

УДК 519.6

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.249485

## Розробка методу оцінки ефективності використання захисних бар'єрів для зниження рівня забруднення повітря біля автотрас

М. М. Біляєв, В. А. Козачина, В. В. Біляєва, Т. І. Русакова, О. В. Берлов,  
Ю. А. Мала

*Автотраса є інтенсивним джерелом забруднення довкілля. Найшвидшому антропогенному впливу піддається атмосферне повітря. Тому особливо важливим завданням є мінімізація рівня забруднення атмосферного повітря біля автотрас. Ефективним методом вирішення цього завдання є застосування захисних бар'єрів різної форми, що встановлюються біля автотрас. На стадії проектування даних захисних засобів виникає важливе завдання щодо оцінки їх ефективності.*

*Оцінка ефективності захисних бар'єрів методом фізичного експерименту потребує значного часу на постановку, проведення експерименту та аналіз результатів фізичного моделювання. Цей метод не завжди є зручним під час проведення проектних робіт. Альтернативним методом є метод математичного моделювання. Для проектувальника дуже важливо мати математичні моделі, які дозволяють швидко отримувати прогностичний результат та врахувати комплекс важливих факторів, від яких залежить ефективність захисного бар'єру.*

*Розроблено метод, що дозволяє оцінити ефективність використання захисних бар'єрів для зниження рівня забруднення атмосферного повітря біля автотраси. Встановлено, що збільшення висоти бар'єру на 80 % приводить до зниження концентрації домішки за бар'єром на 22 %. Виявлено, що при використанні бар'єру висотою 1,5 м приводить до зменшення концентрації домішки на 26 % у прилеглих до автотраси спорудах. Розроблено метод для оцінки ефективності використання поглинаючих «TX Active» поверхонь на захисному бар'єрі, що розташований біля автотраси. В результаті проведених досліджень виявлено, що використання бар'єру з однією «TX Active» поверхнею приводить до зниження концентрації NO за бар'єром в середньому на 43 %. При використанні бар'єру з двома «TX Active» поверхнями зниження концентрації NO за бар'єром складає в середньому 85 %.*

*Ключові слова: забруднення повітря, захисний бар'єр, автотраса, чисельне моделювання, «TX Active» поверхня.*

### 1. Вступ

Сучасна автомагістраль – це складна інженерна споруда, що є потужним джерелом техногенного впливу на навколишнє середовище внаслідок формування інтенсивних зон забруднення біля автотрас. Емісія забруднюючих речовин на автотрасі являє собою особливу загрозу для людини [1]. Тому, визначенню закономірностей формування зон забруднення біля автотрас [2] та впливу цього забруднення на стан здоров'я людини [3] приділяється значна увага. З часом, підвищи-

лись вимоги щодо результатів дослідження закономірностей формування зон забруднення біля автотрас. При такому аналізі потрібно враховувати хімічну трансформацію забруднюючих речовин, що містяться у викидах від автомобілів [4]. У зв'язку з суттєвим негативним впливом автотрас на забруднення довкілля та людину виникає важлива проблема зменшення цього впливу [5].

Тому при проектуванні та будівництві автотраси здійснюється рішення комплексу задач по зниженню її негативного впливу на навколишнє середовище. Рішення цієї задачі базується на імплементації спеціальних захисних методів. Мета застосування цих методів – це обмеження поширення забруднення від автотраси до людини. Найпоширенішим методом захисту повітря від забруднення біля автотрас у світі є використання захисних бар'єрів [6]. На стадії проектування автотраси дуже важливо заздалегідь виконати оцінку ефективності захисних бар'єрів, що будуть зведені біля автотраси. Для розв'язання цієї задачі необхідно мати спеціалізовані методи розрахунку. Ці методи повинні враховувати рельєф місцевості, де пролягає автотраса. Існуючі методи оцінювання ефективності захисних бар'єрів не враховують комплексно такі суттєві фактори, як корпус автомобіля, рельєф, захисний бар'єр. Тому оцінка ефективності використання захисних бар'єрів на базі існуючих методів розрахунку є досить наближеною. Тому наукові дослідження, спрямовані на розробку методів, які дозволяють аналізувати вплив захисних бар'єрів на зниження рівня забруднення атмосферного повітря біля автотрас з урахуванням найбільш суттєвих факторів, є актуальними.

## **2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми**

Проблема мінімізації рівня забруднення повітряного середовища біля автотрас, як правило, базується на розв'язанні двох задач. Перша задача – це аналіз інтенсивності забруднення повітря біля автотраси. Друга задача – це розробка засобів, що спрямовані на зниження рівня забруднення повітря біля автотрас. Слід відзначити, що найбільш поширеним засобом захисту повітря біля автотрас є використання захисних бар'єрів (перешкод), що змінюють напрям руху повітряного потоку біля автотраси та змінює напрям розповсюдження домішки біля автотраси – вгору від траси. Це приводить до зменшення концентрації домішки біля автотраси на рівні органів дихання людини. Важливо відзначити, що побудова захисних бар'єрів не потребує значних капіталовкладень та може бути здійснена шляхом використання типової будівельної техніки.

В роботі [7] проведено експериментальні дослідження по визначенню інтенсивності забруднення повітря біля автотраси. Цінність результатів даної роботи полягає в тому, що дослідження було проведено в натурі (тобто «field experiment»). Отримані дані можуть бути використані лише для аналізу формування зони забруднення в діапазоні тих параметрів метеоумов, що мали місце при проведенні експерименту. Отже використовувати їх для інших метеоумов або іншого рельєфу місцевості, що потрібно робити при проведенні проектних робіт, неможливо.

В роботі [8] виконана валідація комплексу математичних моделей, що використовуються для прогнозування рівня забруднення повітря біля автотрас. Але ці моделі (AERMOD, CALINE тощо) базуються на моделі Гауса. При тако-

му підході неможливо визначати вплив захисних бар'єрів для зниження інтенсивності забруднення повітря. Це пов'язано з тим, що дані моделі використовують рівномірне поле швидкості вітру, тобто поле вітру, що формується при відсутності перешкод. Ці моделі можуть бути використані для експрес-оцінки інтенсивності та розмірів зон забруднення повітря біля автотрас.

В роботі [9] наведено результати експериментів по аналізу інтенсивності забруднення повітря біля автотрас при наявності або відсутності перешкод. Дані вимірювань дозволяють визначити інтенсивність зниження рівня забруднення повітря при різних метеоумовах. Але при проведенні експериментів у [9] використовувалась недостатня кількість датчиків для вимірювань. Тому отримані результати мають «пілотний» характер та не можуть бути використані при проведенні проектних робіт.

У роботі [10] проведено експериментальне дослідження в лабораторних умовах по визначенню ефективності всмоктуючої систем на зниження рівня забруднення повітря біля автотраси. У [10] також запропоновано математичну модель, що дозволяє визначати ефективність всмоктуючої системи. Але в роботі [10] не враховано вплив корпусів автомобілів на формування зон забруднення. З аеродинамічної точки зору, корпус автомобіля є перешкодою на шляху вітрового потоку, який кардинально змінює профіль швидкості повітря, а отже і форму зони хімічного забруднення.

В роботі [11] розглянуто побудову чисельної моделі, що дає можливість визначити ефективність використання вертикального бар'єру біля автотраси, але модель не дає можливості визначити цю ефективність в умовах складного рельєфу місцевості.

В роботі [12] проведено комплекс обчислювальних експериментів по визначенню зон хімічного забруднення від автодоріг в умовах перешкод. Автори використовували рівняння Нав'є-Стокса для рішення задач аеродинаміки – розрахунок поля швидкості повітряного потоку. Але при використанні рівнянь Нав'є-Стокса суттєво збільшився комп'ютерний час при реалізації моделі до декількох діб для розрахунку одного варіанту задачі. Такий значний час є дуже незручним фактором при проведенні серійних розрахунків на етапі проведення проектних робіт. Причиною вищезазначеного є те, що протягом робочого дня потрібно визначити ефективність великої кількості варіантів перешкод для обрання найбільш ефективної.

