

уравнений переноса використовувалась неявна різностна схема. Різностна схема побудована для розщеплення рівнянь переноса. Розщеплення рівняння переноса на два рівняння виконується на диференціальному рівні. Перше рівняння розщеплення враховує рух осадинок або субстрату по траєкторіям. Друге рівняння розщеплення враховує дифузійний процес субстрату або осадинок. Для розв'язання рівнянь розщеплення використовувалась неявна різностна схема. Для чисельного інтегрування рівняння потенціального потоку використовувалась неявна схема умовної апроксимації. Розроблена математична модель дозволяє зменшити частку фізичного експерименту при розробці та реконструкції аэротенків.

Результати досліджень. Розроблена математична модель, яка включає в себе систему рівнянь, що описують транспорт забруднювача, активного іла, кисню, розчиненого кисню в аэротенку та процеси біологічної очистки стічних вод. Модель може використовуватися для отримання вихідних параметрів аэротенку при різних режимах його роботи.

Наукова новизна. Представлено систему диференціальних рівнянь для моделювання процесів транспорту та біологічної очистки стічних вод в аэротенку. Модель враховує основні гідродинамічні та біологічні процеси, що відбуваються в аэротенку. Модель може бути використана для оцінки ефективності роботи аэротенку.

Практичне значення. Представлено ефективну математичну модель, що належить до класу «діагностичні моделі» для швидкого розрахунку процесу біологічної очистки стічних вод в аэротенку.

Ключові слова: біологічна очистка, математичне моделювання, аэротенк

УДК 622.457:519.6

© М.М. Біляєв, Т.І. Русакова

ПРОГНОЗ ЛОКАЛЬНИХ ЗОН ЗАБРУДНЕННЯ БІЛЯ АВТОМАГІСТРАЛІ З УРАХУВАННЯМ РОСЛИННОСТІ

© М. Biliaiev, T. Rusakova

FORECASTING OF LOCAL POLLUTION ZONES NEAR THE MOTORWAY TAKING INTO ACCOUNT THE VEGETATION

Мета дослідження. Розробка чисельної моделі для прогнозу локальних зон забруднення біля автомагістралі з урахуванням рослинності.

Методика. Метод чисельного розрахунку концентрації забруднювача в атмосферному повітрі ґрунтується на вирішенні двовимірного рівняння масопереносу забруднення, що безпосередньо надходить від автомагістралі. Методика враховує процес сорбції рослинністю, що росте вздовж автомагістралі, а також наявність бар'єру (загорожі) попереду рослинності. Чисельна модель ґрунтується на розв'язанні рівнянь за допомогою неявних різницевих схем.

Результати. Налаштовано комп'ютерну програму для оцінки поля концентрації домішки в атмосферному повітрі внаслідок емісії забруднення, що потрапляє від автомагістралі. Ця розробка включає в себе модуль, що враховує процес сорбції рослинністю, яка безпосеред-

ньо розташована вздовж автомагістралі, а також модуль, що враховує зміни аеродинамічних параметрів потоку атмосферного повітря в наслідок розташування бар'єру (загорожі) попереду рослинності. Комп'ютерна програма "Sorption" дозволяє проводити експрес-прогноз локальних зон забруднення біля автомагістралі з урахуванням процесу сорбції рослинністю, вона включає модулі графічної обробки результатів прогнозування, дозволяючи отримувати зони забруднення атмосферного повітря різними видами домішок при наявності різної рослинності.

Наукова новизна. Встановлено закономірності забруднення атмосферного повітря викидами автотранспорту, виконано аналіз рівня забруднення територій вздовж автомагістралі.

Практична значимість. Розроблено чисельну модель і комп'ютерну програму з додатковими модулями, що дозволяють оперативно визначати концентрації забруднюючих речовин в атмосфері з урахуванням сорбції рослинністю, територіально та локально оцінити рівень концентрації забруднення, надати рекомендації стосовно її зменшення в наслідок насадження того чи іншого виду рослинності в межах програм покращення навколишнього середовища.

Ключові слова: *автомагістраль, сорбція рослинністю, джерело забруднення, повітряний потік, чисельна модель.*

Вступ. Збільшення щільності міської забудови та інтенсивності дорожнього руху призведе до погіршення стану атмосферного повітря, що негативного впливає на здоров'я та працездатність людини. З метою зменшення забруднення повітря в міських регіонах використовується рослинність, адже вона має здатність очищати повітря від забруднювачів. Дерева «збирають» значну кількість забруднюючих речовин із повітря і поліпшують якість повітря [1]. Деякі міста вирощують різні види рослинності в рамках своїх програм щодо покращення навколишнього середовища [2]. Вважається, що листя рослинності поглинають забруднювачі повітря через свої пори, тому захоплюють шкідливі частинки на свої листя і гілки [3], ефективність цього процесу залежить від метеорологічних і рослинних характеристик. У роботі проведений аналіз впливу рослинності на якість повітря в місті [4], де пояснюється, що можливості дерев обмежені тепловими процесами, які, у свою чергу, обумовлені специфікою міської забудови.

