

УДК 519.6:502.3:504.3

DOI: 10.30838/UJCEA.0333.270526.39.1241

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ТА ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ АЕРОДИНАМІКИ ТА МАСОПЕРЕНОСУ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ЗАХИСНОГО ЕКРАНУ СКЛАДНОЇ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ФОРМИ

БІЛЯЄВ М. М.^{1*}, докт. техн. наук, проф.,

ГІЛЬОВ В. В.², канд. техн. наук, доц.,

КІРІЧЕНКО П. С., канд. техн. наук, доц.

КОЗАЧИНА В. А.^{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, <https://orcid.org/0000-0002-1531-7882>

² Кафедра охорони праці, цивільної та екологічної 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) 756-33-71, e-mail: hilyov.v@pdaba.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-3014-5820>

³ Кафедра теплогазоводопостачання, водовідведення і вентиляції, Криворізький національний університет, вул. Віталія Матусевича, 11, 50027, Кривий Ріг, Україна, тел. +38 (056) 409-06-06, e-mail: pasha_129@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-0793-9593>

^{4*} Кафедра матеріалознавства, механіки та природничих наук, ТОВ «Технічний університет «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»», Південне шосе, 80, 69008, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (056) 373-15-09, e-mail: v.kozachyna@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6894-5532>

⁵ Кафедра охорони праці, цивільної та екологічної 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) 756-33-71, e-mail: mitomdnipro1997@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3114-9820>

Анотація. *Постановка проблеми.* Для захисту повітря від пилового та хімічного забруднення на промислових майданчиках широко використовуються захисні екрани. Ці екрани створюють перешкоди на шляху руху вітрового потоку, що сприяє зменшенню рівня забруднення повітря в робочих зонах. Ефективне використання захисних екранів потребує знання про закономірності аеродинаміки потоків за ним. **Мета роботи.** Експериментальне та теоретичне дослідження аеродинаміки потоків на промисловому майданчику при використанні захисного екрану складної геометричної форми. **Методика.** Дослідження проводилися в два етапи. На першому етапі проведений експеримент де визначалися закономірності руху повітряних потоків за екраном, що має складну геометричну форму. На другому етапі розроблена CFD модель для визначення інтенсивності пилового забруднення на промисловому майданчику. Розроблена CFD модель дає можливість швидко визначати концентраційне поле пилу в повітрі при використанні захисного екрану на промисловому майданчику. **Наукова новизна.** Проведені експериментальні дослідження по визначенню закономірностей аеродинаміки при використанні захисного екрану складної форми на промисловому майданчику. Розроблена CFD модель прогнозування пилового забруднення повітря на промисловому майданчику при використанні захисного екрану складної форми. **Практична значущість.** Отримані емпіричні моделі для оцінювання швидкості повітряного потоку за захисним екраном складної форми, що можуть бути використані для оцінювання ефективності його використання. Розроблена CFD модель може бути використана на етапі проектування «фор ескіз» для обґрунтування параметрів захисного екрану. **Висновки.** Проведені експерименти, що визначили закономірності аеродинаміки потоків на промисловому майданчику при застосуванні захисного складної форми. Отримані емпіричні моделі, що дають можливість визначати швидкість повітряного потоку за захисним екраном. Розроблена CFD модель, що дає можливість прогнозувати ефективність використання захисного екрану складної форми. Представлені результати фізичного та обчислювального експериментів.

Ключові слова: захист повітря від забруднення; захисний екран; математичне моделювання; робоча зона; гідродинаміка потоків

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDY OF AERODYNAMICS AND MASS TRANSFER USING A PROTECTIVE SCREEN OF COMPLEX GEOMETRIC SHAPE

BILIAIEV M.M.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
HILOV V.V.², *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
KIRICHENKO P.S.³, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
KOZACHYNA V.A.^{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, <https://orcid.org/0000-0002-1531-7882>

² Department of Labor Protection, Civil and Environmental 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) 756-33-71, e-mail: hilyov.v@pdaba.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-3014-5820>

³ Department of Heat and Gas Supply, Drainage and Ventilation, Kryvyi Rih National University, 11, Vitaly Matusевич St., Kryvyi Rih, 50027, Ukraine, tel. +38 (056) 409-06-06, e-mail: pasha_129@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-0793-9593>

^{4*} Department of Materials Science, Mechanics and Natural Sciences, LLC “Technical University “METINVEST POLYTECHNIC””, 80, Southern Highway, Zaporizhzhia, 69008, Ukraine, tel. +38 (056) 373-15-09, e-mail: v.kozachyna@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6894-5532>