В роботі [5] здійснено аналіз впливу висоти захисного бар'єру на формування зони забруднення повітря біля автотраси. В роботі [5] застосовано рівняння Нав'є-Стокса (комерційний пакет FLUENT). Але при проведенні обчислювальних експериментів в роботі [5] не було враховано вплив корпусу автомобіля на формування зони забруднення.

В роботі [13] розглядається розробка CFD моделі для аналізу ефективності використання захисного бар'єру на зниження рівня забруднення повітря. Запропонована в [13] чисельна модель дозволила визначити інтенсивність та розміри зони забруднення біля автотраси, але ця модель не враховувала складність форми бар'єру та рельєф місцевості.

В роботі [14] представлена чисельна модель для аналізу використання захисних бар'єрів біля автотрас, що знаходяться в умовах складного рельєфу міс-

цевості. Модель дає можливість оцінити розміри та інтенсивність зон забруднення для типових умов: «насип», «виїмка». Але недоліком даної роботи є те, що автомобіль, який здійснює викид забруднюючих речовин, моделюється як точкове джерело забруднення.

В роботі [15] наведено результати досліджень по зниженню концентрації забруднюючих речовин біля автотраси у випадку розташування рослинного захисного бар'єру. Експериментальні дані, що представлені в роботі, дозволяють визначити ефективність даного бар'єру відносно зменшення концентрації пилу на різній висоті. Але наведені дані не можуть бути використані для оцінювання ефективності такого роду бар'єрів, що розташовані іншим чином відносно автотраси, та мають іншу висоту. Тобто в існуючих наукових публікаціях не враховуються комплексно такі суттєві фактори, як бар'єр+рельєф+корпус автомобіля. Всі ці фактори є перешкодами на шляху розповсюдження домішки від автомобіля та приводять до формування нерівномірного поля швидкості повітряного потоку та, як наслідок, складної зони хімічного забруднення.

В роботі [16] наведено результати експериментальних досліджень по визначенню ефективності використання поглинаючих поверхонь на зниження рівня хімічного забруднення атмосферного повітря. У [16] показано, що такі поверхні дозволяють локально знизити концентрацію  $\text{NO}_2$  в повітрі. В роботі [16] відсутні математичні моделі, що могли бути використані для комплексного аналізу даного явища.

В роботі [17] наведено результати фундаментальних досліджень по зниженню рівня забруднення повітря біля автотрас, що мають поглинаючі покриття. Наукові дані роботи [17] підтверджують ефективність використання таких покриттів для мінімізації негативного впливу автотраси на довкілля.

В роботі [18] побудована чисельна модель для аналізу впливу поглинаючого покриття автотраси на рівень забруднення повітря. Також в роботі [18] наведено результати експериментальних досліджень. Дані роботи [18] відносяться лише до конфігурації «каньйон», тобто для автодороги з покриттям, що розташована між будинками.

На підставі публікацій періодичних наукових видань можна стверджувати, що питання, пов'язані з розробкою методів оцінювання ефективності використання захисних бар'єрів, потребують подальшого розвитку.

### **3. Мета та задачі дослідження**

Метою роботи є розробка швидкорозрахункових CFD моделей (quick computing CFD models) для оцінювання ефективності застосування захисних бар'єрів біля автотрас з урахування різного роду перешкод (рельєф місцевості, бар'єри, будівлі вздовж автотраси, корпуси автомобілів тощо). Це дасть можливість зменшення часу на проведення досліджень в даній галузі.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

– розробити двовимірну CFD модель для розрахунку ефективності застосування захисних бар'єрів, що встановлюються біля автотраси, яка пролягає в умовах складного рельєфу;

- розробити тривимірну CFD модель для розрахунку ефективності застосування захисного бар'єру, що має поглинаюче покриття;
- провести обчислювальні експерименти на базі побудованих CFD моделей.

#### 4. Матеріали та методи дослідження

Розробка методу оцінювання ефективності використання захисних бар'єрів, що встановлюються біля автотрас, базується на створенні чисельної моделі (CFD моделі), що описує фізичний процес розповсюдження домішки в атмосферному повітрі.

Для оцінювання ефективності використання захисних бар'єрів потрібно дослідити, як формуються зони хімічного забруднення повітря біля автотраси. При цьому буде враховуватись складний рельєф місцевості, розташування біля автотраси захисних бар'єрів, наявність поглинаючого покриття на поверхні захисних бар'єрів, нерівномірність поля швидкості вітру, атмосферна дифузія. Це є ключові фактори, що впливають на формування зон хімічного забруднення біля автотрас.

Основою для розробки методу оцінки ефективності використання захисних бар'єрів біля автотраси є багатофакторні чисельні моделі. Далі розглядається побудова таких моделей. Для побудови чисельної моделі використовувалися кінцево-різницеві методи інтегрування моделюючих рівнянь [19]. Чисельне інтегрування моделюючих рівнянь здійснюється на прямокутній різницевій сітці.

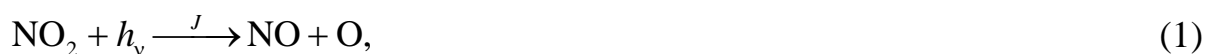
#### 5. Результати дослідження з розробки методу оцінки ефективності використання захисних бар'єрів

##### 5. 1. Розробка двовимірної CFD моделі розрахунку ефективності застосування захисних бар'єрів в умовах складного рельєфу

Для розробки методу експрес-оцінювання ефективності використання вертикальних захисних бар'єрів в умовах складного рельєфу місцевості має сенс використовувати двовимірні математичні моделі.

Розглядається побудова методу для розрахунку ефективності застосування захисних бар'єрів біля автотраси. Цей метод базується на створенні чисельної моделі поширення домішки в умовах складного рельєфу. Схема розрахункової області наведена на рис. 1.

Викиди від автомобіля містять NO, NO<sub>2</sub>. При побудові математичної моделі будемо враховувати хімічні перетворення цих домішок наступним чином [4, 20]:



де  $J$  – параметр швидкості реакції для процесу фотолізу в залежності від кількості ультрафіолетового випромінювання,  $k_1$  – параметр швидкості реакції для NO, 1/с.

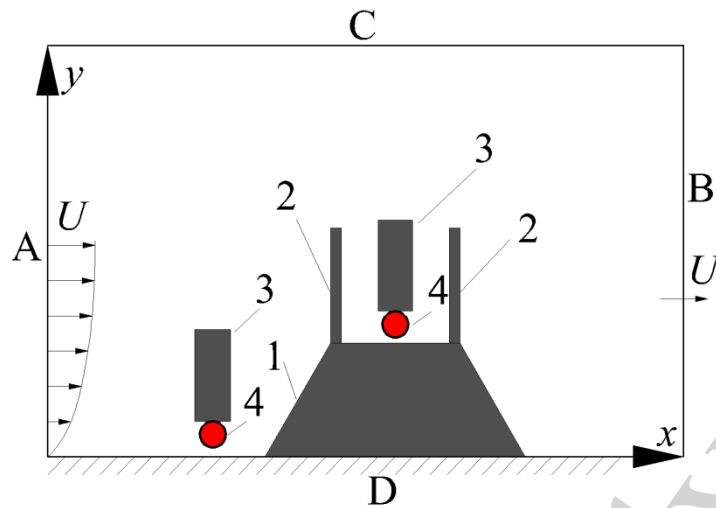


Рис. 1. Розрахункова схема: 1 – насип, 2 – захисні бар’єри, 3 – автомобіль, 4 – джерело емісії (труба вихлопу); А, В, С, D – межі розрахункової області

Задача прогнозування якості атмосферного повітря біля автотраси розв’язується в два етапи:

1. Моделювання процесу конвективно-дифузійного поширення в повітрі забруднюючих речовин від джерела викиду (автомобіль).

2. Хімічне перетворення забруднюючих речовин в повітрі.

