

УДК 504.5:629.33

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.260422.7.846

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ БІЛЯ АВТОШЛЯХУ ІЗ ЗАХИСНИМИ БАР'ЄРАМИ

БІЛЯЄВ М. М.¹, *докт. техн. наук, проф.*,
БЕРЛОВ О. В.^{2*}, *канд. техн. наук, доц.*,
БІЛЯЄВА В. В.³, *канд. техн. наук, доц.*,
КОЗАЧИНА В. А.⁴, *канд. техн. наук, доц.*,
РУСАКОВА Т. І.⁵, *докт. техн. наук, проф.*

¹ Кафедра гідравліки та водопостачання, Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 273-15-09, e-mail: water.supply.treatment@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1531-7882

^{2*} Кафедра безпеки життєдіяльності, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-16-01, e-mail: berlov.oleksandr@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-7442-0548

³ Кафедра аерогідромеханіки та енергомасопереносу, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Гагаріна, 72, 49000, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 374 98 22, e-mail: water.supply.treatment@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2399-3124

⁴ Кафедра гідравліки та водопостачання, Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 273-15-09, e-mail: water.supply.treatment@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-6894-5532

⁵ Кафедра безпеки життєдіяльності, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Гагаріна, 18, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (066) 394-52-14, e-mail: rusakovati1977@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5526-3578

Анотація. *Постановка проблеми.* Розглядається задача прогнозування зон хімічного забруднення біля автошляху, де розташовані захисні бар'єри. Захисні бар'єри впливають на аеродинаміку повітряного потоку біля автошляху та дозволяють зменшити рівень хімічного забруднення робочих зон, що розташовані біля автошляху. Для оперативного оцінювання ефективності використання захисних бар'єрів потрібно мати математичні моделі, що дозволяють здійснити таке оцінювання на етапі проведення проектних робіт. *Мета роботи* – розроблення чисельної багатопараметричної моделі та комп'ютерної програми для оцінювання ефективності використання захисних бар'єрів біля автошляху з метою зменшення рівня хімічного забруднення робочих зон. *Методика.* Для математичного моделювання процесу розповсюдження хімічно небезпечних речовин, що викидаються від авто та розповсюджуються біля автошляху, використовується двовимірне рівняння масопереносу. Це моделює рівняння враховує напрям вітру, атмосферну дифузію, інтенсивність викиду хімічно небезпечної речовини від авто, місце розташування джерела емісії, корпус авто та розташування захисних бар'єрів біля автошляху. Для рішення задачі аеродинаміки визначення нерівномірного поля швидкості повітряного потоку біля автошляху використовуються дві гідродинамічні моделі: рівняння Нав'є – Стокса та модель потенціального руху. Рівняння Нав'є – Стокса застосовуються у змінних «вихор – функція току». Для чисельного інтегрування рівняння переносу вихору використовується неявна різницева схема розщеплення. Для чисельного інтегрування рівняння для функції току використовуються дві різницеві схеми. Для чисельного інтегрування рівняння Лапласа для потенціалу швидкості – явна різницева схема. На базі побудованої чисельної моделі розроблено пакет програм. Для чисельного інтегрування рівняння переносу домішки використовуються різницеві схеми розщеплення. *Наукова новизна.* Запропоновано чисельну модель, що дозволяє розрахувати формування областей хімічного забруднення атмосферного повітря біля автошляху від викидів та оцінити ефективність використання захисних бар'єрів для зниження рівня забруднення повітря в робочих зонах. *Практична значимість.* На базі розробленої моделі створено код, що дозволяє оперативно розраховувати процес забруднення повітря як біля автошляху, так і в робочих зонах, для захисту яких споруджуються бар'єри. *Висновки.* Розроблена чисельна модель та комп'ютерний код, що реалізує її, дозволяють досліджувати процес розповсюдження хімічно небезпечної речовини в атмосферному повітрі біля автошляху. Модель дозволяє оперативно визначити ефективність використання захисних бар'єрів біля автошляху. Пропонована програма може бути реалізована на комп'ютерах малої та середньої потужності. Наведено результати обчислювального експерименту.

