

УДК 519.6:[504.5:629.33]

В. М. КУЗНЕЦОВ¹, В. В. БІЛЯЄВА², О. В. БЕРЛОВ^{3*}, О. В. ЗВОНАРЬОВА⁴,
П. Б. МАШИХІНА⁵

¹Каф. «Вища математика», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (067) 647 96 54, ел. пошта gitann-vm@obz.diit.edu.ua, ORCID 0000-0003-2253-8103

²Каф. енергетичних систем та енергоменеджменту, Український державний університет науки і технологій, ННІ ДМІ, пр. Науки, 4, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (056) 374 98 22, ел. пошта v.v.biliaieva@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-2399-3124

^{3*}Каф. охорони праці, цивільної та техногенної безпеки, Український державний університет науки і технологій, ННІ ПДАБА, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (056) 756 34 57, ел. пошта berlov.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID 0000-0002-7442-0548

⁴Каф. «Вища математика», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (067) 647 96 54, ел. пошта zvonareva.olyga@gmail.com, ORCID 0009-0001-9545-6996

⁵Каф. «Гідраліка, водопостачання та фізика», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта gidro_eko@ukr.net, ORCID 0000-0003-3057-9204

Математичне моделювання забруднення повітря біля автодоріг та оцінювання ризику захворювань у людей, які перебувають у зоні впливу викидів від автомобілів

Мета. Робота спрямована на розробку чисельної 2D-моделі, яка дозволяє швидко розрахувати всмоктування забрудненого повітря біля дороги. Швидка розрахункова модель CFD, має враховувати метеорологічні параметри, всмоктувальну трубу біля дороги для видалення забрудненого повітря, швидкість викиду токсичних газів. **Методика.** Розроблена модель базується на рівнянні потенційного потоку та рівнянні масопереносу забруднювача. Рівняння потенційного потоку використовують для обчислення вітрового потоку біля дороги у разі застосування всмоктувальної труби. Для розв'язання рівняння потенційної течії використано метод чисельного інтегрування Лібмана. Для розв'язання рівняння конвективно-дифузійної дисперсії використано неявну змінно-трикутну різницеву схему. Чисельне інтегрування здійснено за допомогою прямокутної різницевої сітки. Для створення форми комплексної розрахункової зони використано метод пористості («метод маркерів»). Викиди токсичних газів від автомобіля змодельовано за допомогою дельта-функції Дірака для точкового джерела. **Результати.** Розроблена чисельна 2D-модель враховує основні фізичні фактори, що впливають на процес розсіювання забруднювальних речовин біля дороги. Модель враховує вплив автомобіля та всмоктувальної труби, розташованої біля дороги для видалення забрудненого повітря. На основі розроблених чисельних моделей проведено обчислювальний експеримент для оцінки впливу застосування всмоктувальної труби на локальне забруднення атмосферного повітря біля дороги. **Наукова новизна.** Розроблена чисельна модель дозволяє розрахувати двовимірну схему потоку біля дороги, де використано такий захід пом'якшення, як всмоктувальна труба. Модель дозволяє виконувати швидкі розрахунки забруднення повітря з урахуванням впливу захисного бар'єру. На базі даних про розподіл концентрацій небезпечної речовини визначено ризик появи захворювань у людини, яка перебуває в зоні впливу викидів від автотранспорту. **Практична значимість.** Здійснено програмну реалізацію розробленої чисельної моделі, проведено обчислювальний експеримент, що проілюстрував ефективність використання моделі для вирішення прикладних задач. Наведено результати чисельного експерименту.