У зв'язку з тим, що постійно збільшується не лише забудова міста, але й висота будівель, утворюються «вуличні каньйони», які зменшують процеси дисперсії для забруднювачів повітря. Насадження дерев у «вуличних каньйонах» може ще більше обмежити дисперсію забруднювачів повітря [3, 5, 6]. Ці дослідження часто засновані на числових моделях і даних експериментів у аеродинамічній трубі.

Деревина можуть видаляти газоподібне забруднення повітря різними шляхами. Вологі, грубі або електрично заряджені поверхні найбільше поглинають частинки забруднювача з повітря [7]. Деякі частинки потім поглинаються в середині листа, де газоподібні речовини дифундують у міжклітинних просторах і можуть бути поглинені, утворюючи кислоти [8], але більшість частинок залишаються на поверхні рослини. Ці «перехоплені» частинки часто повертаються в атмосферу, вимиті дощем або скинуті на землю з опалим листям у ґрунт. В табл. 1 наведено швидкості осадження [9] та показники видалення [10] для дерев різних видів. Накопичення частинок на листях для різних фракцій (розмірів)

частинок РМ (10), РМ(2,5), РМ (0,2) відрізняється в залежності від видів рослинності в 10-15 разів.

Таблиця 1

Швидкість осадження та показники видалення для дерев різних видів

Вид дерева	Швидкість осадження	Показники видалення
Верба	0,5 см/с	24 мкг/см ² /рік
Дуб	0,8 см/с	
Платан	1,3 см/с	9 мкг/см ² /рік
Клен	1,9 см/с	8 – 19 мкг/см ² /рік
Бук	3,0 см/с	
Береза	4,6 см/с	38,4 мкг/см ² /рік
Сосна		24 – 55 мкг/см ² /рік

У даній статті розглядається створення математичної моделі дослідження впливу рослинності на рівень забруднення атмосферного повітря.

З урахуванням досліджень, проведених відносно самої рослинності виконується числове CFD моделювання, реалізоване за допомогою COMSOL Multiphysics [11] або інших програмних продуктів, щодо зменшення забруднення повітря за рахунок зелених насаджень різної форми та виду.

На сьогодні вимоги щодо якості прогнозованої інформації стосовно рівня концентрації забруднення атмосферного повітря вимагають створення нових числових CFD моделей, які можуть враховувати не тільки різні метеорологічні параметри, але і параметри рослинності.

Метою даної роботи є розробка числової моделі для прогнозу локальних зон забруднення біля автомагістралі з урахуванням рослинності.

Викладання основного матеріалу. Експериментальні дослідження проводилися в гідравлічному лотку з метою дослідження процесу формування зон забруднення при емісії домішки біля рослинності. На ділянці лотка були встановлені два водозливи, які утворювали простір, що моделював ділянку вулиці. У середині цього простору розміщувалася рослинність, яка представляла собою гілки ялини блакитної (*Picea pungens*) висотою 13 см, що розташовувалися на відстані 1,5 см одна від одної. Домішка (розчин натрій хлору) подавалася через голку, в розчин додавалася фарба для візуалізації зони забруднення, подача здійснювалася протягом 3 с. Цей процес імітував викид від автомобілів на автомагістралі. Розглядалася емісія забруднювача, що відбувалася на глибині 0,3 см від дна. Число Рейнольдса потоку, напрямок якого на малюнках показано стрілкою, становило $Re = 1596 > 500$, що в разі відкритих русел відповідає турбулентному режиму течії. На рис. 1 показано формування зони забруднення для двох послідовних моментів часу 2 с і 8 с після початку подачі забруднювача.