⁵ Department of Labor Protection, Civil and Environmental 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) 756-33-71, e-mail: mitomdnipro1997@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3114-9820>

Abstract. Problem statement. Protective screens are widely used to protect the air from dust and chemical pollution at industrial sites. These screens create obstacles in the path of wind flow, which helps reduce the level of air pollution in work areas. Effective use of protective screens requires knowledge of the aerodynamics of the flows behind them. **The purpose of the article.** Experimental and theoretical study of the aerodynamics of flows at an industrial site when using a protective screen of complex geometric shape. **Methodology.** The research was conducted in two stages. At the first stage, an experiment was conducted to determine the patterns of air flow behind a screen with a complex geometric shape. At the second stage, a CFD model was developed to determine the intensity of dust pollution at an industrial site. The developed CFD model makes it possible to quickly determine the concentration field of dust in the air when using a protective screen at an industrial site. **Scientific novelty.** Experimental studies have been conducted to determine the aerodynamic patterns when using a protective screen of complex shape at an industrial site. A CFD model for predicting dust air pollution at an industrial site when using a protective screen of complex shape has been developed. **Practical significance.** Empirical models for estimating the air flow velocity behind a complex-shaped protective screen have been obtained, which can be used to assess the effectiveness of its use. The developed CFD model can be used at the design stage of the “fore sketch” to justify the parameters of the protective screen. **Conclusions.** Experiments were conducted to determine the aerodynamic patterns of flows at an industrial site when using a protective screen of complex shape. Empirical models were obtained that make it possible to determine the speed of the air flow behind the protective screen. A CFD model was developed that makes it possible to predict the effectiveness of using a protective screen of complex shape. The results of physical and computational experiments are presented.

Keywords: *air protection from pollution; protective screen; mathematical modeling; working area; hydrodynamics of flows*

Постановка проблеми. Інтенсивне пилове забруднення повітря в робочих зонах має місце в різних галузях промисловості. В світі значна увага приділяється використанню захисних екранів на промислових майданчиках [1; 4] (рис. 1). Захисні екрани мають суттєві переваги: дозволяють здійснити ефективний захист повітря від пилового та хімічного забруднення; ці захисні споруди прості, економічні, установка екранів може бути здійснена дуже швидко. Важливим аспектом є те, що в якості матеріалу для виготовлення захисних екранів можна використовувати відходи промисловості.

Але для практичного використання екранів, для конкретних умов експлуатації, потрібно, заздалегідь, визначити їх ефективність. Для рішення цієї важливої задачі використовують експериментальні так і теоретичні методи дослідження [1; 5–7; 9]. В останній час значна увага приділяється використанню захисних екранів складної геометричної форми. Тому наукові дослідження в напрямку визначення закономірностей впливу таких екранів на аеродинаміку потоків на промислових майданчиках є актуальною проблемою.



Рис. 1. Захисний екран на промисловому майданчику

<https://www.windbreakpanels.com/product/windbreak-wall.html>

Мета статті – експериментальне та теоретичне дослідження аеродинаміки потоків та масопереносу на промисловому майданчику при використанні захисного екрану складної геометричної форми.

Методика. На першому етапі дослідження здійснювався аналіз впливу захисного екрану на аеродинаміку потоку, коли вертикальний екран має додатковий елемент типу «шафа», який розташований «проти потоку» (рис. 2). Дослідження проводилося експериментальним шляхом.

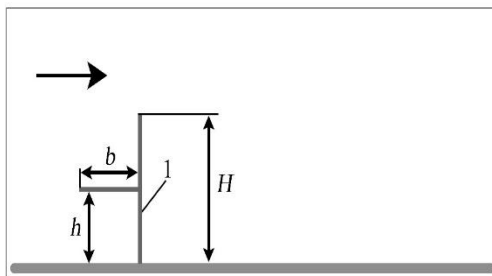


Рис. 2. Схема фізичної моделі захисного екрану:
1 – екран ($H = 10$ см, $h = 5$ см, $b = 5$ см)

Ширина моделі захисного екрану 10 см, довжина додаткового елемента «шафа» 5 см, висота розташування цього елемента 5 см (рис. 3). Вимірювання швидкості повітряного потоку здійснювалось за допомогою анемометра НТ-9830.

Як характерний розмір прийнято висота екрану $H = 10$ см. Моделювання здійснювалось за критерієм Рейнольдса:

$$Re = \frac{V_0 H}{\nu}$$

де V_0 – швидкість повітряного потоку перед бар'єром (визначалась шляхом вимірювання на висоті $0,5H$ та відстані H перед екраном); H – характерний розмір; ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості ($\nu = 15,06 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$).