Для моделювання перенесення NO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> в атмосферному повітрі (перший етап) використовуються наступні рівняння масопереносу [21]:

$$\frac{\partial C_{NO}}{\partial t} + \frac{\partial(uC_{NO})}{\partial x} + \frac{\partial(vC_{NO})}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C_{NO}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C_{NO}}{\partial y} \right) + \sum_{i=1}^n Q_{NO_i}(t) \delta(x - x_{0i}) \delta(y - y_{0i}), \quad (4)$$

$$\frac{\partial C_{NO_2}}{\partial t} + \frac{\partial(uC_{NO_2})}{\partial x} + \frac{\partial(vC_{NO_2})}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C_{NO_2}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C_{NO_2}}{\partial y} \right) + \sum_{i=1}^n Q_{NO_2,i}(t) \delta(x - x_{0i}) \delta(y - y_{0i}), \quad (5)$$

$$\frac{\partial C_{O_3}}{\partial t} + \frac{\partial(uC_{O_3})}{\partial x} + \frac{\partial(vC_{O_3})}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C_{O_3}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C_{O_3}}{\partial y} \right), \quad (6)$$

де  $C_{NO}(x, y, t)$ ,  $C_{NO_2}(x, y, t)$ ,  $C_{O_3}(x, y, t)$  – концентрація NO, NO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, кг/м<sup>3</sup>;  $Q_{NO,i}$ ,  $Q_{NO_2,i}$  – інтенсивність викиду NO, NO<sub>2</sub> від  $i$ -ого джерела емісії (автомобіль), кг/(с·м<sup>3</sup>);  $u$ ,  $v$  – компоненти вектора швидкості вітру, м/с;  $\mu = (\mu_x, \mu_y)$  –

коефіцієнт турбулентної дифузії,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $x_{0i}, y_{0i}$  – координати джерел викиду забруднюючої речовини (автодороги),  $\text{м}$ ;  $\delta(x - x_{0i})\delta(y - y_{0i})$  – дельта-функція Дірака, яка моделює наявність викиду забруднювача,  $\text{м}^{-2}$ .

Значення коефіцієнтів дифузії розраховуються за формулами:  $\mu_x = k_0 \cdot U$ ,  $k_0 = (0,1 \div 1)$  в залежності від ступеня стійкості атмосфери,  $U$  – швидкість вітру,

$\text{м}/\text{с}$ ;  $\mu_y = k_1 \left(\frac{Y}{Y_1}\right)^m$ ,  $k_1 = (0,1 \div 0,2)$   $\text{м}^2/\text{с}$  в рамках висоти приземного шару атмос-

фери,  $Y_1 = 10$   $\text{м}$ ,  $m \approx 1$ .

Крайові умови для моделюючих рівнянь розглянуто в [19].

Дельта-функція дорівнює нулю всюди, крім осередків, де знаходиться  $i$ -те джерело забруднення. Емісія забруднюючих речовин від автотранспорту моделюється точковими джерелами заданої інтенсивності  $Q_{\text{NO}_i}$ ,  $Q_{\text{NO}_2 i}$ ,  $n$  – кількість

джерел забруднення.  $\sum_{i=1}^n Q_{\text{NO}_2 i}(t)\delta(x - x_{0i})\delta(y - y_{0i})$  – означає, що враховується

дія всіх джерел забруднення з конкретною інтенсивністю забруднюючої речовини, з урахуванням принципу суперпозиції.

На другому етапі рішення задачі здійснюється розрахунок хімічної трансформації речовин в атмосферному повітрі з використанням таких залежностей:

$$\frac{\partial C_{\text{NO}}}{\partial t} = -k_1 \cdot C_{\text{NO}} \cdot C_{\text{O}_3} + J \cdot C_{\text{NO}_2}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial C_{\text{NO}_2}}{\partial t} = k_1 \cdot C_{\text{NO}} \cdot C_{\text{O}_3} - J \cdot C_{\text{NO}_2}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial C_{\text{O}_3}}{\partial t} = -k_1 \cdot C_{\text{NO}} \cdot C_{\text{O}_3} + J \cdot C_{\text{NO}_2}. \quad (9)$$

При проведенні розрахунків прийнято:  $J = 0,0045 \text{ с}^{-1}$ ,  $\mu_y = 0,00039 (\text{ppm} \cdot \text{с})^{-1}$  [4].

В даній моделі прийнято, що викид  $\text{NO}_2$  становить величину порядку 5 % від викиду  $\text{NO}_x$ , а інша частина викиду, близько 95 %, – це викид  $\text{NO}$ .

В роботі розглянуто розсіювання викидів від автотранспорту для випадку, коли біля автодороги розташовуються захисні бар'єри, а місцевість має складний рельєф, як показано на рис. 1. У цьому випадку в області дослідження формується нерівномірне поле швидкості повітряного потоку. Це поле необхідно знати для вирішення моделюючих рівнянь (4)–(6). Для розрахунку повітряного потоку в таких умовах використовується модель потенційної течії. В цьому випадку моделюючим рівнянням є рівняння Лапласа для потенціалу швидкості [19]:

$$\frac{\partial P^2}{\partial x^2} + \frac{\partial P^2}{\partial y^2} = 0. \quad (10)$$

Для рівняння (10) поставлено такі граничні умови (рис. 1):

– на границі  $A$  – потік входить в розрахункову область, для потенціалу швидкості ставиться гранична умова Неймана

$$\frac{\partial P}{\partial x} = U,$$

де  $U$  – відоме значення швидкості вітрового потоку

$$U = U_1 \cdot (y/y_1)^{n_1},$$

де  $U_1$  значення швидкості вітру на деякій фіксованій висоті  $y_1=10$  м,  $n_1 \approx 0,15 - 0,69$ , так як залежить від шорсткості підстильної поверхні і класу стійкості тмосфери, в роботі приймалося значення  $n_1=0,15$ ;

– на границі  $B$  – потік виходить з розрахункової області, для потенціалу швидкості ставиться гранична умова Діріхле  $P=P_0+const$ , де  $P_0$  – деяка числова константа рівна 100;

– на границі  $C$  – верхня межа, тверда непронікна стінка, ставиться умова непроникання  $\frac{\partial P}{\partial y} = 0$ , оскільки в численних розрахунках не може бути нескінченної

границі, то її вибирають на достатній відстані, де кривизна ліній струму несуттєва;

– на границі  $D$  – нижня границя, тверда непрозора стінка, ставиться умова непроникнення  $\frac{\partial P}{\partial y} = 0$ ;

– на всіх твердих стінках насипу, бар'єрів і автомобіля в залежності від напрямку нормалі має виконуватися умова непроникнення.

Компоненти вектора швидкості повітряного потоку розраховано на основі залежностей [19]:

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

Таким чином, платформою для прогнозування якості повітря біля автотраси зі складним рельєфом місцевості та при наявності бар'єрів є моделюючі рівняння (4)–(10).

## 5. 2. Розробка тривимірної CFD моделі розрахунку ефективності застосування захисного бар'єру з поглинаючим покриттям

Розглядається побудова методу для розрахунку ефективності застосування поглинаючих поверхонь на захисних бар'єрах, що розташовані біля автотраси. Цей метод базується на створенні чисельної моделі поширення домішки та її взаємодію з поглинаючою поверхнею.



Поверхні, що поглинають NO («photocatalytic» поверхні, «ТХ Active» поверхні) використовуються не тільки для покриття полотна дороги, але й для покриття захисних бар'єрів. Для рішення задачі по визначенню впливу бар'єрів з поглинаючою поверхнею на формування якості повітряного середовища біля автотраси побудовано математичну модель. Моделюючі рівняння цієї моделі такі [19, 20]:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial (w - w_s)C}{\partial z} + \sigma C = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + \\ & + \sum_{i=1}^n Q_i(t) \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i), \end{aligned} \quad (11)$$

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = 0, \quad (12)$$

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial P}{\partial y}, \quad w = \frac{\partial P}{\partial z}, \quad (13)$$

де  $P$  – потенціал швидкості;

$C$  – концентрація забруднювача (NO);

$Q_i(t)$  – інтенсивність емісії забруднювача;

$u, v, w$  – проекції вектора швидкості повітряного потоку на вісі декартової системи координат, м/с;

$t$  – час, с;

$w_s$  – швидкість осідання забруднювача, м/с;

$\sigma$  – параметр, який враховує вимивання забруднювача, с<sup>-1</sup>;

$\mu = (\mu_x, \mu_y, \mu_z)$  – коефіцієнти турбулентної дифузії, м<sup>2</sup>/с;

$x_i, y_i, z_i$  – координати джерела емісії, м;

$\delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i)$  – дельта-функція Дірака, м<sup>-3</sup>.