Ключові слова: забруднення атмосфери; захисний бар'єр; чисельне моделювання; викид від автотранспорту; робоча зона

NUMERICAL MODELING OF AIR POLLUTION NEAR THE HIGHWAY WITH PROTECTIVE BARRIERS

BILIAIEV M.M.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
BERLOV O.V.^{2*}, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
BILIAIEVA V.V.³, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
KOZACHYNA V.A.⁴, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
RUSAKOVA T.I.⁵, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*

¹ Department of Hydraulics and Water Supply, Dniprovskiy National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, 2, Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (056) 273-15-09, e-mail: water.supply.treatment@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1531-7882

^{2*} Department of Life Safety, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho St., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-57, e-mail: berlov.oleksandr@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-7442-0548

³ Department of Aerohydrodynamics and Energy Mass-transfer, Oles Honchar Dnipro National University, 72, Haharina Av., Dnipro, 49000, Ukraine, tel. +38 (056) 374 98 22, e-mail: water.supply.treatment@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2399-3124

⁴ Department of Hydraulics and Water Supply, Dniprovskiy National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, 2, Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (056) 273-15-09, e-mail: water.supply.treatment@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-6894-5532

⁵ Department of Life Safety, Oles Honchar Dnipro National University, 72, Haharina Av., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (066) 394-52-14, e-mail: rusakovati1977@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5526-3578

Abstract. Problem statement. The problem of predicting chemical pollution zones near the highway, where protective barriers are located, is considered. The protective barriers influence the aerodynamics of air flow and reduce the level of working areas chemical pollution near the highway. It is necessary to have mathematical models that allow such evaluation at the design stage in order to evaluate the effectiveness of protective barriers promptly. **The purpose of the article.** Development of a numerical multi-parameter model and computer program for evaluating the effectiveness of the protective barriers using near the highway to reduce the chemical contamination level of work areas. **Methodology.** A two-dimensional mass transfer equation is used for mathematical modeling of chemical hazardous substances spreading that are emitted from a car and spread near the highway. This simulation equation takes into account the wind direction, atmospheric diffusion, the intensity of chemically hazardous substance emission from the car, the emission source location, the car body and the location of protective barriers near the highway. The Navier – Stokes equation and the potential motion model both are used to solve the aerodynamics problem of determining the uneven air velocity field near the highway. An implicit splitting difference scheme is used to numerically integrate the vortex transfer equation. Two numerical schemes are used to numerically integrate the equation for the current function. An explicit difference scheme is used to numerically integrate the Laplace equation for the velocity potential. Based on the constructed numerical model the package of programs is developed. To solve numerically equation of pollutant transfer the finite difference schemes of splitting are used. **Scientific novelty.** To calculate the formation of chemical pollution areas for atmospheric air near the highway during emissions from vehicles numerical model is proposed. This model allow to estimate the protective barriers effectiveness for reducing air pollution in the working areas. **Practical significance.** Based on the developed model the code for quickly calculation of air pollution process both near the highway and in work areas protecting with barriers is created. **Conclusions.** The developed numerical model and the computer code implementing it allow to investigate the process of chemical hazardous substance spreading in the atmospheric air near the highway. The model allows to quickly determine the effectiveness of protective barriers using near the highway. The developed computer program can be implemented on low and medium power computers. The results of a computational experiment are presented.

Keywords: *atmospheric pollution; protective barrier; numerical simulation; emissions from vehicles; working place*

Постановка проблеми. Значна кількість робочих зон розташована біля автомагістралей. Різні хімічні речовини, що містяться у викидах від авто, створюють загрозу здоров'ю людей, які працюють у зоні впливу автомагістралі [1].

