

УДК 504.5:629.33

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.251022.14.886

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ВСМОКТУВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ЗНИЖЕННЯ РІВНЯ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ В РОБОЧИХ ЗОНАХ

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

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

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

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

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

⁵ Кафедра безпеки життєдіяльності, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Гагаріна, 72, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (093) 725-16-82, e-mail: ztkelena@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2482-7574

Анотація. *Постановка проблеми.* Розглядається задача оцінювання ефективності використання всмоктувальної системи, що розташована біля автотраси та дозволяє зменшити рівень хімічного забруднення повітря в робочих зонах. Ця система змінює аеродинаміку повітряного потоку та створює динамічну перепону на шляху забрудненого повітря, що рухається в робочі зони. На етапі проектування систем захисту повітря від забруднення в робочих зонах потрібно мати розрахункові методи, що дозволяють визначити ефективність її для конкретних умов експлуатації. *Мета дослідження* – розроблення математичних моделей та програмного забезпечення для проведення обчислювального експерименту з визначення ефективності використання всмоктувальної системи, розташованої біля автотраси. *Методика.* Для математичного моделювання поширення забруднювальних речовин у робочих зонах біля автотраси та з використанням всмоктувальної системи захисту застосовується аеродинамічна модель потенціального руху та рівняння конвективно-дифузійного переносу домішки в повітрі. Запропонована математична модель дає можливість урахувати швидкість вітру, турбулентну дифузію, інтенсивність викиду домішки від авто, режим роботи всмоктувальної системи, присутність екрану на цій системі. Для розв'язання задачі аеродинаміки використовуються дві скінченнорізницевої схеми, що дозволяють визначити потенціал швидкості за явною формулою. Для чисельного інтегрування рівняння конвективно-дифузійного переносу домішки застосовується метод розщеплення. Розроблено комп'ютерну програму для проведення обчислювального експерименту на базі побудованих чисельних моделей. *Наукова новизна.* Розроблено чисельні моделі для розв'язання задач аеродинаміки та масопереносу стосовно проблеми оцінювання ефективності використання спеціальної всмоктувальної системи, що дозволяє зменшити рівень забруднення повітря в робочих зонах біля автотраси. *Практична значимість.* На базі розробленої моделі створено код, що дозволяє оперативно розраховувати процес забруднення повітря як біля автошляху, так і в робочих зонах, для захисту яких використовуються всмоктувальні системи. *Висновки.* Побудовані чисельні моделі дають змогу швидко оцінювати ефективність використання спеціальної всмоктувальної системи, що встановлюється біля автотраси. Моделі враховують найбільш суттєві фізичні фактори, які впливають на формування областей забруднення біля автотраси. Практичне застосування моделей не потребує потужних комп'ютерів. Наведено результати обчислювального експерименту.

Ключові слова: забруднення повітря; всмоктувальна система; чисельне моделювання; викид від автотранспорту; робоча зона

ANALYSIS OF THE SUCTION SYSTEM EFFICIENCY FOR REDUCING THE LEVEL OF AIR POLLUTION IN WORKING AREAS

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

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

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

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

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

⁵ Department of Life Safety, Oles Honchar Dnipro National University, 72, Haharina Ave., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (093) 725-16-82, e-mail: zltklena@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2482-7574

