

УДК 519.6:502.3:504.3

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.290823.27.967

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЗАХИСНИХ ЕКРАНІВ РІЗНОЇ ФОРМИ ДЛЯ ЗНИЖЕННЯ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ

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

¹Кафедра гідравліки, водопостачання та фізики, Український державний університет науки і технологій, 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 безпеки життєдіяльності, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 247-16-01, e-mail: berlov.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-7442-0548

³Кафедра 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

⁴Кафедра гідравліки, водопостачання та фізики, Український державний університет науки і технологій, 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

⁵Кафедра енергетики, Український державний хіміко-технологічний університет, пр. Гагаріна, 8, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 753-56-38, e-mail: zinaidava25@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9893-3479

Анотація. Постановка проблеми. Розглядається задача оцінювання ефективності використання захисних екранів різної геометричної форми для зниження рівня забруднення повітря. Такі екрани дозволяють змінити аеродинаміку повітряного потоку та перенаправити рух забрудненого повітря від робочих зон в інший бік. **Мета роботи** – дослідження ефективності використання захисних екранів різної геометричної форми для зниження рівня забруднення, створення тривимірної числової моделі для аналізу ефективності використання захисних екранів. **Методика.** Для аналізу ефективності екранів різної геометричної форми застосовується метод фізичного експерименту в лабораторних умовах. Для математичного моделювання поширення домішки за наявності екранів використовуються тривимірні рівняння аеродинаміки та масопереносу. Розроблена числова модель дозволяє врахувати профіль швидкості повітряного потоку, атмосферну дифузію, інтенсивність емісії домішки, швидкість гравітаційного осадження домішки в повітрі. Для числового інтегрування моделювальних рівнянь аеродинаміки та масопереносу використовуються скінченнорізницеві схеми розщеплення. **Наукова новизна.** Експериментальним шляхом отримано дані щодо ефективності використання чотирьох захисних екранів, які відрізняються геометричною формою. Експериментальні дані дають можливість здійснити первинне оцінювання впливу різних екранів на зниження рівня забруднення в робочих зонах. Розроблена швидкозрахункова 3D числова модель для розв'язання задач аеродинаміки та масопереносу стосовно проблеми оцінювання ефективності використання екранів у зонах, де має місце забруднення атмосферного повітря. **Практична значимість.** Експериментальні дані дають можливість обґрунтувати вибір захисного екрана біля автотраси або іншої ділянки на промисловому майданчику, де має місце емісія домішки. На базі розробленої математичної моделі створено комп'ютерний код, що дозволяє прогнозувати інтенсивність забруднення повітря за наявності перешкод, які змінюють аеродинаміку та напрям переносу домішки в атмосфері. **Висновки.** Результати фізичного експерименту дозволяють уявити закономірності формування областей забруднення біля захисних екранів різної геометричної форми. Розроблена математична модель дозволяє оцінювати забруднення повітря в областях, де є перешкоди на шляху руху домішки. Наведено результати фізичного та обчислювального експериментів.

Ключові слова: забруднення повітря; захисний екран; числове моделювання; робоча зона

STUDY OF THE EFFECTIVENESS OF PROTECTIVE SCREENS OF DIFFERENT FORMS ON AIR POLLUTION REDUCTION

BILIAIEV M.M.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
BERLOV O.V.^{2*}, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
BILIAIEVA V.V.³, *Dr. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,

KOZACHYNA V.A.⁴, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
YAKUBOVSKA Z.M.⁵, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

¹Department of Hydraulics, Water Supply and Physics, Ukrainian State University of Science and Technologies, 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 Life Safety, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24A, St. Architect Oleh Petrov, Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-57, e-mail: berlov.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-7442-0548

³Department 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

⁴Department of Hydraulics, Water Supply and Physics, Ukrainian State University of Science and Technologies, 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

⁵Department of Power Engineering, Ukrainian State University of Chemical Technology, 8, Haharina Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 753-56-38, e-mail: zinaidava25@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9893-3479