Ефективним засобом захисту робочих зон від хімічного забруднення в даному

випадку бачиться використання бар'єрів, що дозволяють змінити аеродинаміку повітряного потоку та локально зменшити концентрацію забруднювальних речовин у зоні інтересу [5–10].

З метою розроблення надійної системи захисту працівників потрібно визначити ефективність бар'єрів. Для розв'язання цієї

задачі використовують фізичні методи дослідження, але вони потребують значного часу на постановку та проведення експерименту. Практично важливіше мати ефективні математичні моделі для визначення захисної функції бар'єрів. Створення таких математичних моделей – надто важливе, адже дозволяє швидко розв'язувати складні багатопараметричні задачі. Використання математичних моделей дозволяє дослідити вплив різних фізичних параметрів на формування областей забруднення у разі використання захисних бар'єрів.

Мета статті – розроблення чисельної моделі для експрес-оцінювання ефективності застосування захисних бар'єрів біля автомагістралей.

Методика. Для дослідження ефективності захисних бар'єрів застосовується метод математичного моделювання. Для аналізу закономірностей формування зон забруднення біля захисного бар'єра – метод фізичного моделювання.

Аби теоретично оцінити ефективність бар'єрів, потрібно вирішити дві основні задачі – розрахувати поле швидкості потоку при обтіканні бар'єра корпусу авто та таке інше (задача аеродинаміки) та розрахувати процес розповсюдження домішки в повітрі. Моделюючи рівняння аеродинаміки (рівняння Нав'є – Стокса) такі [2]:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial u \omega}{\partial x} + \frac{\partial v \omega}{\partial y} = \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = -\omega, \quad (2)$$

де $\omega = \partial v / \partial x - \partial u / \partial y$ – вихор; $Re = V_0 L / \nu$ – число Рейнольдса; L – характерний розмір; V_0 – характерна швидкість; ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості; ψ – функція току; $u = \partial \psi / \partial y$, $v = -\partial \psi / \partial x$ – компоненти вектора швидкості повітряного потоку.

Для моделюючих рівнянь використовують такі граничні умови:

– тверді межі, а також верхня та нижня межа:

$$\psi|_{\Gamma} = const, \quad \frac{\partial \psi}{\partial n}|_{\Gamma} = 0;$$

– на межі втікання повітряного потоку задається значення $u = f(y)$ та умова:

$$\psi|_{\text{axid}} = \psi(y), \quad \omega = 0. \quad (3)$$

На межі виходу повітряного потоку задається «м'яка» умова.

Чисельна модель на базі рівнянь (1), (2) будується з використанням прямокутної різничевої сітки.

Розглянемо побудову чисельної моделі. Так, для розв'язання рівняння (1) здійснюється його розщеплення таким чином:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial u \omega}{\partial x} + \frac{\partial v \omega}{\partial y} = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right). \quad (5)$$

Для чисельного розв'язання рівняння переносу (4) двокрокова схема розщеплення [2]:

– на першому кроці різничеве рівняння має вигляд:

$$\frac{\omega_{i,j}^k - \omega_{i,j}^n}{\Delta t} + L_x^+ \omega^k + L_y^+ \omega^k = 0; \quad (6)$$

– на другому кроці розщеплення різничеве рівняння має вигляд:

$$\frac{\omega_{i,j}^{n+1} - \omega_{i,j}^k}{\Delta t} + L_x^- \omega^{n+1} + L_y^- \omega^{n+1} = 0. \quad (7)$$

У рівняннях (6), (7) використовуються такі залежності [2]:

$$\frac{\partial u \omega}{\partial x} = \frac{\partial u^+ \omega}{\partial x} + \frac{\partial u^- \omega}{\partial x},$$

$$\frac{\partial v \omega}{\partial y} = \frac{\partial v^+ \omega}{\partial y} + \frac{\partial v^- \omega}{\partial y},$$

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

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

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

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

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

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

Невідоме значення ω в кожному рівнянні (6), (7) визначається за формулою «рахунку, що біжить».