Експеримент проводився для різної швидкості повітряного потоку в два етапи:

- Етап 1: визначення швидкості повітряного потоку безпосередньо за захисним екраном (на висоті $0,1H$ та відстані $0,5H$ від бар'єру).

- Етап 2: визначення швидкості повітряного потоку на різній відстані від захисного екрану (на висоті $0,1H$).

На рисунку 4 показано значення швидкості повітряного потоку за екраном. Вимірювання швидкості повітряного потоку здійснювалась на висоті $0,1H$.



Рис. 3. Фото моделі захисного екрану

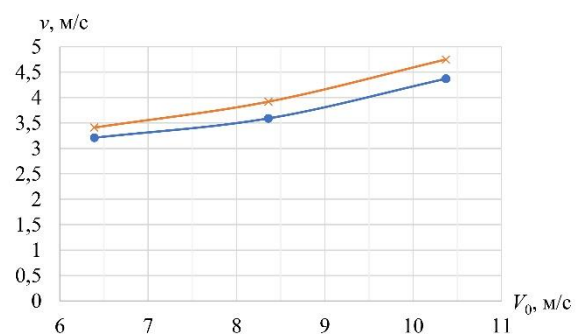


Рис. 4. Швидкість повітряного потоку за екраном:
× – розрахунок за розробленою моделлю

Обробка експериментальних даних дає можливість отримати наступну емпіричну модель, що можуть бути використана для оцінювання швидкості повітряного потоку

за даним захисним екраном (на висоті $0,1H$ та відстані $0,5H$ від бар'єру):

$$v = 0,049V_0^2 - 0,5304 \cdot V_0 + 4,597,$$

де V_0 – швидкість повітряного потоку перед екраном.

Далі на рисунку 5 показано зміну значення швидкості повітряного потоку за захисним екраном вздовж моделі промислового майданчику. Вимірювання швидкості повітряного потоку здійснювалась на висоті $0,1H$.

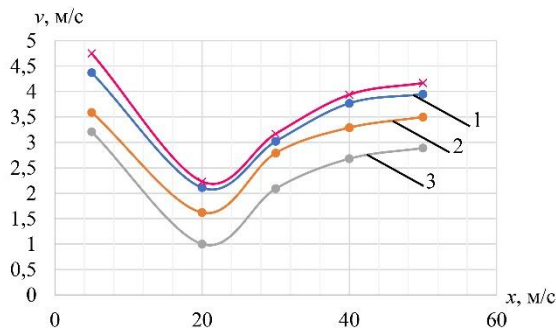


Рис. 5. Зміна швидкості повітряного потоку за «екраном потоку»: 1 – 10,37 м/с; 2 – 8,36 м/с; 3 – 6,39 м/с, × – розрахунок за розробленою моделлю ($V_0 = 10,37$ м/с)

Результати, що наведено на рисунку 5, дають можливість встановити таку закономірність: за захисним екраном швидкість повітряного потоку зменшується та досягає мінімуму на відстані $2H$ від захисного екрану, а далі починається зростання локальної швидкості повітряного потоку.

На наступному етапі була розроблена CFD модель для аналізу процесів аеродинаміки та масопереносу пилу при використанні на промисловому майданчику захисного екрану, що має складну форму.

Для рішення задачі аеродинаміки використовувалася модель потенціального руху:

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

де P – потенціал швидкості.

Граничні умови для даного рівняння розглянуто в [1; 2; 4].

Для чисельного інтегрування рівняння Лапласа попередньо його записано в еволюційному вигляді:

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

де t – фіктивний час.

Для розв'язання даного рівняння застосовується така різницева схема:

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

Крім даної розрахункової залежності також використовувалася інша різницева схема розщеплення для чисельного інтегрування рівняння (2). Це двукрокова змінно- трикутна схема:

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

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

Після розрахунку потенціалу швидкості розраховувалися компоненти вектору швидкості повітряного потоку за наступними формулами :

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

Процес поширення пилу в повітрі моделювався за допомогою наступного рівняння:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial (v-w)C}{\partial y} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \\ + Q_i(t) \cdot \delta(x - x_i) \cdot \delta(y - y_i), \end{aligned} \quad (3)$$

де C – концентрація пилу в повітрі, u, v – складові вектору швидкості вітру, x_i, y_i – декартові координати джерела емісії пилу, t – час, μ_x, μ_y – коефіцієнти турбулентної

дифузії в атмосфері, $\delta(x_i-x)\delta(y_i-y)$ – дельта-функція Дірака, Q – інтенсивність емісії пилу, w – швидкість гравітаційного осадження пилу.