Abstract. Problem statement. The task of evaluating the effectiveness of the use of protective screens of different geometric shapes to reduce the level of air pollution is considered. The data on the screen allow you to change the aerodynamics of the air flow and redirect the movement of polluted air away from the work areas in the other direction. **The purpose of the article** – study of the effectiveness of the use of protective screens of different geometric shapes to reduce the level of pollution, creation of a three-dimensional numerical model for the analysis of the effectiveness of the use of protective screens. **Methodology.** The method of physical experiment in laboratory conditions is used to analyze the effectiveness of screens of different geometric shapes. Three-dimensional equations of aerodynamics and mass transfer are used for mathematical modeling of impurity propagation in the presence of screens. The developed numerical model makes it possible to take into account the air flow velocity profile, atmospheric diffusion, the emission intensity of the impurity, the rate of gravitational sedimentation of the impurity in the air. For the numerical integration of the modeling equations of aerodynamics and mass transfer, finite-difference splitting schemes are used. **Scientific novelty.** Data on the effectiveness of the use of four protective screens, which differ in geometric shape, were obtained experimentally. Experimental data make it possible to carry out an initial assessment of the impact of various screens on reducing the level of pollution in working areas. A fast-calculating 3D numerical model was developed for solving problems of aerodynamics and mass transfer in relation to the problem of evaluating the effectiveness of the use of screens located in areas where atmospheric air pollution occurs. **Practical significance.** Experimental data make it possible to justify the choice of a protective screen near the highway or another area on the industrial site where the impurity emission takes place. A computer code was created on the basis of the developed mathematical model, which makes it possible to predict the intensity of air pollution in the presence of obstacles that change the aerodynamics and the direction of transport of impurities in the atmosphere. **Conclusions.** The results of the physical experiment allow us to imagine the regularities of the formation of areas of pollution near protective screens of different geometric shapes, the developed mathematical model allows us to estimate air pollution in areas where there are obstacles in the way of the movement of impurities. The results of physical and computational experiments are presented.

Keywords: *air pollution; protective screen; numerical modeling; work area*

Постановка проблеми. Захисні екрани дуже широко використовуються для захисту повітря від забруднення в робочих зонах у різних галузях промисловості та транспорту [1; 4]. Особливо корисні вони для зниження рівня хімічного забруднення повітря в робочих зонах, розташованих біля автотрас [5–9]. Для ефективного використання захисних екранів потрібно мати спеціалізовані математичні моделі, що дозволяють визначати концентрацію домішки в повітрі із застосуванням захисних екранів [1; 6; 7; 9]. Тому необхідне створення таких спеціалізованих, особливо важливо – багатофакторних математичних моделей.

Але слід зазначити, що в цій галузі суттєву роль відіграє експеримент [9], адже він дає можливість визначити закономірності формування областей забруднення у разі використання захисних екранів. Особливо важлива роль експерименту, якщо досліджується ефективність використання екранів не традиційної форми, а тих, що мають складну геометрію.

У цій статті розглядаються результати експериментального дослідження ефективності використання захисних екранів, що мають складну геометричну форму, та виконано порівняльний аналіз їх ефективності.

Мета статті – висвітлення ефективності захисних екранів різної геометричної форми для зниження рівня забруднення біля автотраси; створення тривимірної числової моделі для аналізу ефективності використання таких екранів.

Методика. У дослідженні застосовується метод фізичного експерименту. Модель авто мала розміри: довжина 46 см, ширина 8 см, середня висота 11 см; висота джерела емісії CO 3 см; довжина від моделі до екрану 15 см; висота бар'єра 10 см. Температура повітря 22 °C. Середня концентрація CO біля джерела викиду 130 ppm. Швидкість потоку повітря $V = 138 \text{ см/с} - 157 \text{ см/с}$.