Для чисельного розв'язку рівняння (5) використовуються дві різницеві схеми. Перша – це схема розщеплення, що має вигляд [4]:

$$\begin{aligned} & \frac{\omega_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \omega_{i,j}^n}{\Delta t} = \\ & = \left[\frac{-\omega_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \omega_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\text{Re } \Delta x^2} \right] + \left[\frac{-\omega_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \omega_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\text{Re } \Delta y^2} \right], \\ & \frac{\omega_{i,j}^{n+1} - \omega_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \\ & = \left[\frac{\omega_{i+1,j}^{n+1} - \omega_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2 \text{ Re}} \right] + \left[\frac{\omega_{i,j+1}^{n+1} - \omega_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2 \text{ Re}} \right], \end{aligned} \quad (8)$$

Невідоме значення вихору розраховується на кожному кроці розщеплення за явною формулою.

Друга різницєва схема для розв'язання рівняння (5) – це явна схема, а саме [4]:

$$\begin{aligned} \omega_{ij}^{n+1} = & \omega_{ij}^n + \Delta t \frac{\omega_{i+1,j}^n - 2\omega_{ij}^n + \omega_{i-1,j}^n}{\Delta x^2 \text{ Re}} + \\ & + \Delta t \frac{\omega_{i,j+1}^n - 2\omega_{ij}^n + \omega_{i,j-1}^n}{\Delta y^2 \text{ Re}}. \end{aligned}$$

Значення вихору на кожному часовому кроці визначається на базі цієї залежності.

Для чисельного розв'язання рівняння (2) потрібна різницєва схема [4]:

$$\begin{aligned} & \frac{\Psi_{i+1,j,k} - 2\Psi_{i,j,k} + \Psi_{i-1,j,k}}{\Delta x^2} + \\ & - \frac{\Psi_{i,j+1,k} - 2\Psi_{i,j,k} + \Psi_{i,j-1,k}}{\Delta y^2} = -\omega_{ij}. \end{aligned} \quad (9)$$

Невідоме значення параметра ψ обчислюється з (9) за явною формулою.

Крім гідродинамічної моделі в'язкої рідини також розроблено модель для розрахунку поля швидкості повітряного потоку на базі моделі потенціального руху. Моделює рівняння в цьому випадку має вигляд [2]:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0,$$

де P – потенціал швидкості.

Для розв'язання цього рівняння застосовується така різницєва схема [4]:

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

За допомогою цієї явної залежності визначається поле потенціалу швидкості в усіх внутрішніх осередках розрахункової області.

За відомими значеннями потенціалу швидкості розраховуються компоненти вектора швидкості:

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

Для моделювання процесу поширення домішки від джерела забруднення (викид з авто) використовується таке рівняння масопереносу [2; 3]:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial uS}{\partial x} + \frac{\partial vS}{\partial y} = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \\ & + \sum_{i=1}^n Q_{Si}(t) \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \end{aligned} \quad (10)$$

де S – концентрація домішки $[NO]$; u, v – компоненти вектора швидкості; $\mu = (\mu_x, \mu_y)$ – коефіцієнти турбулентної дифузії; Q_{Si} – інтенсивність емісії $[NO]$ від авто; $\delta(x - x_i) \delta(y - y_i)$ – дельта-функція Дірака; (x_i, y_i) – координати розташування джерела емісії; t – час.

Для чисельного інтегрування рівняння (10) використовуються різницеві схеми [2; 5]. На базі розробленої чисельної моделі створено код «BARRIER-IT», мова програмування – FORTRAN. До складу коду входять:

- TNE.DAT – файл початкових даних;
- TN31 – підпрограма типу «SUBROUTINE» для розрахунку поля вихору в області дослідження;
- TNE32 – підпрограма типу «SUBROUTINE» для розрахунку функції току в області дослідження;
- TNE33 – підпрограма типу «SUBROUTINE» для розрахунку поля швидкості повітряного потоку в області дослідження;
- TTNE3 – підпрограма типу «SUBROUTINE» для розрахунку потенціалу швидкості на компонент вектора швидкості повітряного потоку на базі моделі потенціального руху;
- TRNE – підпрограма типу «SUBROUTINE» для розрахунку процесу переносу домішки в повітрі.