Граничні умови для моделюючих рівнянь (11)–(13) такі:

1.  $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$  на непроникливих границях.
2.  $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$  на верхній поверхні.
3.  $\frac{\partial P}{\partial n} = V_n$  на межі, де потік втікає ( $V_n$  швидкість повітряного потоку).
4.  $P = \text{const}$  – на границі «виходу» потоку.
5. На границі входу потоку:  $C = 0$ .

6. На границі виходу потоку:  $\frac{\partial C}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = 0$ .

7. На поверхні  $z=0, z=L_z$  ( $L_z$  – верхня границя області):

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

де  $n$  – одиничний вектор зовнішньої нормалі до поверхні.

Для моменту часу  $t=0$  початкову умову записано так:  $C=0$ .

Для моделювання процесу поглинання «ТХ Active» поверхнею використовується на цій поверхні така гранична умова (для концентрації NO):

$$C=0. \tag{14}$$

Для визначення кількості забруднювача, що поглинає «ТХ Active» поверхня за час  $dt$ , використовується гранична умова (14) та закон Фіка. Закон Фіка для даного процесу записується так:

$$J = -\mu S \frac{\partial C}{\partial n} dt,$$

де  $J$  – потік маси забруднювача до поверхні, що потрапляє на поверхню;  $\mu$  – коефіцієнт дифузії;  $S$  – площа поверхні, крізь яку має місце дифузійний потік.

Гradient концентрації представлено так:

$$\frac{\partial C}{\partial n} = \frac{C_{i,j} - C_{surf}}{s_x},$$

де  $s_x=0,5 \cdot h_x$ ;  $h_x$  – крок різничевої сітки в напрямку вісі  $Ox$ ;  $C_{surf}$  – концентрація забруднювача на поглинаючій поверхні;  $C_{i,j}$  – концентрація забруднювача в різницевій комірці, що прилягає до поглинаючої поверхні.

Слід відзначити, що концентрація забруднювача розрахована в центрі різничевої комірці.

Таким чином, розраховано масу забруднювача, що «втєкла» з різничевої комірці за час  $dt$  на «ТХ Active» поверхню. Далі перераховано концентрацію забруднювача в різницевій комірці, що прилягає до поглинаючої поверхні. В розробленій чисельній моделі поглинаюча поверхня задана за допомогою маркерів.

Фундаментальні моделі механіки суцільного середовища допускають лише чисельне рішення в рамках розглянутих крайових задач. Тому необхідною є розробка чисельних моделей, що базуються на моделюючих рівняннях (4)–(13).

Чисельне інтегрування моделюючих рівнянь здійснюється на прямокутній різницевій сітці. Для чисельного інтегрування рівнянь масопереносу (4)–(6)

здійснюється фізичне розщеплення моделюючих рівнянь. Приклад такого розщеплення наведено лише для рівняння (4):

$$\frac{\partial C_{NO}}{\partial t} + \frac{\partial u C_{NO}}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C_{NO}}{\partial x} \right), \quad (15)$$

$$\frac{\partial C_{NO}}{\partial t} + \frac{\partial v C_{NO}}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C_{NO}}{\partial y} \right), \quad (16)$$

$$\frac{\partial C_{NO}}{\partial t} = \sum_{i=1}^n Q_{NOi}(t) \delta(x - x_{0i}) \delta(y - y_{0i}). \quad (17)$$

Для чисельного розв'язання рівнянь (15), (16) застосовується двокрокова схема розщеплення [19]. Для рівняння (15) ця схема має вигляд:

– на першому кроці використовується залежність:

$$C_{NOi,j}^{n+\frac{1}{2}} = C_{NOi,j}^n - \Delta t \frac{u_{i+1,j}^+ C_{NOi,j}^{n+\frac{1}{2}} - u_{i,j}^+ C_{NOi-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} + \Delta t \mu_x \frac{-C_{NOi,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_{NOi-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta x^2} + \Delta t \mu_x \frac{-C_{NOi,j}^n + C_{NOi+1,j}^n}{2\Delta x^2};$$

– на другому кроці використовується залежність:

$$C_{NOi,j}^{n+1} = C_{NOi,j}^{n+\frac{1}{2}} - \Delta t \frac{u_{i+1,j}^- C_{NOi+1,j}^{n+1} - u_{i,j}^- C_{NOi,j}^{n+1}}{\Delta x} + \Delta t \mu_x \frac{-C_{NOi,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_{NOi-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta x^2} + \Delta t \mu_x \frac{-C_{NOi,j}^{n+1} + C_{NOi+1,j}^{n+1}}{2\Delta x^2},$$

де

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

Аналогічна схема записується для рівняння (16). Для чисельного розв'язання рівняння (17) застосовується метод Ейлера [22]. Для чисельного інтегрування рівняння (10) використовується явна різницева схема [22].

Здійснено програмну реалізацію розробленої чисельної моделі та розроблено код «Barrier-2», мова програмування – FORTRAN.

Аналогічний підхід використано для чисельного інтегрування тривимірних рівнянь (11), (12). Здійснено програмну реалізацію розробленої тривимірної чисельної моделі та розроблено код «Barrier-TX», мова програмування – FORTRAN.

### 5.3. Проведення обчислювальних експериментів на базі побудованих CFD моделей

Нижче представлено результати рішення двох задач на базі побудованих CFD моделей. Перша задача – це моделювання забруднення повітря біля автотраси (рис. 1) на базі коду «Barrier-2». Розглядалося два сценарії: немає бар'єрів на насипу та є захисні бар'єри на насипу. Розрахунки виконувалися при наступних даних: швидкість повітряного потоку 5 м/с, середня інтенсивність емісії оксидів азоту  $Q_{NO_x}=4,8$  г/с. Приймалось, що частка  $NO_2$  становить 5 % від викиду  $NO_x$ , а  $NO$  – 95 %. Геометричні розміри області – 28 м по осі  $Ox$  і 14 м по осі  $Oy$ , яка спрямована вертикально вгору. Координатами джерела викиду  $NO$  і  $NO_2$  є координати місця розташування отвору вихлопної труби автомобіля.

На рис. 2, 3 показано поле концентрації  $NO$  для обох сценаріїв. Для зручності аналізу зони забруднення концентрація домішки показана у відсотках від максимального значення концентрації  $NO$  в розрахунковій області.

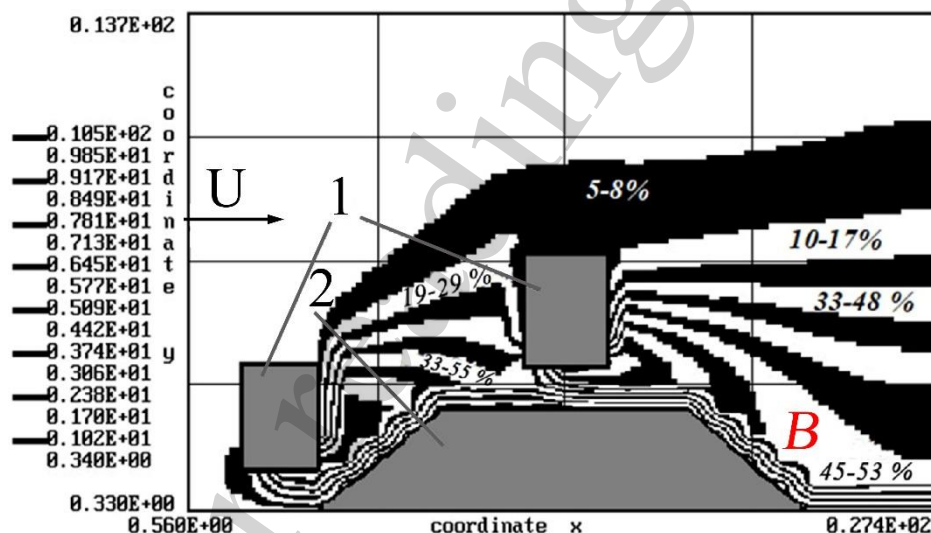


Рис. 2. Поле концентрації  $NO$  (немає захисних бар'єрів): 1 – автомобіль, 2 – насип

Проаналізувавши дані, що наведено на рис. 2, 3, видно, що біля автомобілів створюються підзони зі значним градієнтом концентрації домішки. Використання захисних бар'єрів дозволяє зменшити рівень забруднення за бар'єром на підвітряному боці насипу (зона «B» на рис. 2, 3). Але використання захисних бар'єрів приводить до збільшення зони забруднення по висоті.