За критерій подібності взято число Рейнольдса. Це число розраховувалося так:

$$Re = \frac{V \cdot L}{\nu},$$

де L – довжина моделі авто; $V = 1,7 \text{ м/с}$ – швидкість повітряного потоку; ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості ν за температури 22 °C.

За допомогою повітродувки створювали потік повітря на модель авто та екран. Далі здійснювали фотозйомку процесу формування зони забруднення та вимірювали концентрацію CO. Оскільки концентрацію вимірювали в турбулентному потоці, прилади показували певний діапазон зміни параметра, що вимірювався. Записавши в журналі ці показники, розраховували середнє значення параметра.

Концентрацію CO вимірювали протягом 1 хв., на висоті 13 см та довжині 4 см, 8 см, 12 см від захисного бар'єра. На першому етапі визначили концентрацію CO за відсутності захисних екранів, а далі – для кожного сценарію.

На рисунках 1–4 показано зону забруднення повітря з використанням захисних екранів різної форми.

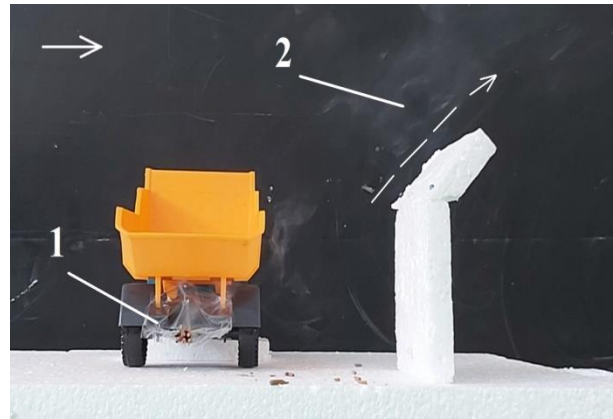


Рис. 1. Зона забруднення (екран з ухилом «по потоку»): 1 – джерело емісії CO; 2 – зона забруднення над екраном (сценарій № 1)



Рис. 2. Зона забруднення (екран з ухилом «проти потоку»): 1 – джерело емісії CO; 2 – зона забруднення біля екрана (сценарій № 2)

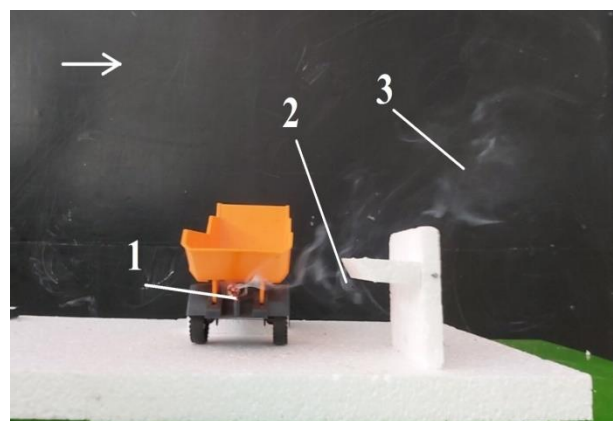


Рис. 3. Зона забруднення, екран із додатковим елементом типу «шафа» (сценарій № 3): 1 – джерело емісії CO; 2 – зона забруднення біля екрана; 3 – зона забруднення над екраном

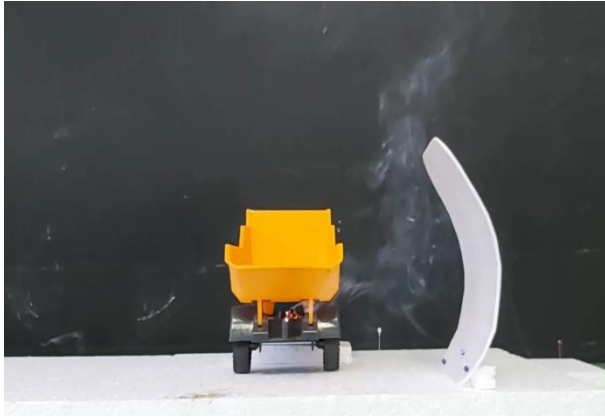


Рис. 4. Зона забруднення біля криволінійного екрана (сценарій № 4)

Як можна бачити з наведених рисунків, кожен екран формує зону «гальмування» на навітряній стороні. Далі має місце зміна напрямку зони забруднення – вона починає рухатися вгору. Таким чином, захисна дія екрана базується на зміні аеродинаміки потоку та напрямку переносу забруднювача.