Результати. Далі наведено результати фізичного експерименту з дослідження закономірностей формування зон забруднення за використання вертикального бар'єра з додатковим елементом, що має ухил «по потоку» (рис. 1).

Модель автомобіля мала розміри: довжина $L = 21$ см, середня висота 10 см, ширина 8 см. Висота бар'єра 10 см, довжина додаткового елемента 4 см, кут нахилу 45° . Довжина від джерела емісії до бар'єра 12 см.

Для створення джерела емісії палили ароматизовані палички, що створюють дим, який можливо зафіксувати на фотокамеру. Ці палички розташовували в нижній частині моделі авто на висоті 3 см. Для вимірювання концентрації CO використовувався газоаналізатор GD-3301. Для створення потоку повітря знадобилася повітрорудка.

Швидкість повітряного потоку визначали за допомогою приладу GM 8908. Лабораторні експерименти проводили за температури повітря 21°C . За критерій подібності взяли число Рейнольдса, а для розрахунку числа Рейнольдса як масштаб використовували довжину автомобіля L , швидкість повітряного потоку V , коефіцієнт кінематичної в'язкості ν за температури 210°C ($\nu = 15.06 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}$). Значення числа Рейнольдса дорівнювало $Re = 10^4 - 10^5$.

На рисунку 1 показано зону забруднення, отриману під час експерименту.



Рис. 1. Зона забруднення:
1 – джерело викиду; 2 – зона забруднення перед бар'єром; 3 – зона забруднення над додатковим елементом

Аналізуючи рисунок 1, можна виявити закономірності формування зони забруднення повітря у разі використання бар'єра, що має ухил «по потоку». А саме, біля верхньої частини бар'єра формується область із досить високою концентрацією домішки, на що вказує «щільність» диму

(область 2, рис. 1). Ця область формується внаслідок того, що вертикальна частина бар'єра відіграє роль перешкоди на шляху поширення домішки. Додатковий елемент, що має ухил зверху, створює «трамплін» для додаткового вертикального руху домішки. У результаті, над цим елементом формується додаткова область забруднення.

Рух забрудненого повітря вгору сприяє зменшенню рівня забруднення повітря за бар'єром. Таким чином, завдяки зміні аеродинаміки потоку біля цього бар'єра зменшується рівень забруднення робочих зон за бар'єром.

На другому етапі досліджень проведено обчислювальний експеримент на базі розробленої чисельної моделі. На рисунках 2 та 3 показано область дослідження для двох розрахункових схем. Джерело викиду домішки – авто на дорозі, з обох боків якої розташовані захисні бар'єри. В першому варіанті обидва бар'єри вертикальні, в другому один з бар'єрів має додатковий елемент, як показано на рисунку 1.

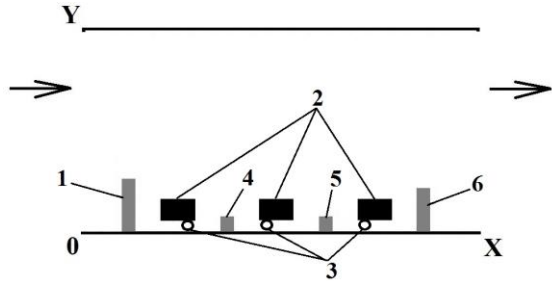


Рис. 2. Розрахункова схема № 1:
1 – вертикальний бар'єр; 2 – авто; 3 – місце викиду домішки; 4, 5 – відбійник між смугами автошляху; 6 – вертикальний бар'єр