Ключові слова: забруднення повітря; міська вулиця; дисперсія забруднення; чисельне моделювання; всмоктувальна труба

Вступ

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

Наприклад, у [5, 6] це рослинність, пористий асфальт, міцні стіни, пилопоглиначі, TiO_2 покриття дороги тощо. Кожен метод має свої переваги та недоліки, які можна виявити в конкретних умовах для конкретної дороги. Для вибору заходів пом'якшення необхідно мати науково

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

обґрунтовану інформацію. Застосування конкретного методу пом'якшення також залежить від його вартості, часу встановлення та деяких місцевих умов. Одним із методів видалення забрудненого повітря від дорожнього руху є застосування всмоктувальної труби, з'єднаної з системою, яка забезпечує передачу забрудненого повітря з дороги та його очищення [5, 6]. Для практичного застосування цього методу необхідно вивчити його ефективність для конкретної ділянки дороги з урахуванням її ширини, інтенсивності дорожнього руху, швидкості всмоктування, розмірів всмоктувального отвору тощо.

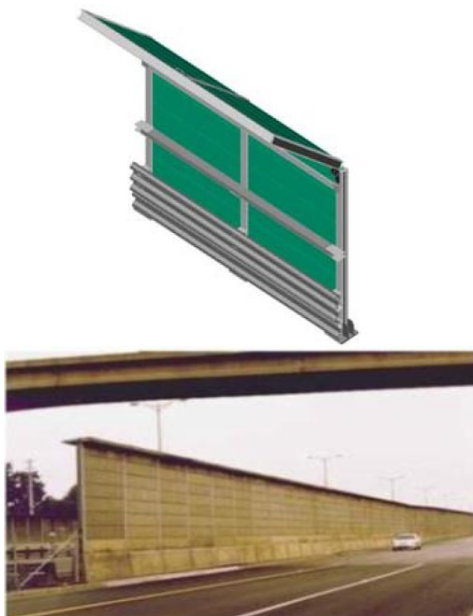


Рис. 1. Зображення бар'єрів, які застосовують для зниження забруднення біля автодоріг

Fig. 1. Image of barriers used to reduce pollution near highways

Щоб отримати цю інформацію на основі фізичних експериментів [13], необхідно провести багато досліджень у лабораторії, тому отримання результатів буде довготривалим. Фізичне моделювання, таким чином, дуже дороге. Більш прийнятним способом є застосування комп'ютерного моделювання. Як правило, багато моделей CFD використовують для вирішення проблем забруднення повітря від дорожнього руху. Для чисельного моделювання часто використовують рівняння Нав'є–Стокса в поєднанні з різними турбулентними моделями. Ці моделі представлені в деяких потужних

комерційних кодах (ANSYS тощо) [7–12]. Але застосування рівнянь Нав'є–Стокса потребує часу [4], і один чисельний експеримент може тривати багато годин. Це незручно, коли потрібно проводити багато чисельних експериментів, враховуючи різні сценарії забруднення повітря від транспорту та вживаючи різні заходи пом'якшення.

У цьому випадку буде зручніше провести чисельні експерименти на основі математичної моделі, що не займає багато часу, потім вибрати відповідні параметри системи пом'якшення для конкретних умов і після цього провести чисельний експеримент на основі рівнянь Нав'є–Стокса для уточнення цих параметрів.

Мета

Основною метою цієї роботи є розробка чисельної моделі для швидкого обчислення локальної якості повітря біля доріг із застосуванням всмоктувальної трубки для видалення забрудненого повітря з дороги.

Методика

Для моделювання вітрового потоку біля дороги з урахуванням різних перешкод (транспортний засіб, бар'єр) використовують модель потенціального потоку. У цьому випадку моделювальне рівняння має вигляд:

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

де P – потенціал швидкості.

Компоненти швидкості вітру розраховують таким чином:

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}; \quad v = \frac{\partial P}{\partial y}. \quad (2)$$

Граничні умови для рівняння (1) подано в [4]. Для чисельного інтегрування цього рівняння використано прямокутну сітку.

Розв'язують рівняння (1) за методом розщеплення. У цьому випадку його було записано в «еволюційному» вигляді:

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

де t – фіктивний час.

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

На наступному кроці здійснюють геометричне розщеплення цього рівняння таким чином:

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

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

Далі для визначення невідомого значення P на базі рівняння (3) використовують таку 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 (4) застосовують залежність:

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

Розрахунок закінчують, коли виконано умову:

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

де ε – мале число; n – номер ітерації.