На рисунку 5 показана графічну залежність зміни концентрації CO для усіх сценаріїв. Зазначимо, що точки $X = 0$ відповідає точка над захисним екраном.

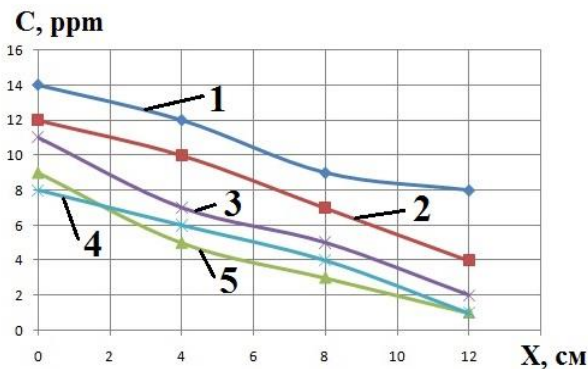


Рис. 5. Зміна концентрації CO за захисними екранами: 1 – немає захисного бар'єра; 2 – сценарій № 1; 3 – сценарій № 3; 4 – сценарій № 4; 5 – сценарій № 2

Як можна бачити з рисунку 5, найбільш ефективно використання екранів, що відповідають сценаріям 2 та 4.

Математична модель. На другому етапі досліджень побудовано числову модель для аналізу ефективності роботи захисних екранів або інших перешкод, що використовуються для зменшення рівня забруднення повітря.

Для розрахунку поля швидкості повітряного потоку беремо рівняння для потенціалу швидкості [1; 2]:

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

де P – потенціал швидкості, на базі якого розраховується поле швидкості повітряного потоку так:

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

Граничні умови для рівняння (1) розглянуті в [1].

Для числового інтегрування рівняння (1) використовується двокрокова схема розщеплення [3]:

- перший крок:

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

- другий крок:

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

Значення потенціалу швидкості обчислюється за явною формулою. На кожному кроці розщеплення потенціал швидкості знаходять за явною формулою [3]. Компоненти вектора швидкості повітря розраховуються так:

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

$$w_{i,j,k} = \frac{P_{i,j,k} - P_{i,j,k-1}}{\Delta z}.$$

Компоненти вектора швидкості повітряного потоку використовуються для розрахунку концентрації домішки в області

дослідження. Для цього знадобиться таке рівняння масопереносу [1; 2; 4]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial (w-w_s)C}{\partial z} + \sigma C = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + \sum_{i=1}^n Q_i(t) \delta(x-x_i) \delta(y-y_i) \delta(z-z_i), \quad (2)$$

де C – концентрація забруднювача; $Q_i(t)$ – інтенсивність емісії забруднювача; u, v, w – проекції вектора швидкості повітряного потоку на осі декартової системи координат; t – час; w_s – швидкість осідання забруднювача; σ – параметр, що враховує вимивання забруднювача; $\mu = (\mu_x, \mu_y, \mu_z)$ – коефіцієнти турбулентної дифузії; x_i, y_i, z_i – координати джерела емісії; $\delta(x-x_i), \delta(y-y_i), \delta(z-z_i)$ – дельта-функція Дірака.

Граничні умови для моделювального рівняння (2) розглянуті в [1; 2].