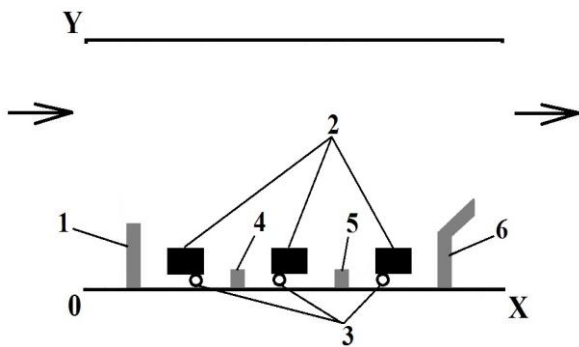


Рис. 3. Розрахункова схема № 2:
1 – вертикальний бар'єр; 2 – авто; 3 – місце викиду домішки; 4, 5 – відбійник між смугами автошляху; 6 – вертикальний бар'єр з додатковим елементом

На рисунках 4 та 5 показано область забруднення (концентрація NO) для кожної розрахункової схеми. Значення концентрації наведено в безрозмірному вигляді, кожне число на цих рисунках відповідає у відсотках концентрації від її максимального значення в розрахунковій області. Максимальному значенню концентрації відповідає число «99». Друк концентрації здійснено у форматі «INTEGER».

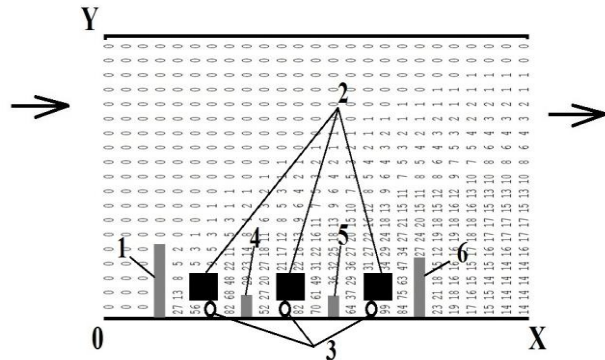


Рис. 4. Концентрація NO для розрахункової схеми № 1: 1 – вертикальний бар'єр; 2 – авто; 3 – місце викиду домішки; 4, 5 – відбійник між смугами автошляху; 6 – вертикальний бар'єр

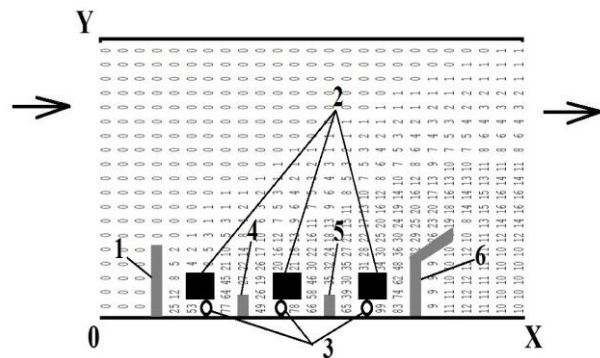


Рис. 5. Концентрація NO для розрахункової схеми № 2: 1 – вертикальний бар'єр; 2 – авто; 3 – місце викиду домішки; 4, 5 – відбійник між смугами автошляху; 6 – вертикальний бар'єр із додатковим елементом

Якщо проаналізувати значення концентрації для кожної розрахункової схеми (рис. 4 та 5) для зони, що розташована за другим бар'єром (позиція 6, рис. 4, 5), можна бачити, що для другої розрахункової схеми (вертикальний бар'єр із додатковим елементом) концентрація NO суттєво менше в цій зоні, ніж для першої (просто вертикальний бар'єр).

На рисунку 6 показано значення концентрації в цій зоні на висоті 1,7 м.