Щоб розв'язати рівняння потенційного потоку, потрібно встановити «початкове» поле P для початку процедури ітерації. Розрахунок закінчують, якщо виконано наступну умову:

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

де $P_{i,j}^{n+1}$ – нова величина потенціалу; $P_{i,j}^n$ – попереднє значення потенціалу; ε – невелике число.

Розсіювання забруднювальних речовин біля дороги моделюють на основі наступного рівняння:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \\ + \sum_{i=1}^N Q_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i), \quad (5) \end{aligned}$$

де C – середня концентрація; u, v – складові швидкості вітру; $\mu = (\mu_x, \mu_y)$ – коефіцієнти дифузії; Q_i – швидкість випромінювання; $\delta(x - x_i) \delta(y - y_i)$ – дельта-функція Дірака; t – час.

Початкові та граничні умови для рівняння (4) описано у [1–3].

Перед розв'язанням рівняння (5) ми зробили його фізичне розбиття на послідовність із трьох рівнянь. Це такі рівняння:

$$\begin{aligned} 1) \quad \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = 0; \\ 2) \quad \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right); \\ 3) \quad \frac{\partial C}{\partial t} = \sum_{i=1}^N Q_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i), \end{aligned}$$

де $\delta(r - r_i)$ – дельта-функція Дірака; $r_i = (x_i, y_i)$ – координати точкового джерела.

Перше рівняння системи розщеплення описує перенесення забруднювальних речовин по траєкторіях. Друге рівняння системи описує дифузійне розсіювання забруднювача. Третє рівняння системи описує зміну концентрації під дією джерела Q .

Для чисельного інтегрування використовують такі залежності:

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

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

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

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

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

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

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

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

Схему розщеплення для рівняння конвективного переносу записують так:

– на першому кроці розщеплення різницеве рівняння має вигляд:

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

– на другому кроці розщеплення різницеве рівняння має вигляд:

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

Невідоме значення C в кожному рівнянні визначають за формулою біжного рахунку.

Для чисельного інтегрування рівняння дифузії використовують двоетапну різницеву схему розщеплення, яка має вигляд:

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

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

Для кодування різницевого рівняння ми використовували мову FORTRAN.

Перебування біля траси створює ризик появи захворювань у людини. Значення цього ризику розраховано на базі наступної емпіричної моделі (В. Т. Алимов, Н. П. Тарасова):

$$Risk = 1 - \exp(-0,174 \cdot (\frac{C}{ГДК \cdot K_3})^\beta \cdot t),$$

де $K_3=3$; $\beta=0,86$; t – час; C – концентрація небезпечної речовини в точці розташування реципієнта.

Результати

Побудовану чисельну модель було використано для розрахунку концентрації NO біля дороги. Чисельний експеримент проведено для трьох сценаріїв. Ескізи обчислювальної зони для цих сценаріїв показано на рис. 1 – 3. Перший сценарій – це відсутність бар'єру, існує лише «поріг» біля краю автодороги. Другий сценарій – застосування бар'єру, який має Т-подібну форму. Третій сценарій – вертикальний бар'єр, що має додатковий елемент із нахилом вертикальної плити.

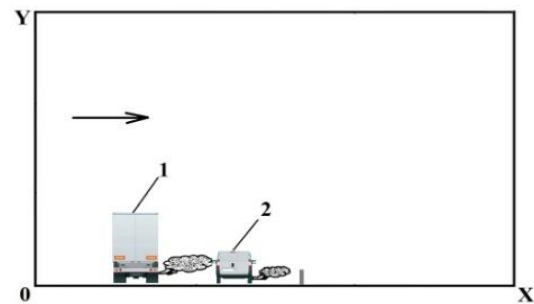


Рис. 2. Схема розрахункової зони, сценарій № 1:
1 – авто; 2 – авто

Fig. 2. Scheme of the calculation area, scenario № 1:
1 – auto; 2 – auto

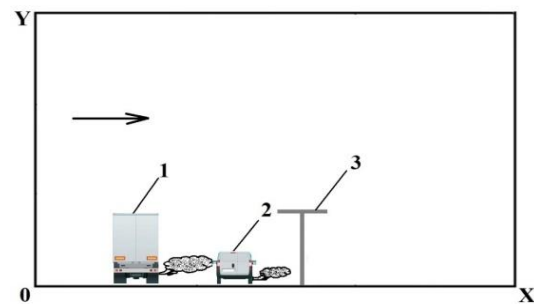


Рис. 3. Схема розрахункової області, сценарій № 2:
1 – авто; 2 – авто; 3 – бар'єр