Abstract. Problem statement. The task of efficiency assessment for suction system located near the highway and allows reducing chemical air pollution level in work areas is considered. This system changes the air flow aerodynamics and creates a dynamic barrier in the path of polluted air moving into the working areas. At the stage of designing systems for protecting air from pollution in working areas, it is necessary to have calculation methods that allow determining its efficiency for specific operating conditions. **The purpose of the article.** Development of mathematical models and software for conducting a computational experiment to determine the efficiency of using the suction system located near the highway. **Methodology.** An aerodynamic model of potential movement and the equation of impurities convective-diffusion transfer in the air are used for mathematical modeling of the pollutants spread of in work areas near the highway during using a suction protection system. The proposed mathematical model makes it possible to take into account wind velocity, turbulent diffusion, the intensity of impurities' emission from cars, the operation mode of the suction system, the presence of screen on this system. Two finite-difference schemes are used to solve the aerodynamics problem, allowing determining the velocity potential by an explicit formula. The splitting method for the numerical integration of the impurities convective-diffusion transfer equation is used. A computer program for conducting a computational experiment based on the constructed numerical models is developed. **Scientific novelty.** Numerical models are developed for solving problems of aerodynamics and mass transfer in relation to the task of efficiency assessment of the special suction system using, which allows reducing the level of air pollution in work areas near the highway. **Practical value.** Based on the developed model, a code is created that allows the rapid calculation of the air pollution process, both near the highway and in the working areas where suction systems for protection is used. **Conclusions.** Created numerical models allow rapid assessment of using a special suction system installed near the highway. The models take into account the most significant physical factors affecting the pollution areas formation near the highway. Practical application of models does not require the use of powerful computers. The results of the computational experiment are presented.

Keywords: *air pollution; suction system; numerical modeling; emission from motor vehicles; working area*

Постановка проблеми. Зниження рівня забруднення в робочих зонах біля автотрас привертає до себе багато уваги останнім часом. Це пов'язано з тим, що викиди від автотранспорту містять значну кількість шкідливих речовин та безпосередньо впливають на здоров'я людей [1]. Тому в світі розробляються та удосконалюються системи, що дозволяють зменшити рівень хімічного забруднення повітря в робочих

зонах. Найбільш активно використовуються системи, що дозволяють за рахунок зміни аеродинаміки повітряного потоку зменшити кількість забруднювальних речовин, що поширюються в робочих зонах біля автотрас (екрани, бар'єри, які мають складну геометричну форму, щільна рослинність) [6–11]. Одним із методів зменшення концентрації домішки в робочих зонах біля автотрас стало використання

всмоктувальних систем [5; 11]. Такі системи дозволяють локально зменшити рівень хімічного забруднення біля автотраси.

У цій статті розглядається удосконалення всмоктувальної системи [5] за допомогою встановлення на ній додаткового екрана. Цей екран дозволяє зменшити рівень забруднення повітря біля автотраси.

Мета статті – розроблення математичних моделей для оцінювання ефективності використання спеціальної всмоктувальної системи, що встановлюється біля автотраси з метою зменшення рівня забруднення повітря в робочих зонах.

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

Для дослідження ефективності використання всмоктувальної системи потрібно послідовно розв'язати наступні дві задачі:

1) розрахувати поле швидкості повітряного потоку біля всмоктувальної системи;

2) розрахувати поле концентрації домішки біля всмоктувальної системи.

Для розв'язання першої (задача аеродинаміки) використовується таке рівняння для потенціалу швидкості [2]:

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

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

Граничні умови для рівняння (1) розглянуті в [2; 3].

Розрахунок компонент поля швидкості повітряного потоку здійснюється на базі таких залежностей:

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

Для розв'язання рівняння для потенціалу швидкості використовуються дві чисельні моделі. Перша має вигляд [4]:

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

На базі цієї залежності явно розраховується потенціал швидкості в розрахунковій області.

Друга чисельна модель базується на розщепленні моделювального рівняння на два кроки [4]:

– перший крок розщеплення:

$$\frac{P_{i,j}^{n+1/2} - P_{i,j}^n}{0,5\Delta t} = \frac{P_{i+1,j}^n - P_{i,j}^n}{\Delta x^2} + \frac{-P_{i,j}^{n+1/2} + P_{i-1,j}^{n+1/2}}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j+1}^n - P_{i,j}^n}{\Delta y^2} + \frac{-P_{i,j}^{n+1/2} + P_{i,j-1}^{n+1/2}}{\Delta y^2};$$

– другий крок розщеплення:

$$\frac{P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1/2}}{0,5\Delta t} = \frac{P_{i+1,j}^{n+1/2} - P_{i,j}^{n+1/2}}{\Delta x^2} + \frac{-P_{i,j}^{n+1/2} + P_{i-1,j}^{n+1/2}}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j+1}^{n+1/2} - P_{i,j}^{n+1/2}}{\Delta y^2} + \frac{-P_{i,j}^{n+1/2} + P_{i,j-1}^{n+1/2}}{\Delta y^2}.$$

На кожному кроці розщеплення потенціал швидкості знаходиться за явною формулою. Розрахунок значення потенціалу швидкості здійснюється в коді послідовно, за кожною чисельною моделлю для контролю стійкості розрахунку.