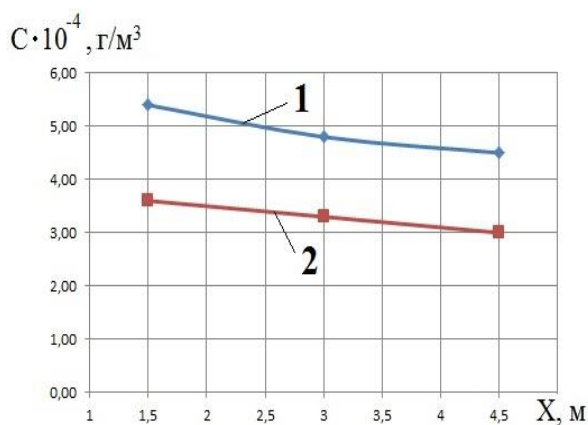


Рис. 6. Значення концентрації NO за другим бар'єром: 1 – розрахункова схема № 1; 2 – розрахункова схема № 2

Як можна бачити з рисунку 6, використання вертикального бар'єра з додатковим елементом більш ефективно, ніж використання тільки вертикального бар'єра без додаткового елемента.

Зазначимо, що час розрахунку складає 10 секунд.

Наукова новизна та практична цінність.

Наведено чисельну модель та комп'ютерну програму для оцінювання ефективності використання бар'єрів для зниження рівня хімічного забруднення робочих зон. Чисельна модель дає можливість оперативно визначати

закономірності формування зон хімічного забруднення повітря.

Розрахунок на базі розробленої моделі триває 10 с, що дає можливість здійснити серію прогнозних розрахунків протягом робочого дня та визначити раціональне розташування захисних бар'єрів із метою зменшення рівня хімічного забруднення робочих зон.

Висновки.

1. Запропановано ефективну чисельну модель, що дозволяє швидко розрахувати зону хімічного забруднення з урахуванням впливу захисних бар'єрів на поширення домішки в повітрі.

2. Результати обчислювального експерименту показують, що побудована чисельна модель дає можливість оперативно отримати інформацію, потрібну для визначення ефективності використання захисних бар'єрів із метою зменшення рівня хімічного забруднення повітря.

3. Наведено результати фізичного експерименту, що дозволяють визначити закономірності формування зони забруднення біля вертикального захисного бар'єра, що має додатковий елемент «по потоку».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Черниченко І. О., Першегуба Я. В., Литвиненко О. М., Швагер О. В. Особливості формування канцерогенного ризику для населення, що проживає в зоні впливу автомагістралі. *Збірник наукових праць*. 2010. Вип. 56. С. 159–167.
2. 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.
3. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. Москва : Наука, 1982. 320 с.
4. Самарский А. А. Теория разностных схем. Теория разностных схем. Москва : Наука, 1983. 616 с.
5. Biliaiev M., Pshinko O., Rusakova T., Biliaieva V., Sladkowski A. Computer Model for Simulation of Pollutant Dispersion Near the Road with Solid Barriers. *Transport Problems*. Vol. 16 (2), part 1. 2021. Pp. 73–86. URL: <https://doi.org/10.21307/tp-2021-024>.
6. Brolin N. *Development of Curved Noise and NOx Barrier*. Digitala Vetenskapliga Arkivet. 2010. URL: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:444437/FULLTEXT01.pdf>
7. Brantley, Halley L., Hagler, Gayle S.W., Deshmukh, Parikshit J., Baldauf, Richard W. Field Assessment of the effects of Roadside Vegetation on Near Road Black Carbon and Particulate Matter. *Science of The Total Environment*. 2014. Pp. 468–469. URL: <https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=&httpsredir=1&article=1240&context=usepapers>
8. Hagler G.S.W. Model evaluation of roadside barrier impact on near-road air pollution. *Atmospheric Environment*. 2011. Vol. 45 (15). Pp. 2522–2530. URL: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.02.030>. https://www.academia.edu/20952642/Model_evaluation_of_roadside_barrier_impact_on_near_road_air_pollution
9. Heist D. et al. Estimating near-road pollutant dispersion: A model inter-comparison. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2013. Vol. 25. Pp. 93–105. URL: https://cfpub.epa.gov/si/si_public_file_download.cfm?p_download_id=516154&Lab=NERL