На рис. 4 показано, як змінюється концентрація  $NO$  на підвітряному боці насипу для різних по висоті бар'єрів (зона «B» на рис. 3).

Аналіз даних, що наведено на рис. 4, показує, що при використанні бар'єру висотою 2,8 м концентрації домішки за бар'єром знаходиться в діапазоні  $0,16-0,115$  мг/м<sup>3</sup>. При використанні бар'єру висотою 5 м концентрація домішки за

бар'єром знаходиться в діапазоні  $0,12-0,09 \text{ мг/м}^3$ . Таким чином, збільшення висоти бар'єру на 80 % приводить до зниження концентрації на 22 %.

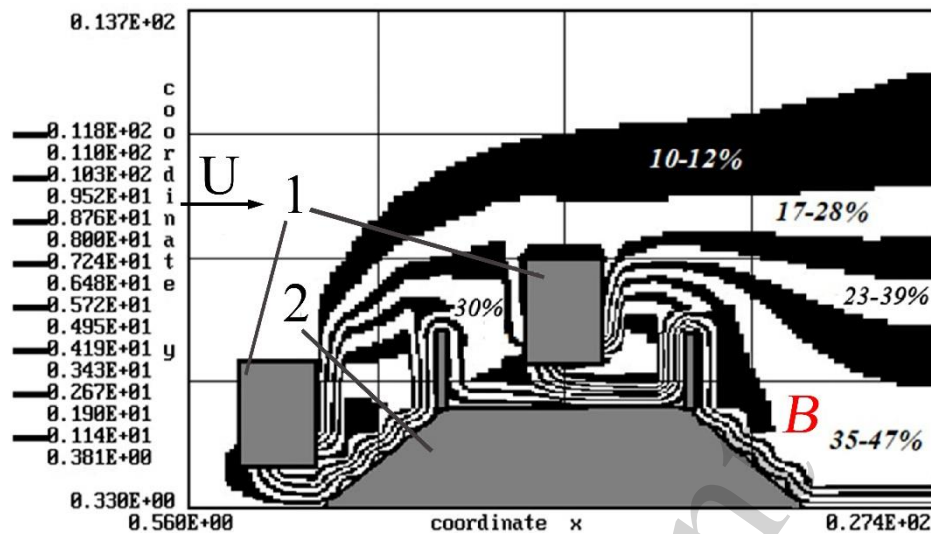


Рис. 3. Поле концентрації NO (висота захисних бар'єрів  $H=2,5 \text{ м}$ ): 1 – автомобіль, 2 – насип

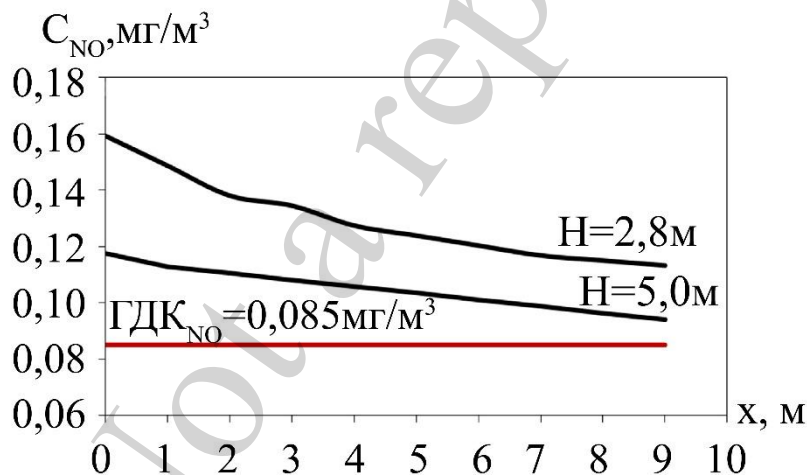


Рис. 4. Зміна концентрації NO на висоті 1,7 м вздовж вісі  $Ox$  в області  $B$  (за другим бар'єром)

Слід відзначити, що час розрахунку кожної задачі тривав 5с.

В подальшому в роботі розглянуто модельну задачу, коли біля дороги розташовується павільйон для торгівлі чи обслуговування. При відсутності бар'єру забруднене повітря проникає в павільйон, тим самим завдаючи шкоду системі дихання працівників та відвідувачів павільйону. На рис. 5 наочно представлено розподіл зон забруднення шкідливої домішки NO біля автотраси, в середині і поза павільйоном.

На рис. 6 показано розподіл зон забруднення шкідливої домішки NO як в межах автодороги, так і на прилеглий території, але при наявності бар'єру. Цей

бар'єр представляє собою перешкоду, яка гальмує та перерозподіляє потік. Як результат, зменшується концентрація за бар'єром, а саме всередині павільйону.

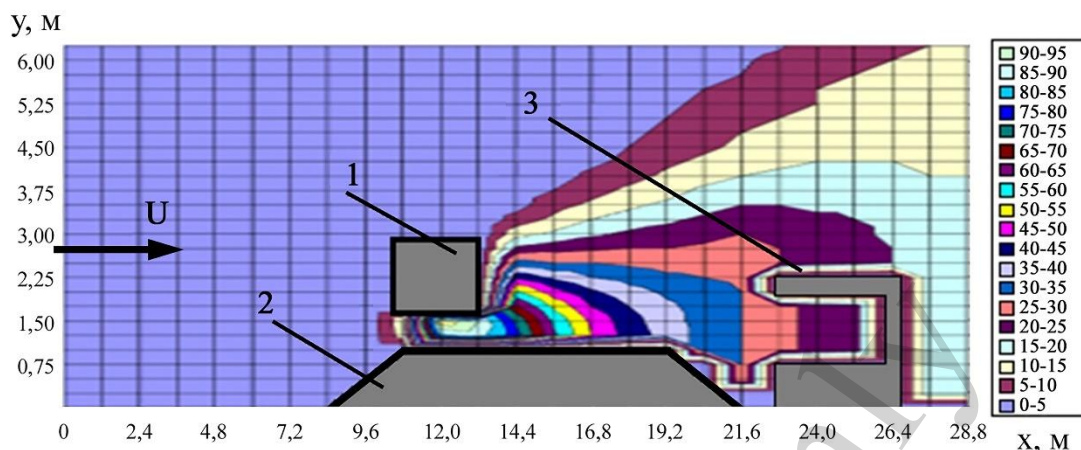


Рис. 5. Розподіл поля концентрації  $NO$  при відсутності бар'єру ( $H=1,5$  м): 1 – джерело емісії (автомобілі), 2 – насип, 3 – павільйон, ( $C_{NO}$  у відсотках від  $(C_{NO})_{max}=0,4128$  мг/м<sup>3</sup>)

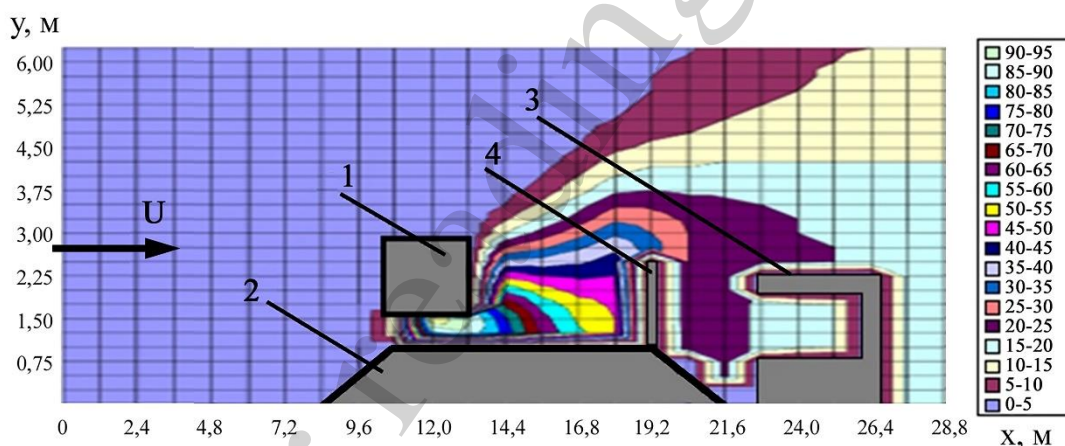


Рис. 6. Розподіл поля концентрації  $NO$  при наявності бар'єру ( $H=1,5$  м): 1 – джерело емісії (автомобілі), 2 – насип, 3 – павільйон, 4 – бар'єр ( $C_{NO}$  у відсотках від  $(C_{NO})_{max}=0,4194$  мг/м<sup>3</sup>)

Порівняльний аналіз розрахункових значень концентрації  $NO$  та гранично допустимої концентрації для  $NO$  показано на рис. 7. Чітко видно, що при наявності бар'єру значення концентрації всередині павільйону зменшується на 26 % і не перевищує  $ГДК_{NO}=0,085$  мг/м<sup>3</sup>.