Компоненти вектора швидкості повітряного потоку в розрахунковій області визначаються так:

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

Здійснено побудову комп'ютерної моделі аеродинаміки на базі розглянутих різницевих схем для розрахунку поля швидкості повітряного потоку з використанням вентилятора, що має два всмоктувальних вікна та додатковий екран Т-подібної форми. Комп'ютерна модель враховує:

1) вплив корпусу авто на формування поля швидкості повітряного потоку біля всмоктувальної установки;

2) розташування на всмоктувальному пристрої додаткового екрана Т-подібної форми, що використовується для локальної зміни напрямку повітряного потоку біля вентиляційного пристрою (потрібно підкреслити, що наявність такого екрана різко змінює кривизну ліній потоку, внаслідок чого ряд різницевих схем втрачають стійкість і проводити моделювання неможливо);

3) нерівномірний профіль швидкості повітряного потоку на вході в розрахункову область (модель Швець – Юдіна) [3]:

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

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

Для моделювання процесу поширення домішки в робочих зонах під час роботи всмоктувальної системи використовується таке рівняння конвективно-дифузійного переносу домішки [2; 3; 5]:

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

де C – концентрація домішки, u, v – компоненти вектора швидкості; $\mu = (\mu_x, \mu_y)$ – коефіцієнти турбулентної дифузії; Q_{Si} – інтенсивність емісії $[CO]$ від авто; $\delta(x-x_i)(y-y_i)$ – дельта-функція Дірака; (x_i, y_i) – координати розташування джерела емісії; t – час.

Для побудови різницевої схеми з метою розв’язання рівняння (2) виконується таке його розщеплення:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = 0,$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right),$$

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

Перше рівняння з цієї системи – це рівняння конвективного переносу, друге – рівняння дифузії, третє – рівняння, що показує зміну концентрації домішки внаслідок дії джерела емісії.

Схема розщеплення для рівняння конвективного переносу записується так [2]:

– 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 визначається за формулою «рахунку, що біжить».

Для чисельного інтегрування рівняння дифузії використовується схема розщеплення. Ця двоетапна різницева схема розщеплення має вигляд [4]:

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

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

На базі розробленої чисельної моделі створено код, мова програмування – FORTRAN.

До складу коду входять:

– VT.DAT – файл початкових даних (інформація щодо розмірів розрахункової області, форми всмоктувального пристрою, форма екрана, швидкість повітряного потоку тощо);

– VN1 – підпрограма типу «SUBROUTINE» для розрахунку поля потенціалу швидкості на базі першої чисельної моделі;

– VN2 – підпрограма типу «SUBROUTINE» для розрахунку поля потенціалу швидкості на базі другої чисельної моделі;

– VT3 – підпрограма типу «SUBROUTINE» для розрахунку поля швидкості повітряного потоку;

– VTT3 – підпрограма типу «SUBROUTINE» для розрахунку концентрації домішки в області дослідження.

Результати. Нижче на рисунках показано розв’язання задачі з визначення ефективності використання захисної системи «всмоктувач + Т-подібний екран».

На рисунку 1 показано схему розрахункової області. Всмоктувальна система має два віконця, крізь які в систему потрапляє забруднене повітря. На даху системи розташований екран, що додатково змінює аеродинаміку потоку.