На вході в розрахункову область задається профіль швидкості повітряного потоку:

$$u = u_1 \left(\frac{\lg \frac{z}{z_0}}{\lg \frac{z_1}{z_0}} \right),$$

де u_1 – швидкість вітру на висоті z_1 , z_0 – шорсткість.

Коефіцієнти дифузії розраховуються за емпіричними залежностями [1].

Для побудови різницевої схеми з метою числового розв’язання рівняння (2) здійснюється наступне його розщеплення:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial wC}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \sum_{i=1}^N Q_i \delta(x-x_i) \delta(y-y_i) \delta(z-z_i). \quad (5)$$

Для числового інтегрування рівнянь (3) та (4) використовуються різницеві схеми [1; 3; 4]. Для числового інтегрування рівняння (5) застосовано метод Ейлера [3].

На базі розробленої числової моделі створено код «BRICK», мова програмування – FORTRAN.

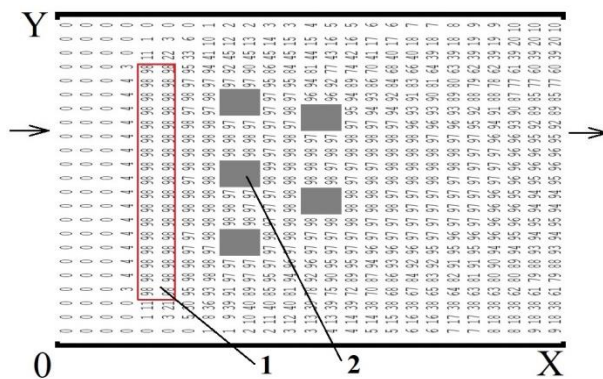


Рис. 6. Розподіл безрозмірної концентрації пилу (перший сценарій): 1 – зона емісії пилу; 2 – захисні блоки

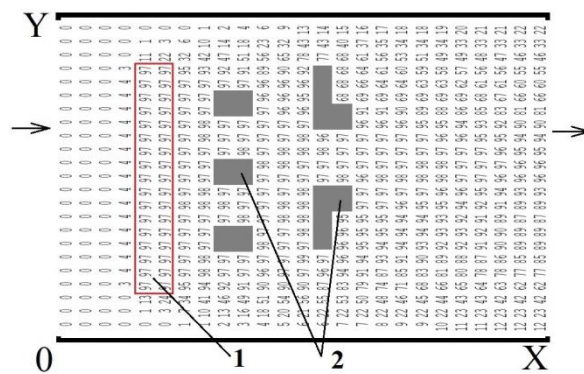


Рис. 7. Розподіл безрозмірної концентрації пилу (другий сценарій): 1 – зона емісії пилу; 2 – захисні блоки

На рисунках 6, 7 показано розподіл концентрації пилу в області, де розташовано декілька перешкод у вигляді блоків, що мають розміри $30 \times 25 \times 30$ см, та біля зони пилоутворення. Розрахунок здійснено за такими даними: $u_1 = 4$ м/с; швидкість осадження пилу $0,002$ м/с, $z_0 = 0,02$. Концентрація пилу на рисунках наведена для рівня $z = 25$ см.

Концентрація пилу наведена в безрозмірному вигляді – кожне число на рисунку показує концентрацію пилу у відсотках від максимальної концентрації в розрахунковій області. Розрахунок здійснено для двох сценаріїв, що

відрізняються різним розташуванням захисних блоків. Метою моделювання була перевірка можливості розробленої числової моделі здійснювати розрахунок концентраційних полів в умовах складної геометрії області дослідження.

Як видно з рисунків 6, 7, наявність блоків впливає на формування складної області забруднення. Також можна бачити, що розташування блоків як у першому, так і в другому сценарії не «вдале», тому що за блоками залишається область забруднення з високим значенням концентрації домішки.

Таким чином, для більш ефективного розташування захисних блоків потрібно розглянути декілька сценаріїв їх положення біля зони емісії домішки та визначити ефективність шляхом розрахунку на базі розробленої числової моделі.