Нижче представлено результати рішення задачі по визначенню ефективності використання захисного бар'єру з «ТХ Active» поверхнею. Моделювання проведено при наступних вихідних даних: розміри розрахункової області  $25 \times 25 \times 12$  м; інтенсивність емісії  $Q_{NO_x} = 1$  (в безрозмірному вигляді), з якої  $NO_2$

складає 5 % від викиду  $\text{NO}_x$ , а  $\text{NO}$  – 95 %; швидкість повітря 5,2 м/с. В перерізі  $x=11$  м,  $y=11$  м знаходиться автомобіль, висота бар'єру 3 м (рис. 8).

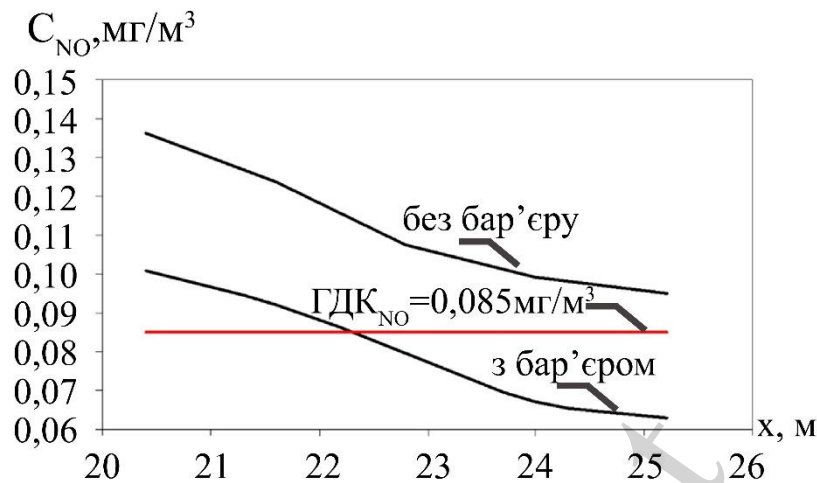


Рис. 7. Розподіл концентрації  $\text{NO}$  в павільйоні на рівні дихання людини ( $H=1,7$  м) в порівнянні з  $\text{ГДК}_{\text{NO}}=0,085 \text{ мг/м}^3$  з бар'єром та без бар'єру

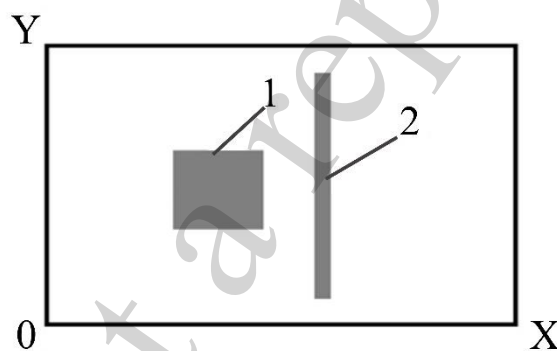


Рис. 8. Схема розрахункової області (переріз  $z=0,7$  м): 1 – автомобіль; 2 – бар'єру з «ТХ Active» поверхню

Нижче наведено розрахункову схему (переріз  $y=12$  м) для кожного сценарію дослідження ефективності використання вертикального бар'єру, що має «ТХ Active» поверхнею:

1. Сценарій #1 – вертикальний бар'єр має «ТХ Active» поверхню тільки на навітряному боці (рис. 9).

2. Сценарій #2 – вертикальний бар'єр має «ТХ Active» поверхню на навітряному боці та на підвітряному боці (рис. 10).

На рис. 11, 12 показано зони забруднення для кожного сценарію задачі. Область забруднення (розподіл концентрації  $\text{NO}$ , безрозмірне значення  $\cdot 10^2$ ) приведена на цих рисунках для перерізу  $y=12$  м.

На рис. 13 показано безрозмірне значення концентрації  $\text{NO}$  в робочій зоні за бар'єром на висоті 1,5 м та на різній довжині.



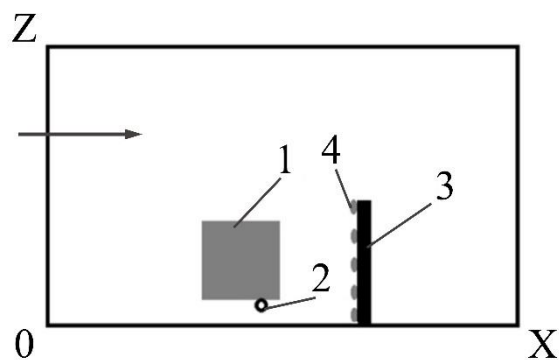


Рис. 9. Схема розрахункової області (сценарій #1): 1 – корпус автомобіля; 2 – місце емісії забруднювача; 3 – бар’єр; 4 – «TX Active» поверхня

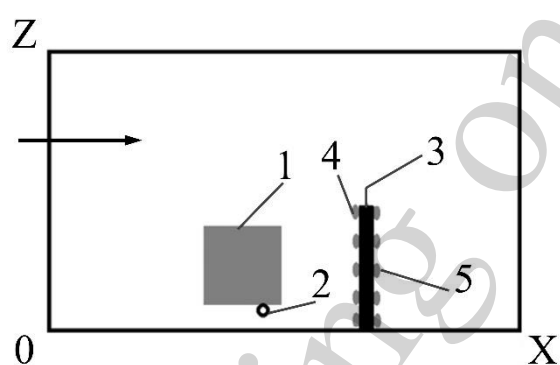


Рис. 10. Схема розрахункової області (сценарій #2): 1 – корпус автомобіля; 2 – місце емісії забруднювача; 3 – бар’єр; 4 – «TX Active» поверхня; 5 – «TX Active» поверхня

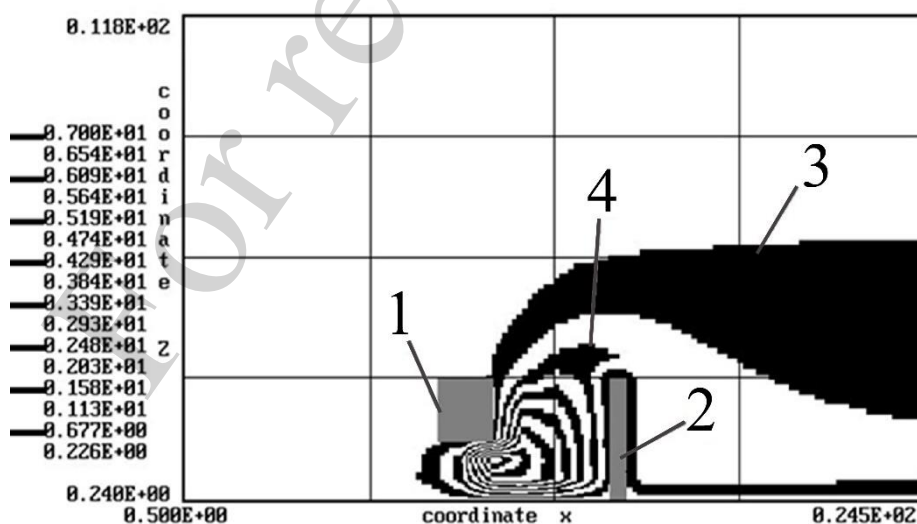


Рис. 11. Зона забруднення (сценарій #1): 1 – корпус автомобіля; 2 – бар’єр; 3 –  $C=0,67$ ; 4 –  $C=1,50$