10. Jeong S. J. Effect of Double Noise-Barrier on Air Pollution Dispersion around Road, Using CFD. *Asian Journal of Atmospheric Environment*. 2013. Vol. 8 (2). Pp. 81–88. URL: <http://koreascience.or.kr/article/JAKO201420947475958.pdf>

11. Jeong S. J. A CFD Study of Roadside Barrier Impact on the Dispersion of Road Air Pollution. *Asian Journal of Atmospheric Environment*. 2015. Vol. 9 (1). Pp. 22–30. URL: <http://asianjae.org/xml/19504/19504.pdf>

REFERENCES

1. Chernychenko I.O., Pershehuba Ya.V., Lytvynenko O.M. and Shvaher O.V. *Osoblyvosti formuvannia kantserohennoho ryzyku dlia naselennia, shcho prozhyvaie v zoni vplyvu avtomahistrali* [Features of carcinogenic risk formation for the population living in the zone of influence of the highway]. *Zbirnyk naukovykh prats'* [Collection of Scientific Works]. 2010, vol. 56, pp. 159–167. (in Ukraine).

2. Zgurovskiy M.Z., Skopetskiy V.V., Khrushch V.K and Belyaev N.N. *Chislennoye modelirovaniye rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede* [Numerical modeling of pollution spreading in the environment]. Kyiv : Naukova Dumka Publ., 1997, 368 p. (in Russian).

3. Marchuk G.I. *Matematicheskoye modelirovaniye v probleme okruzhayushchey sredy*. Moscow : Nauka Publ., 1982, 320 p. (in Russian).

4. Samarskiy A.A. *Teoriya raznostnykh skhem* [The theory of difference schemes]. Moscow : Nauka Publ., 1983, 616 p. (in Russian).

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. *Transport Problems*. Vol. 16 (2), part 1, 2021, pp. 73–86. URL: <https://doi.org/10.21307/tp-2021-024>. http://transportproblems.polsl.pl/pl/Archiwum/2021/zeszyt2/2021t16z2_06.pdf

6. Brolin N. Development of Curved Noise and NO_x Barrier. *Digitala Vetenskapliga Arkivet*, 2010. URL: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:444437/FULLTEXT01.pdf>

7. Brantley Halley L., Hagler Gayle S.W., Deshmukh Parikshit J. and Baldauf Richard W. Field Assessment of the effects of Roadside Vegetation on Near Road Black Carbon and Particulate Matter. *Science of The Total Environment*. 2014, pp. 120–129. URL: <https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=&httpsredir=1&article=1240&context=usepapapers>

8. Hagler G.S.W. Model evaluation of roadside barrier impact on near-road air pollution. *Atmospheric Environment*. 2011, vol. 45 (15), pp. 2522–2530. URL: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.02.030>.

9. Heist D. et al. Estimating near-road pollutant dispersion: A model inter-comparison. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2013, vol. 25, pp. 93–105. URL: https://cfpub.epa.gov/si/si_public_file_download.cfm?p_download_id=516154&Lab=NERL

10. Jeong S. J. Effect of Double Noise-Barrier on Air Pollution Dispersion around Road, Using CFD. *Asian Journal of Atmospheric Environment*. 2013, vol. 8 (2), pp. 81–88. URL: <http://koreascience.or.kr/article/JAKO201420947475958.pdf>

11. Jeong S. J. A CFD Study of Roadside Barrier Impact on the Dispersion of Road Air Pollution. *Asian Journal of Atmospheric Environment*. 2015, vol. 9 (1), pp. 22–30. URL: <http://asianjae.org/xml/19504/19504.pdf>.

Надійшла до редакції: 03.04.2022.