Fig. 3. Scheme of the calculation area, scenario № 2:
1 – auto; 2 – auto; 3 – barrier

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

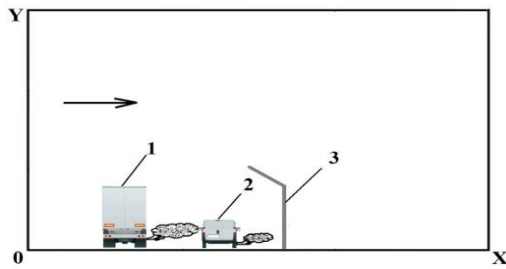


Рис. 4. Схема розрахункової зони, сценарій № 3:
1 – авто; 2 – авто; 3 – бар'єр

Fig. 4. Scheme of the calculation area, scenario № 3:
1 – auto; 2 – auto; 3 – barrier

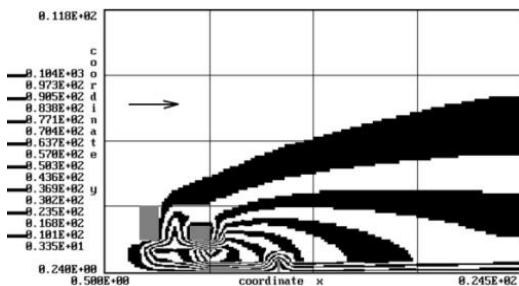


Рис. 5. Зона забруднення біля автошляху,
сценарій № 1

Fig. 5. Pollution zone near the highway, scenario № 1

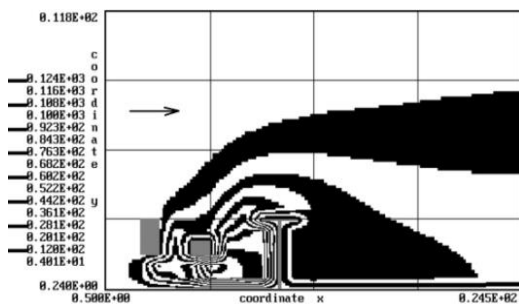


Рис. 6. Зона забруднення біля автошляху,
сценарій № 2

Fig. 6. Pollution zone near the highway, scenario № 2

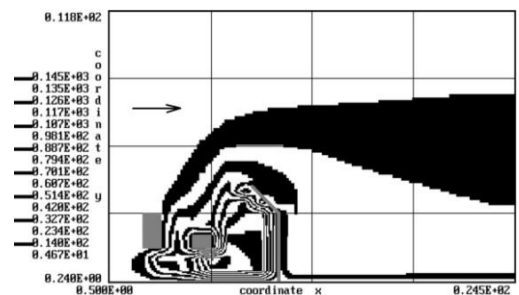


Рис. 7. Зона забруднення біля автошляху,
сценарій № 3

Fig. 7. Pollution zone near the highway, scenario № 3

Результати чисельного моделювання показують, що наявність бар'єрів суттєво впливає на деформацію зони забруднення. Значний градієнт концентрації домішки має місце перед бар'єрами. Це пов'язано з тим, що бар'єр створює перешкоду на шляху руху домішки з повітряним потоком. Як можемо бачити з рис. 7, використання вертикального бар'єру з додатковим елементом, що має ухил, дозволяє зменшити розміри зони забруднення за бар'єром.

Далі наведено результати оцінювання ризику появи захворювань у людини. За точку перебування реципієнта було обрано точку на відстані 7 м від автодороги та на висоті 1,7 м.