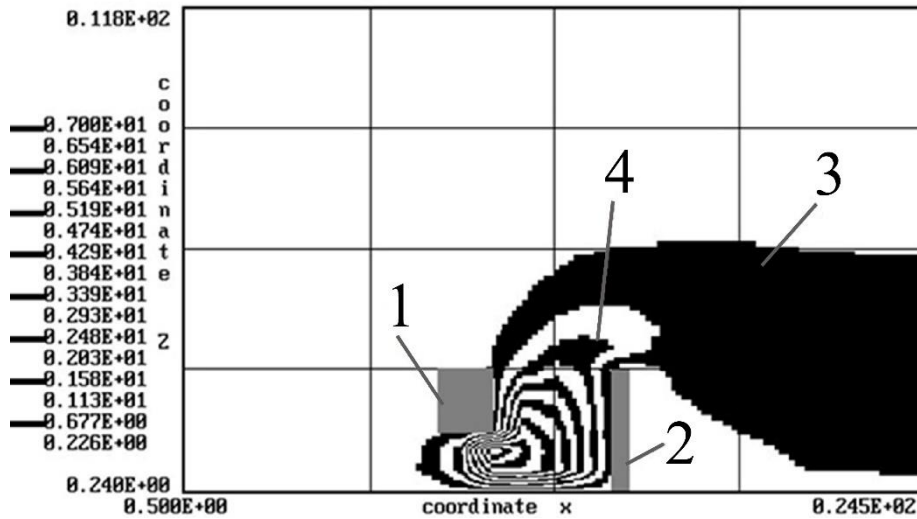


Рис. 12. Зона забруднення (сценарій #2): 1 – корпус автомобіля; 2 – бар’єр; 3 –  $C=0,67$ ; 4 –  $C=1,50$

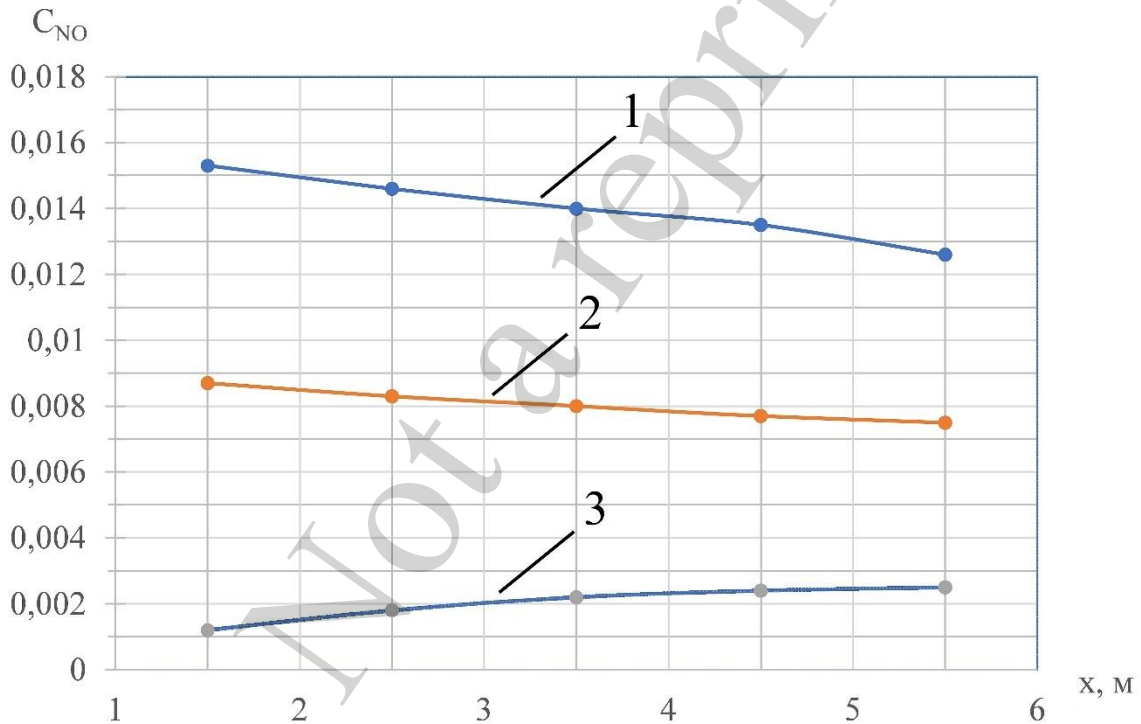


Рис. 13. Безрозмірне значення концентрації  $NO$  за бар’єром: 1 – базовий (бар’єр без «ТХ Active» поверхні); 2 – сценарій #1 («ТХ Active» поверхня лише з одного боку бар’єру); 3 – сценарій #2 («ТХ Active» поверхня з двох боків бар’єру)

Як видно з рис. 13, використання «ТХ Active» поверхні дає можливість суттєво зменшити концентрацію забруднювача в робочій зоні.

Слід відзначити, що для рішення кожної задачі потрібно багато комп’ютерного часу.

## 6. Обговорення результатів дослідження розробки методу оцінки ефективності використання захисних бар'єрів біля автотрас

Розроблена двовимірна CFD модель, що базується на рівняннях (4)–(10), дозволяє визначити поле забруднення повітря біля автотраси (рис. 2, 3, 5, 6) з урахуванням хімічної трансформації  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ , що містяться у викидах від автомобілю (рівняння (7)–(9)). Тобто стає можливим моделювати процес забруднення повітря з більшим наближенням до реальності. На базі розробленої CFD моделі проведено дослідження по визначенню ефективності використання захисних бар'єрів різної висоти, що розташовані в умовах складного рельєфу місцевості. Дослідження показали суттєвий вплив висоти бар'єру на зниження концентрації домішки біля автотраси. При збільшенні висоти бар'єру має місце більш інтенсивний розворот повітряного потоку від бар'єру вгору, внаслідок чого зменшується концентрація домішки на прилеглий до автотраси території. Встановлено, що збільшення висоти бар'єру на 80 % приводить до зниження концентрації домішки за бар'єром на 22 %. Виявлено, що використання бар'єру висотою 1,5 м приводить до зменшення концентрації домішки на 26 % у прилеглих до автотраси спорудах. Розроблений метод може бути використаний для наукового обґрунтування розмірів захисних бар'єрів та їх розташування біля автотраси для забезпечення необхідного рівня якості повітряного середовища в зонах інтересу.

Розроблена тривимірна CFD модель, що базується на рівняннях (11)–(12), дозволяє отримати прогнозну інформацію про ефективність використання бар'єрів з «TX Active» поверхнею (рис. 13). При цьому враховується місце розташування цієї поверхні на бар'єрі. Проведені дослідження показали, що використання бар'єру з однією «TX Active» поверхнею приводить до зниження концентрації  $\text{NO}$  за бар'єром в середньому на 43 %. При використанні бар'єру з двома «TX Active» поверхнями зниження концентрації  $\text{NO}$  за бар'єром складає в середньому 85 %. Таким чином, слід рекомендувати використання захисних бар'єрів, що мають двосторонню «TX Active» поверхню

Обчислювальні експерименти підтвердили можливість використання побудованих CFD моделей для аналізу зон забруднення біля автотраси з метою швидкого отримання прогнозної інформації, яка необхідна для оцінювання ефективності використання захисних бар'єрів біля автотраси (рис. 2, 3, 5, 6, 11, 12).

Особливістю запропонованого методу оцінювання ефективності бар'єрів, що базується на розроблених CFD моделях, є швидкість розрахунку на комп'ютері (час розрахунку – декілька секунд). Висока швидкість розрахунку стає можливою завдяки тому, що поле швидкості вітру в розроблених CFD моделях визначається на базі простих рівнянь (10), (12) – рівнянь динаміки «ідеальної» рідини. В існуючих методах розрахунку, наприклад [12–14], використовується більш складна модель аеродинаміки – рівняння в'язкої течії з додатковою моделлю турбулентності та час розрахунку складає декілько діб. При використанні моделі в'язкої течії потрібна дуже дрібна сітка для того, щоб при розрахунку схема в'язкості не перевищувала значення турбулентної в'язкості потоку.

