, що знаходиться в зоні впливу викидів від автотранспорту.

Побудована модель може бути

використана для експрес прогнозу рівня небезпеки для працівників, чия робоча зона розташовується біля автодороги.

Висновки

1. Змодельовано вплив бар'єрів на забруднення повітря біля доріг. Для цього була розроблена модель CFD. Розроблена CFD-модель споживає небагато обчислювального часу завдяки застосуванню моделі потенційного потоку для імітації картини вітрового потоку в регіоні, який мав комплексну геометричну форму.

2. Результати чисельного експерименту показують, що вертикальний бар'єр, який має висоту $H = 5$ м, дозволяє зменшити концентрацію забруднюючих речовин біля павільйону, який встановлено біля дороги.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Schulte N., Venkatram A. Effects of Sound Barriers on Dispersion from Roadways. DRAFT Final Report. USA : Bourns College of Engineering, 2013. 100 p.
2. Princevac M. Near Field Effects of Sound Barriers on Flow and Dispersion. USA : AQMD, 2013. 95 p.
3. Біляєв М. М., Берлов О. В., Біліяєва В. В., Козачина В. А., Якубовська З. М. Дослідження ефективності захисних екранів різної форми на зниження забруднення повітря. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2023. № 4 (016). С. 27–33. DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.290823.27.967
4. Maruntalu O., Lazaroiu G., Bondrea D. Variations in the atmospheric pollutant immission (2009–2015) field near a large lignite-fired power plant (in Europe/Poland). *U.P.B. Sci. Bull.* 2015. Ser. D 77 (4). Pp. 229–236.
5. Biliaiev M., Pshinko O., Rusakova T., Biliaieva V., Sladkowski A. Computer Model for Simulation of Pollutant Dispersion Near the Road with Solid Barriers. *Transp. Probl.* 2021. № 16 (2). Pp. 73–86.
6. Згуровский М. З., Скопецкий В. В., Хрущ В. К., Беляев Н. Н. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде. Київ : Наукова думка, 1997. 368 с.
7. Biliaiev M., Berlov O., Biliaieva V., Kozachyna V. A., Kozachyna V. V., Yakubovska Z. Modeling Influence of TiO₂ Barrier Coating on Pollutant Dispersion Near Road. *27th International Scientific Conference Transport Means-2023 : Proceedings of the International Conference*. P. 1, vol. 4–6. October, 2023. Pp. 511–517. ISSN 1822296X.

REFERENCES

1. Schulte N. and Venkatram A. Effects of Sound Barriers on Dispersion from Roadways. DRAFT Final Report. USA : Bourns College of Engineering, 2013, 100 p.
2. Princevac M. Near Field Effects of Sound Barriers on Flow and Dispersion. USA : AQMD, 2013, 95 p.
3. Biliaiev M.M., Berlov O.V., Biliaieva V.V., Kozachyna V.A. and Yakubovska Z. M. *Doslidzhennya efektyvnosti zahysnykh ekraniv riznoyi formy na znyzhennya zabrudnennya povitrya* [Research into the effectiveness of protective screens of various shapes in reducing air pollution]. *Ukrayins'kyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2023, no. 4 (016), pp. 27–33. DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.290823.27.967 (in Ukrainian).
4. Maruntalu O., Lazaroiu G. and Bondrea D. Variations in the atmospheric pollutant immission (2009–2015) field near a large lignite-fired power plant (in Europe/Poland) *U.P.B. Sci. Bull.*, 2015, Ser. D 77 (4), pp. 229–236.
5. Biliaiev M., Pshinko O., Rusakova T., Biliaieva V. and Sladkowski A. Computer Model for Simulation of Pollutant Dispersion Near the Road with Solid Barriers. *Transp. Probl.* 2021, no. 16 (2), pp. 73–86.
6. Zgurovskii M.Z., Skopetskii V.V., Khutuch V.K. and Biliaiev M.M. *Chislennoe modelirovanie rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushey srede* [Numerical simulation of the spread of pollution in the environment]. Kyiv : Naukova Dumka Publ., 1997, 368 p. (in Russian).
7. Biliaiev M., Berlov O., Biliaieva V., Kozachyna V.A., Kozachyna V.V. and Yakubovska Z. Modeling Influence of TiO₂ Barrier Coating on Pollutant Dispersion Near Road. *27th International Scientific Conference Transport Means-2023 : Proceedings of the International Conference*. P. 1, vol. 4–6, October, 2023, pp. 511–517. ISSN 1822296X.

Надійшла до редакції: 12.12.2024.