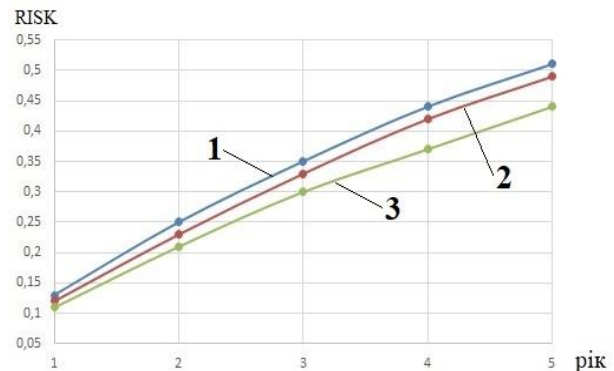


Рис. 8. Зона забруднення біля автошляху,
1 – сценарій № 1; 2 – сценарій № 2; 3 – сценарій № 3

Fig. 8. Risk of disease:

1 – scenario № 1; 2 – scenario № 2; 3 – scenario № 3

Аналіз даних, наведених на рис. 8, показує, що використання вертикального бар'єру з додатковим елементом, що має ухил, дозволяє зменшити ризик появи захворювань порівняно з бар'єром, що має Т-подібну форму.

Варто відзначити, що час обчислення становив близько 5 секунд для кожного сценарію.

Наукова новизна та практична значимість

Розроблено модель для розрахунку ефективності всмоктування забрудненого повітря біля дороги. Числова модель базується на застосуванні рівняння масопереносу та рівняння потенційної течії.

Особливістю розробленої моделі є швидкий розрахунок забруднених зон біля доріг.

Висновки

Розроблено чисельну модель для оцінки ефективності всмоктування забрудненого повітря біля дороги. На основі моделі потенційного потоку було розраховано режим вітру біля дороги. Для розв'язання рівняння потенціалу потоку використано метод Лібмана. Це дозволяє швидко розрахувати режим вітру біля дороги.

Для прогнозування концентрації газу поблизу дороги було використано рівняння масообміну. Чисельне інтегрування цього рівняння виконано за неявною різницевою схемою.

Подальше удосконалення моделі потрібно здійснювати в напрямі створення чисельної 3D-моделі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Беляев Н. Н., Русакова Т. И. CFD прогнозирование процесса загрязнения воздушной среды на улицах. *Екологія і природокористування*. 2013. Вип. 17. С. 188–194.
2. Беляев Н. Н., Русакова Т. И., Кириченко П. С. *Моделирование загрязнения атмосферного воздуха выбросами автотранспорта на улицах городов*. Днепропетровск : Акцент ПП, 2014. 159 с.
3. Згуровский М. З., Скопецкий В. В., Хрущ В. К., Беляев Н. Н. *Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде*. Киев : Наукова думка, 1997. 368 с.
4. Berlov O. V. Atmosphere protection in case of emergency during transportation of dangerous cargo. *Наука та прогрес транспорту*. 2016. № 1 (61). С. 48–54. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/60953>
5. Chang C.-H., Lin J.-S., Cheng C.-M., Hong Y.-S. Numerical simulations and wind tunnel studies of pollutant dispersion in the urban street canyons with different height arrangements. *Journal of Marine Science and technology*. 2013. Vol. 21. Iss. 2. P. 119–126.
6. Düring I., Bächlin W., Ketzler M., Baum A., Friedrich U., Wurzel S. A new simplified NO/NO₂ conversion model under consideration of direct NO₂-emissions. *Meteorologische Zeitschrift*. 2011. Vol. 20. Iss. 1. P. 67–73. DOI: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2011/0491>
7. Hagler G. S. W., Tang W., Freeman M. J., Heist D. K., Perry S. G., Vette A. F. Model evaluation of roadside barrier impact on near-road air pollution. *Atmospheric Environment*. 2011. Vol. 45. P. 2522–2530. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.02.030>
8. Hashad K., Steffens J. T., Baldauf R. W., Heist D. K., Deshmukh P., Zhang K. M. Resolving the effect of roadside vegetation barriers as a near-road air pollution mitigation strategy. *Environmental Science: Advances*. 2024. Vol. 3. Iss. 3. P. 411–421. DOI: <https://doi.org/10.1039/d3va00220a>
9. Huertas J. I., Aguirre, J. E. Lopez Mejia O. D., Lopez C. H. Design of Road-Side Barriers to Mitigate Air Pollution near Roads. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. P. 1–20. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11052391>
10. Huertas J. I., Prato D. F. CFD Modeling of Near-Roadway Air Pollution. *Environmental Modeling & Assessment*. 2020. Vol. 25. P. 129–145. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10666-019-09666-w>
11. Lin C., Ooka R., Kikumoto H., Flageul C., Kim Y., Wang Y., ..., Sartelet K. Large-eddy simulations on pollutant reduction effects of road-center hedge and solid barriers in an idealized street canyon. *Building and Environment*. 2023. Vol. 241. P. 110464. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110464>
12. Nguyen T. N., Nguyen T. C., Nguyen V. T. Numerical simulation of wind flow and pollution transport in urban street canyons. *Advanced science and technology letters*. 2015. Vol. 120. P. 770–777. DOI: <https://doi.org/10.14257/astl.2015.120.152>
13. Overman H. T. *Simulation model for NO_x distributions in a street canyon with air purifying pavement*: Master thesis. University Twente, Netherlands, 2009. 107 p.