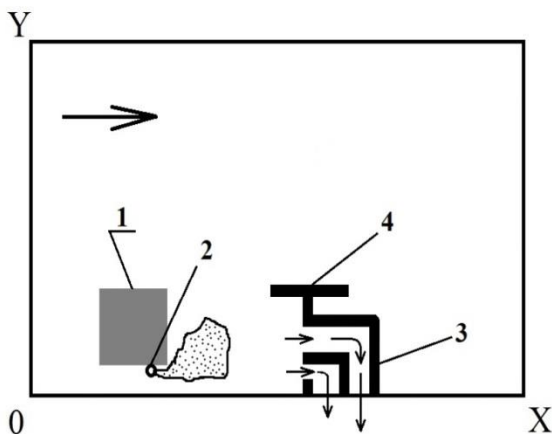


Рис. 1. Розрахункова схема: 1 – корпус авто; 2 – місце викиду хімічно небезпечної речовини; 3 – всмоктувальна система; 4 – Т-подібний екран

Розрахунок здійснювався за таких параметрів: $u_1 = 2$ м/с, $z_1 = 1$ м, $z_0 = 0,2$ см, швидкість повітря у всмоктувальних

отворах 5 м/с, висота кожного отвору 0,3 м, висота Т-подібного екрана 0,6 м, довжина горизонтальної частини екрана 0,6 м; інтенсивність емісії CO 1 г/с. Розміри розрахункової області $7,5 \times 6$ м.

На рисунку 2 показано поле концентрації CO в розрахунковій області. Значення концентрації показано у відсотках від максимального значення $C_{max} = 0,15$ г/м³ (на рис. 2 цій точці відповідає маркер «99»). Друк чисел здійснено у форматі «INTEGER», тобто без друку дробної частини числа.

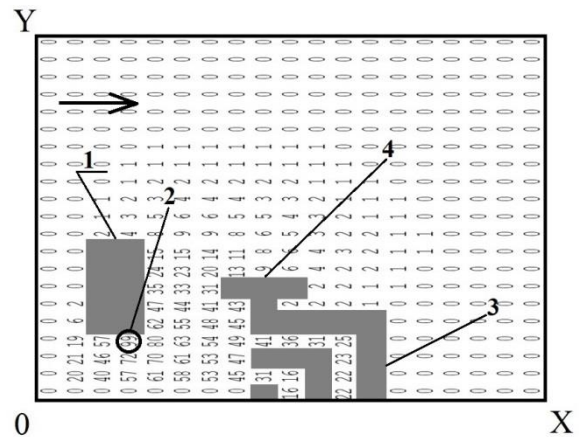


Рис. 2. Поле концентрації CO ($C_{max} = 0,15$ г/м³): 1 – корпус авто; 2 – місце викиду хімічно небезпечної речовини; 3 – всмоктувальна система; 4 – Т-подібний екран

Як можна бачити з рисунка 2, основна область забруднення формується перед всмоктувальною системою, а наявність екрана на цій системі не дає можливості забруднювачу інтенсивно рухатися в робочу зону.

Далі, на рисунку 3 показано розподіл концентрації CO в робочій зоні, за всмоктувальною системою на висоті $y = 1,7$ м. Точці « $x = 0$ » відповідає положення всмоктувальної системи.

На цьому рисунку значення концентрації наведено для трьох сценаріїв:

1) всмоктувальна система відсутня, тобто є лише авто, що викидає відому кількість домішки в повітря;

2) працює всмоктувальна система, але Т-подібний екран відсутній;

3) працює всмоктувальна система сумісно з Т-подібним екраном.