Зазначимо, що час розрахунку складає 7 секунд.

Наукова новизна та практична цінність дослідження. Здійснено комплекс

фізичних експериментів, що дозволили виявити закономірності формування областей забруднення біля захисних екранів, які мають складну геометричну форму.

Запропоновано математичну модель, що дозволяє прогнозувати формування областей концентраційних полів домішки в умовах складної геометрії розрахункової області. Результати математичного моделювання презентуються у вигляді, зручному для швидкого аналізу.

Висновки

1. Проведено фізичні експерименти, що дозволили оцінити ефективність використання захисних екранів різної геометричної форми.

2. Розроблено числову модель, яка дозволяє визначати концентраційні поля домішки з використанням захисних перешкод. Модель враховує найбільш суттєві фізичні фактори, що впливають на формування зон забруднення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Біляев М. М., Біляева В. В., Берлов О. В., Козачина В. А. CFD-моделювання в аналізі ефективності систем захисту докільця та працівників на робочих місцях : монографія. Дніпро : Журфонд, 2022. 268 с.
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. Самарский А. А. Теория разностных схем. Москва : Наука, 1983. 616 с.
4. 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>.
5. 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>
6. 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>.
7. 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>
8. Nico Schulte, Akula Venkatram. Effects of Sound Barriers on Dispersion from Roadways. DRAFT. Final Report. June 17, 2013. 100 p.
9. Wonsik C., Shishan Hu, Meilu He, Kozawa K. Spatial Heterogeneity of Roadway Pollutant in Los Angeles. URL: http://www.aqmd.gov/docs/default-source/technologyresearch/TechnologyForums/near-road-mitigationmeasures/near_road_mitigation-agenda-presentations.pdf

REFERENCES

1. Biliaiev M.M., Biliaieva V.V., Berlov O.V. and Kozachyna V.A. *CFD-modelyuvannya v analizi efektyvnosti system zaxystu dovkillya ta pracivnykiv na robochyx miscyax : monografiya* [CFD modeling in the analysis of the effectiveness of environmental protection systems and workers at workplaces : monograph]. Dnipro : Zhurfond Publ., 2022, 268 p. (in Ukrainian)
2. Zgurovskii M.Z., Skopetskii V.V., Khrutch 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)

3. Samarskiy A.A. *Teoriya raznostnykh skhem* [The theory of difference schemes]. Moscow: Nauka Publ., 1983, 616 p. (in Russian)
4. 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*. No. 16 (2), part 1, 2021, pp. 73–86. URL: <https://doi.org/10.21307/tp-2021-024>.
5. Brodin N. Development of Curved Noise and NO_x Barrier. Master of Science Thesis, KTH Industrial Engineering and Management, Stockholm, Sweden, 2010. Digitala Vetenskapliga Arkivet. URL: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:444437/FULLTEXT01.pdf>
6. Hagler G.S.W. Model evaluation of roadside barrier impact on near-road air pollution. *Atmospheric Environment*. No. 45 (15), 2011, pp. 2522–2530. URL: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.02.030>.
7. Jeong S. J. Effect of Double Noise-Barrier on Air Pollution Dispersion around Road, Using CFD. *Asian Journal of Atmospheric Environment*, no. 8 (2), 2013, pp. 81–88. URL: <http://koreascience.or.kr/article/JAKO201420947475958.pdf>
8. Nico Schulte, Akula Venkatram. Effects of Sound Barriers on Dispersion from Roadways. DRAFT. Final Report. 2013, June 17.
9. Wonsik C., Shishan Hu, Meilu He and Kozawa K. Spatial Heterogeneity of Roadway Pollutant in Los Angeles. URL: http://www.aqmd.gov/docs/default-source/technologyresearch/TechnologyForums/near-road-mitigationmeasures/near_road_mitigation-agenda-presentations.pdf

Надійшла до редакції: 12.06.2023.