V. M. KUZNETSOV¹, V. V. BILIAIEVA², O. V. BERLOV^{3*}, O. V. ZVONAROVA⁴,
P. B. MASHYKHINA⁵

¹Dep. of «Higher Mathematics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, +38 (067) 647 96 54, e-mail gitann-vm@obz.diit.edu.ua, ORCID 0000-0003-2253-8103

²Dep. of Energy Systems and Energy Management, Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DMetI, Science Av., 4, Dnipro, Ukraine, 49600, tel. +38 (056) 374 98 22, e-mail v.v.biliaieva@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-2399-3124

^{3*}Dep. of Labor Protection, Civil and Technogenic Safety, Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI PSACEA, Architect Oleh Petrov St., 24-a, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (056) 756 34 57, e-mail berlov.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID 0000-0002-7442-0548

⁴Dep. of «Higher Mathematics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, +38 (067) 647 96 54, e-mail zvonareva.olyga@gmail.com, ORCID 0009-0001-9545-6996

⁵Dep. of «Hydraulics, Water Supply and Physics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail gidro_eko@ukr.net, ORCID 0000-0003-3057-9204

Mathematical Modeling of Air Pollution Near Roads and Assessment of Disease Risk in People Exposed to Vehicle Emissions

Purpose. The work is aimed at developing a numerical 2D model that allows for the rapid calculation of the absorption of polluted air near the road. A fast CFD model should take into account meteorological parameters, a suction pipe near the road to remove polluted air, and the rate of toxic gas emissions. **Methodology.** The developed model is based on the potential flow equation and the pollutant mass transfer equation. The potential flux equation is used to calculate the wind flow near the road in the case of a suction pipe. The Liebman numerical integration method was used to solve the potential flow equation. To solve the convective-diffusive dispersion equation, an implicit variable-triangular difference scheme was used. The numerical integration is carried out using a rectangular difference grid. The porosity method (“marker method”) was used to create the shape of the complex computational zone. Toxic gas emissions from a car were modeled using the Dirac delta function for a point source. **Findings.** The developed numerical 2D model takes into account the main physical factors that affect the process of dispersion of pollutants near the road. The model takes into account the influence of a car and a suction pipe located near the road to remove polluted air. On the basis of the developed numerical models, a computational experiment was conducted to assess the impact of the use of a suction pipe on local air pollution near the road. **Originality.** The developed numerical model allows to calculate a two-dimensional flow pattern near the road, where such a mitigation measure as a suction pipe is used. The model allows for quick calculations of air pollution, taking into account the impact of the protective barrier. Based on the data on the distribution of the concentration of a non-hazardous substance, the risk of disease in a person exposed to vehicle emissions was determined. **Practical value.** The software implementation of the developed numerical model was carried out, and a computational experiment was conducted to illustrate the effectiveness of using the model to solve applied problems. The results of the numerical experiment are presented.