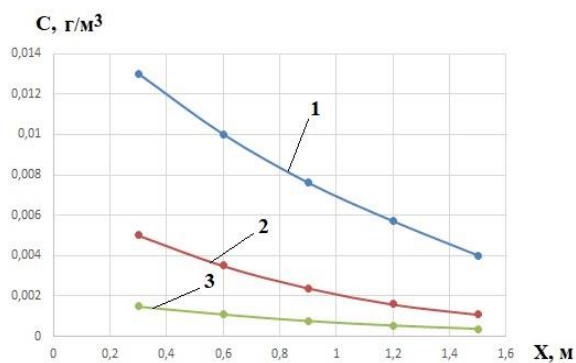


Рис. 3. Концентрація CO за всмоктувальною системою: 1 – всмоктувальна система відсутня; 2 – працює всмоктувальна система, але Т-подібний екран відсутній; 3 – працює всмоктувальна система сумісно з Т-подібним екраном

Як можна бачити з рисунку 3, використання всмоктувальної системи сумісно з Т-подібним екраном дозволяє суттєво зменшити рівень забруднення повітря в робочій зоні. Так, порівняно з першим сценарієм, тобто за відсутності взагалі системи захисту, на довжині 0,3 м, концентрація зменшилася за наявності екрана практично у 8 разів, а порівняно з другим сценарієм – майже утричі. Також можна бачити таку закономірність: характер зміни концентрації у разі використання екрана – більш «повільна» та «плавна».

Здійснено обробку даних обчислювального експерименту та отримано наступну математичну модель для оперативного розрахунку концентрації домішки в робочій зоні, якщо працює всмоктувальна система сумісно з Т-подібним екраном. Побудована модель має вигляд:

$$C = 0,0004x^2 - 0,0017x + 0,002,$$

де x – довжина від всмоктувального пристрою.

Для практичного застосування цієї моделі не потрібен персональний комп'ютер, що дозволяє широко використовувати її у проведенні «пілотних»

розрахунків на етапі ескізного проектування.

Зазначимо, що час розрахунку складає 5 секунд.

Наукова новизна та практична цінність. Запропоновано математичні моделі для розрахунку аеродинаміки повітряного потоку та масопереносу домішки в робочих зонах, розташованих біля автотраси. Моделі дають можливість визначати рівень забруднення повітря в робочих зонах під час роботи спеціальної всмоктувальної системи. Розроблені моделі враховують найбільш суттєві параметри, що впливають на формування областей забруднення в робочих зонах (профіль швидкості вітру, корпус авто, турбулентну дифузію, інтенсивність викиду домішки).

Розроблено комп'ютерну програму, що презентує результати обчислювального експерименту у вигляді, зручному для швидкого аналізу ефективності використання всмоктувальної системи, що працює на зменшення кількості домішки в робочій зоні.

Висновки.

1. Розроблено чисельні моделі для оперативного розрахунку областей хімічного забруднення повітря в робочих зонах біля автотраси з урахуванням роботи спеціальної всмоктувальної системи.

2. Результати розрахунку, отримані на базі розроблених чисельних моделей, показали, що запропонована система всмоктування, яка містить додатковий елемент у вигляді Т-подібного екрана, дозволяє зменшити рівень хімічного забруднення повітря в робочих зонах.

3. Запропонована емпірична модель для швидкого розрахунку рівня хімічного забруднення повітря в робочих зонах із використанням системи захисту «всмоктувач + Т-подібний екран».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Черниченко І. О., Першегуба Я. В., Литвиненко О. М., Швагер О. В. Особливості формування канцерогенного ризику для населення, що проживає в зоні впливу автомагістралі. *Збірник наукових праць*. 2010. Вип. 56. С. 159–167.