Коефіцієнти турбулентної дифузії в атмосфері визначаються наступним чином:

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

Чисельне інтегрування рівняння (3) здійснюється за допомогою схем розщеплення [1–3]. Здійснена програмна реалізація розроблених чисельних моделей аеродинаміки та масопереносу.

Результати математичного моделювання. Нижче показано результати моделювання на базі розроблених чисельних моделей. Розглядався процес переносу пилу на промисловому майданчику при розташуванні екрану даного типу. Розміри розрахункової області $25 \times 10,5$ м; швидкість вітру 5 м/с; довжина області пилоутворення 6 м; інтенсивність пилоутворення 100 од (в безрозмірному вигляді); ширина екрану 1 м; висота екрану 5 м; довжина горизонтального елемента 2 м; швидкість гравітаційного осадження часток пилу 1,5 см/с.

Схему розрахункової області показано на рисунку 6. Концентрація пилу наведена в безрозмірному вигляді: кожне число показує у відсотках значення концентрації пилу від її максимального значення. Таким чином, числу «99» відповідає максимальне значення концентрації пилу.

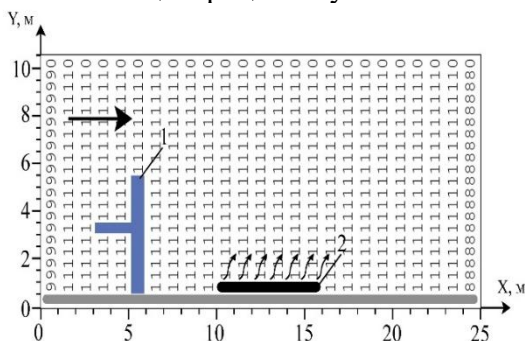


Рис. 6. Схema розрахункової області:
1 – екран з горизонтальним елементом;
2 – область пилоутворення

Нижче на рисунку показано поле концентрації пилу в області дослідження. Концентрація пилу наведена в

безрозмірному вигляді: кожне число показує у відсотках значення концентрації пилу від її максимального значення; числу «99» відповідає максимальне значення концентрації пилу.

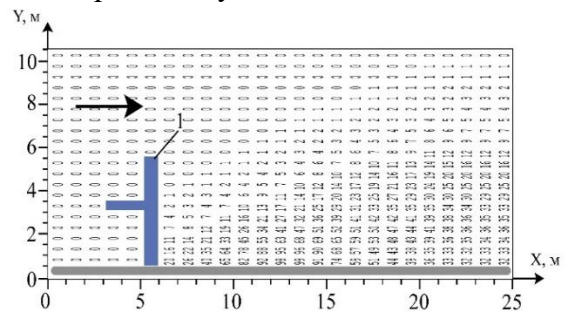


Рис. 7. Поле концентрації пилу на промисловому майданчику: 1 – захисний екран

Аналіз даних, що наведено на рисунку 7, показує, що при використанні захисного бар'єру даного типу, на відстані порядку 20 м від бар'єру, формується область забруднення, яка вище висоти бар'єру. На відстані порядку 20 м від бар'єру, в межах 2 м від поверхні майданчика, концентрація пилу в повітрі дорівнює 30–36 % від максимальної концентрації. Форма області пилового забруднення – це «шлейф», що притискається до поверхні землі.

Відзначимо, що час розрахунку складає 2 с.

Наукова новизна та практична цінність. Проведені експериментальні дослідження по визначенню закономірностей аеродинаміки при використанні захисного екрану складної форми на промисловому майданчику.

Розроблена CFD модель прогнозування пилового забруднення повітря на промисловому майданчику при використанні захисного екрану складної форми.

Висновки

1. Проведені експерименти, які визначили закономірності аеродинаміки потоків на промисловому майданчику при застосуванні захисного екрану складної форми.

2. Отримані емпіричні моделі, що дають можливість визначати швидкість повітряного потоку за захисним екраном.

3. Розроблено CFD модель, що дає можливість прогнозувати ефективність використання захисного екрану складної форми.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Берлов О. В., Козачина В. А. *CFD-моделирование в анализе эффективности систем защиты докілья 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. 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. 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*. 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 dokilliya 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, 1997, 368 p. (in Russian).
3. Samarskiy A.A. *Teoriya raznostnykh skhem* [The theory of difference schemes]. 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*. 2021, vol. 16 (2), part 1, pp. 73–86. URL: <https://doi.org/10.21307/tp-2021-024>
5. Brolin N. Development of Curved Noise and NOx 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*. 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 and 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 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: 20.03.2026.

Прийнято після рецензування: 20.04.2026.

Дата публікації: 29.05.2026.