До недоліків розроблених CFD моделей слід віднести те, що в моделі аеродинаміки повітряного потоку не враховується турбулентна в'язкість. Крім цього, при використанні моделей використовуються декілька емпіричних констант,

значення яких потребують уточнення в ряді випадків. Обмеженням запропонованого методу оцінювання ефективності захисних бар'єрів також є те, що його неможливо використовувати, коли матеріал бар'єру є пористим або проникливим для повітря (наприклад, бар'єр з соломи).

Подальший розвиток даного дослідження полягає в розробці чисельної моделі, що дозволить додатково визначити ефективність бар'єрів по зниженню шумового забруднення навколишнього середовища.

## **7. Висновки**

1. Розроблена двовимірна CFD модель для аналізу зон забруднення, що формуються біля автотраси, яка розташована в умовах складного рельєфу. Модель дозволяє при проведенні розрахунків враховувати вплив захисних бар'єрів, корпусів автомобілів, розташування різного роду споруд та інших фізичних параметрів на формування зон хімічного забруднення біля автотраси. Встановлено, що збільшення висоти бар'єру на 80 % приводить до зниження концентрації домішки за бар'єром на 22 %. Виявлено, що використання бар'єру висотою 1,5 м приводить до зменшення концентрації домішки на 26 % у прилеглих до автотраси спорудах.

2. Розроблена тривимірна CFD модель для аналізу зон забруднення, що формуються біля автотраси, що має захисні бар'єри з «TX Active» поверхнею. Модель дозволяє при визначенні ефективності цих бар'єрів враховувати комплекс важливих фізичних факторів, що впливають на формування зон забруднення біля автотраси.

3. Результати обчислювальних експериментів, що були отримані на базі розроблених CFD моделей, показують, що побудовані моделі мають широкий робочий діапазон, дозволяють швидко отримати прогностичні дані. Ці дані можуть бути корисними при оцінюванні ефективності використання захисних бар'єрів біля автотрас. Проведені дослідження показали, що використання бар'єру з однією «TX Active» поверхнею приводить до зниження концентрації NO за бар'єром в середньому на 43 %. При використанні бар'єру з двома «TX Active» поверхнями зниження концентрації NO за бар'єром складає в середньому 85 %. Таким чином, слід рекомендувати використання захисних бар'єрів, що мають двосторонню «TX Active» поверхню.

## **Література**

1. Желновач, Г. М. (2017). Вплив автотранспортних підприємств на якість атмосферного повітря урбанізованих територій. Вестник Харьковського національного автомобільно-дорожного університета, 77, 75–80. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/vhad\\_2017\\_77\\_15](http://nbuv.gov.ua/UJRN/vhad_2017_77_15)
2. Беляев, Н. Н., Русакова, Т. И., Колесник, В. Е., Павличенко, А. В. (2016). Прогноз уровня загрязнения атмосферного воздуха в зоне влияния городских автомагистралей. Научный вестник Национального горничного университета, 1, 90–97. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvngu\\_2016\\_1\\_16](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvngu_2016_1_16)

3. Черниченко, І. О., Першегуба, Я. В., Литвиненко, О. М., Швагер, О. В. (2010). Особливості формування канцерогенного ризику для населення, що проживає в зоні впливу автомагістралі. *Гігієна населених місць*, 56, 159–167.
4. Düring, I., Bächlin, W., Ketzler, M., Baum, A., Friedrich, U., Wurzler, S. (2011). A new simplified NO/NO<sub>2</sub> conversion model under consideration of direct NO<sub>2</sub>-emissions. *Meteorologische Zeitschrift*, 20(1), 67–73. doi: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2011/0491>
5. 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>
6. Brodin, N. (2010). Product Development of Curved Noise & NO<sub>x</sub> Barrier. Stockholm, 51. URL: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:444437/FULLTEXT01.pdf>
7. Brantley, H. L., Hagler, G. S. W., J. Deshmukh, P., Baldauf, R. W. (2014). Field assessment of the effects of roadside vegetation on near-road black carbon and particulate matter. *Science of The Total Environment*, 468-469, 120–129. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.08.001>
8. Heist, D., Isakov, V., Perry, S., Snyder, M., Venkatram, A., Hood, C. et al. (2013). Estimating near-road pollutant dispersion: A model inter-comparison. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 25, 93–105. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2013.09.003>
9. Mao, Y., Wilson, J. D., Kort, J. (2013). Effects of a shelterbelt on road dust dispersion. *Atmospheric Environment*, 79, 590–598. doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.07.015>
10. Biliaiev, M., Pshinko, O., Rusakova, T., Biliaieva, V., Śladkowski, A. (2020). Application of local exhaust systems to reduce pollution concentration near the road. *Transport Problems*, 15 (4), 137–148. doi: <https://doi.org/10.21307/tp-2020-055>
11. Biliaiev, M., Pshinko, O., Rusakova, T., Biliaieva, V., Śladkowski, A. (2021). Computing model for simulation of the pollution dispersion near the road with solid barriers. *Transport Problems*, 16 (2), 73–86. doi: <https://doi.org/10.21307/tp-2021-024>
12. Madalozzo, D. M. S., Braun, A. L., Awruch, A. M. (2012). A numerical model for pollutant dispersion simulation in street canyons. *Mecanica Computacional*, XXXI, 211–235. URL: <https://cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/download/4062/3988>
13. Jeong, S. J. (2014). Effect of Double Noise-Barrier on Air Pollution Dispersion around Road, Using CFD. *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 8 (2), 81–88. doi: <https://doi.org/10.5572/ajae.2014.8.2.081>
14. Jeong, S. J. (2015). A CFD Study of Roadside Barrier Impact on the Dispersion of Road Air Pollution. *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 9 (1), 22–30. doi: <https://doi.org/10.5572/ajae.2015.9.1.022>
15. Kumar, P., Zavala-Reyes, J. C., Tomson, M., Kalaiarasan, G. (2022). Understanding the effects of roadside hedges on the horizontal and vertical distribu-

tions of air pollutants in street canyons. *Environment International*, 158, 106883. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106883>

16. Horgnies, M., Dubois-Brugger, I., Gartner, E. M. (2012). NO<sub>x</sub> depollution by hardened concrete and the influence of activated charcoal additions. *Cement and Concrete Research*, 42(10), 1348–1355. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.06.007>

17. Cackler, T., Alleman, J., Kevern J., Sikkema J. (2012). Technology Demonstrations Project: Environmental Impact Benefits with “TX Active” Concrete Pavement in Missouri DOT Two-Lift Highway Construction Demonstration. National Concrete Pavement Technology Center. Iowa State University. URL: [https://intrans.iastate.edu/app/uploads/2018/03/TX\\_Active\\_for\\_FHWA\\_w\\_cvr.pdf](https://intrans.iastate.edu/app/uploads/2018/03/TX_Active_for_FHWA_w_cvr.pdf)

18. Pulvirenti, B., Baldazzi, S., Barbano, F., Brattich, E., Di Sabatino, S. (2020). Numerical simulation of air pollution mitigation by means of photocatalytic coatings in real-world street canyons. *Building and Environment*, 186, 107348. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107348>

19. Згуровский, М. З., Скопецкий, В. В., Хрущ, В. К., Беляев, Н. Н. (1997). Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде. Київ: Наукова думка, 368.

20. Merah, A., Nouredine, A. (2017). Modeling and Analysis of NO<sub>x</sub> and O<sub>3</sub> in a Street Canyon. *Der Pharma Chemica*, 9 (19), 66–72. URL: <https://www.derpharmachemica.com/pharma-chemica/modeling-and-analysis-of-nox-and-o3-in-a-street-canyon.pdf>

21. Марчук, Г. И. (1982). Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. Москва. 320: Наука. URL: <https://www.twirpx.com/file/392343/>

22. Самарский, А. А. (1983). Теория разностных схем. Москва: Наука, 657. URL: <https://www.twirpx.com/file/2232663>