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

3. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. Москва : Наука, 1982. 320 с.
4. Самарский А. А. Теория разностных схем. Москва : Наука, 1983. 616 с.
5. Biliaiev M., Pshinko O., Rusakova T., Biliaieva V., Sladkowski A. Application of Local Exhaust Systems to Reduce Pollution Concentration near the Road. *Transport Problems*. Vol. 15, iss. 4, part 1. 2020. Pp. 137–148. DOI: 10.21307/tp-2020-055.
6. Brolin N. Development of Curved Noise and NO_x Barrier. Digitala Vetenskapliga Arkivet. 2010. URL: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:444437/FULLTEXT01.pdf>.
7. Brantley, Halley L., Hagler, Gayle S. W., Deshmukh, Parikshit J., Baldauf, Richard W. Field Assessment of the effects of Roadside Vegetation on Near Road Black Carbon and Particulate Matter. *Science of The Total Environment*. 2014. Pp. 468–469. URL: <https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=&httpsredir=1&article=1240&context=usepapers>.
8. Hagler G. S. W. Model evaluation of roadside barrier impact on near-road air pollution. *Atmospheric Environment*. 2011. Vol. 45 (15). Pp. 2522–2530. URL: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.02.030>.
9. Heist D. et al. Estimating near-road pollutant dispersion: A model inter-comparison. *Transportation Research. Part D: Transport and Environment*. 2013. Vol. 25. Pp. 93–105. URL: https://cfpub.epa.gov/si/si_public_file_download.cfm?p_download_id=516154&Lab=NERL.
10. Jeong S. J. Effect of Double Noise-Barrier on Air Pollution Dispersion around Road, Using CFD. *Asian Journal of Atmospheric Environment*. 2013. Vol. 8 (2). Pp. 81–88. URL: <http://koreascience.or.kr/article/JAKO201420947475958.pdf>.
11. 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. Chernychenko I.O., Pershehuba Ya.V., Lytvynenko O.M. and Shvaher O.V. *Osoblyvosti formuvannia kantserohennoho ryzyku dlia naseleння, shcho prozhyvaie v zoni vplyvu avtomahistrali* [Features of carcinogenic risk formation for the population living in the zone of influence of the highway]. *Zbirnyk naukovykh prats'* [Collection of Scientific Works]. 2010, vol. 56, pp. 159–167. (in Ukrainian).
2. Zgurovskiy M.Z., Skopetskiy V.V., Khrushch V.K and Belyaev N.N. *Chislennoye modelirovaniye rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede* [Numerical modeling of pollution spreading in the environment]. Kyiv : Naukova Dumka Publ., 1997, 368 p. (in Russian).
3. Marchuk G.I. *Matematicheskoye modelirovaniye v probleme okruzhayushchey srede* [Mathematical modeling in the environmental problem]. Moscow : Nauka Publ., 1982, 320 p. (in Russian).
4. Samarskiy A.A. *Teoriya raznostnykh skhem* [The theory of difference schemes]. Moscow : Nauka Publ., 1983, 616 p. (in Russian).
5. Biliaiev M., Pshinko O., Rusakova T., Biliaieva V. and Sladkowski A. Application of Local Exhaust Systems to Reduce Pollution Concentration near the Road. *Transport Problems*. 2020, vol. 15, iss. 4, part 1, pp. 137–148. DOI: 10.21307/tp-2020-055.
6. Brolin N. Development of Curved Noise and NO_x Barrier. Digitala Vetenskapliga Arkivet. 2010. URL: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:444437/FULLTEXT01.pdf>
7. Brantley, Halley L., Hagler, Gayle S.W., Deshmukh, Parikshit J. and Baldauf Richard W. Field Assessment of the effects of Roadside Vegetation on Near Road Black Carbon and Particulate Matter. *Science of The Total Environment*, 2014, pp. 468–469. URL: <https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=&httpsredir=1&article=1240&context=usepapers>.
8. Hagler G.S.W. Model evaluation of roadside barrier impact on near-road air pollution. *Atmospheric Environment*. 2011, vol. 45 (15), pp. 2522–2530. URL: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.02.030>.
9. Heist D. et al. Estimating near-road pollutant dispersion: A model inter-comparison. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2013, vol. 25, pp. 93–105. URL: https://cfpub.epa.gov/si/si_public_file_download.cfm?p_download_id=516154&Lab=NERL
10. Jeong S.J. Effect of Double Noise-Barrier on Air Pollution Dispersion around Road, Using CFD. *Asian Journal of Atmospheric Environment*. 2013, vol. 8 (2), pp. 81–88. URL: <http://koreascience.or.kr/article/JAKO201420947475958.pdf>
11. 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

Надійшла до редакції: 03.09.2022.