Key words: air pollution; city street; pollution dispersion; numerical modeling; suction pipe

REFERENCES

1. Biliaiev, M. M., Rusakovaa, T. I., & Kirichenko, P. S. (2014). *Modelirovanie zagryazneniya atmosfernogo vozdukhа vybrosami avtotransporta na ulitsakh gorodov*. Dnepropetrovsk: Aktsent PP. (in Russian)
2. Biliaiev, N. N., & Rusakova, T. I. (2013). CFD prediction of air pollution in the streets. *Ecology and nature management*, 17, 188-194. (in Russian)
3. Zgurovskii, M. Z., Skopetskii, V. V., Khrutch, V. K. & Biliaiev, M. M. (1997). *Chislennoe modelirovanie rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede*. Kiev: Naukova dumka. (in Russian)
4. Berlov, O. V. (2016). Atmosphere protection in case of emergency during transportation of dangerous cargo. *Science and Transport Progress*, 1(61), 48-54. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/60953> (in English)
5. Chang, C.-H., Lin, J.-S., Cheng, C.-M., & Hong, Y.-S. (2013). Numerical simulations and wind tunnel studies of pollutant dispersion in the urban street canyons with different height arrangements. *Journal of Marine Science and technology*, 21(2), 119-126. (in English)
6. Düring, I., Bächlin, W., Ketzel, M., Baum, A., Friedrich, U., & Wurzel, S. (2011). A new simplified NO/NO₂ conversion model under consideration of direct NO₂-emissions. *Meteorologische Zeitschrift*, 20(1), 67-73. DOI: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2011/0491> (in English)

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

7. Hagler, G. S. W., Tang, W., Freeman, M. J., Heist, D. K., Perry, S. G., & Vette, A. F. (2011). Model evaluation of roadside barrier impact on near-road air pollution. *Atmospheric Environment*, 45(15), 2522-2530. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.02.030> (in English)
8. Hashad, K., Steffens, J. T., Baldauf, R. W., Heist, D. K., Deshmukh, P., & Zhang, K. M. (2024). Resolving the effect of roadside vegetation barriers as a near-road air pollution mitigation strategy. *Environmental Science: Advances*, 3(3), 411-421. DOI: <https://doi.org/10.1039/d3va00220a> (in English)
9. Huertas, J. I., & Prato, D. F. (2019). CFD Modeling of Near-Roadway Air Pollution. *Environmental Modeling & Assessment*, 25(1), 129-145. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10666-019-09666-w> (in English)
10. Huertas, J. I., Aguirre, J. E., Lopez Mejia, O. D., & Lopez, C. H. (2021). Design of Road-Side Barriers to Mitigate Air Pollution near Roads. *Applied Sciences*, 11(5), 1-20. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11052391> (in English)
11. Lin, C., Ooka, R., Kikumoto, H., Flageul, C., Kim, Y., Wang, Y., Maison, A., Zhang, Y., & Sartelet, K. (2023). Large-eddy simulations on pollutant reduction effects of road-center hedge and solid barriers in an idealized street canyon. *Building and Environment*, 241, 110464. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110464> (in English)
12. Nguyen, T. N., Nguyen, T. C., & Nguyen, V. T. (2015). Numerical Simulation of Wind Flow and Pollution Transport in Urban Street Canyons. *Advanced Science and Technology Letters*, 120, 770-777. DOI: <https://doi.org/10.14257/astl.2015.120.152> (in English)
13. Overman, H. T. (2009). *Simulation model for NO_x distributions in a street canyon with air purifying pavement* (Master thesis). University Twente, Netherlands. (in English)

Надійшла до редколегії: 20.11.2024

Прийнята до друку: 27.03.2025