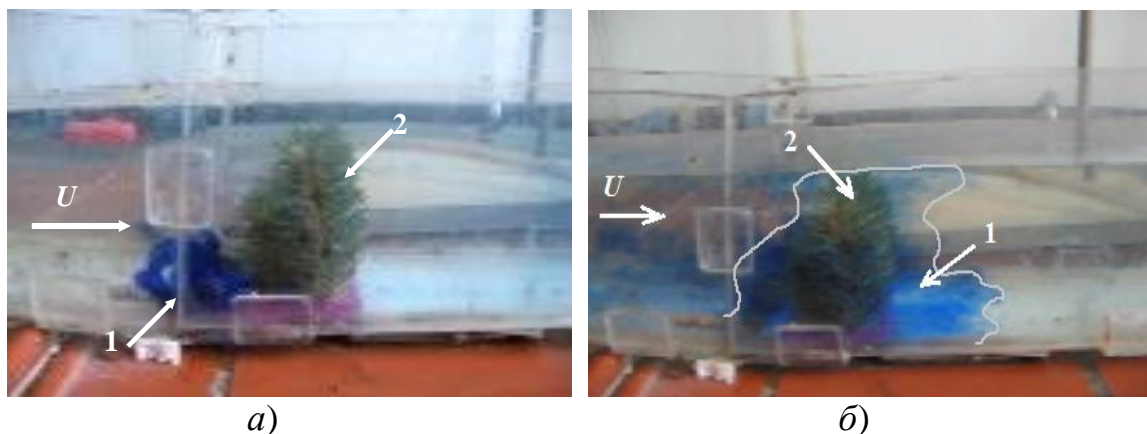


Рис. 1. Динаміка процесу емісії в гідравлічному лотку *a* – $t=2$ с, *б* – $t=8$ с:
1 – зона забруднення; 2 – модель рослинності

На фото експеримента видно, що забруднення проходить вільно крізь рослинність, тому для проведення експрес розрахунку область, яку займає рослинність, моделюється як зона, через яку вільно рухається забруднене повітря, але в середині цієї зони відбувається сорбція забруднення листями. Швидкість такого виду сорбції визначається константами, числові значення яких отримуються експериментально [12].

Для моделювання такого процесу використовувався наступний підхід: на першому етапі розглядався рух викидів від автотранспорту на приміагстральній території, згідно двовимірного рівняння масопереносу (1) [13–14]; на другому – в зоні знаходження рослинності виконувався розрахунок зниження концентрації в наслідок сорбції листями рис.2 (2).

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial (v - w_s)C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \sum Q_i \delta(x - x_i)(y - y_i), \quad (1)$$

де C – концентрація забруднюючої речовини; u , v – компоненти вектора швидкості повітряного потоку; w_s – швидкість гравітаційного осідання забруднюючої речовини, $\mu = (\mu_x, \mu_y)$ – коефіцієнти турбулентної дифузії; (x_i, y_i) – координати джерела викиду забруднюючої речовини; Q_i – інтенсивність емісії забруднювача в точці; $\delta(x - x_i)(y - y_i)$ – дельта-функція Дірака, за допомогою якої моделюється надходження забруднювача. Профіль швидкості вітру на

вході в розрахункову область $u = u_1 \left(\frac{Y}{Y_1} \right)^n$, где $u_1 = 5$ м/с – значення швидкості вітру на висоті $Y_1 = 10$ м, $n = 0,15$; стан атмосфери (інверсія, конвекція), тобто

значення вертикального коефіцієнта дифузії $\mu_y = k \left(\frac{Y}{Y_1} \right)^m$, $k = 0,2$, $m \approx 1$ [5].

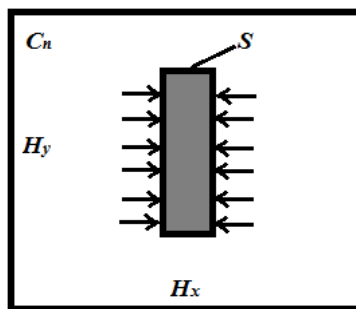


Рис. 2. Схема процесу сорбції в розрахунковій комірці

Згідно з тим, що об'єм комірки $W = H_y \cdot H_x \cdot 1$, потік маси

$$dm = dt \cdot S \cdot \mu \cdot \frac{\partial C}{\partial z}, \text{ витрата через комірку } \frac{dm}{dt} = \frac{C^{n+1} - C^n}{dt}, \text{ а з іншої сторони}$$

$$\mu \frac{\partial C}{\partial z} = \beta \cdot C \text{ [14], то } \frac{C^{n+1} - C^n}{dt} = S \cdot \beta \cdot C.$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \sigma \cdot C, \tag{2}$$

де $\sigma = S \cdot \beta$ – коефіцієнт сорбції.

Для побудови числової моделі застосовувалася неявна поперемінно-трикутна різницева схема, що апроксимує рівняння (1), згідно крайових умов [13]. Вона будується на прямокутній різницевій сітці. Концентрація C визначається в центрі різницевих комірок, компоненти вектору швидкості повітряного середовища задаються на межах різницевих комірок [15].

Розглядається три варіанти процесу емісії забруднювача біля автомагістралі рис. 3–5, розмір ділянки 100 м на 42 м, розглядалася емісія CO від автотранспорту: перший варіант – без наявності рослинності, другий варіант – з урахуванням рослинності, третій варіант – з рослинністю та бар'єром (загорожею).

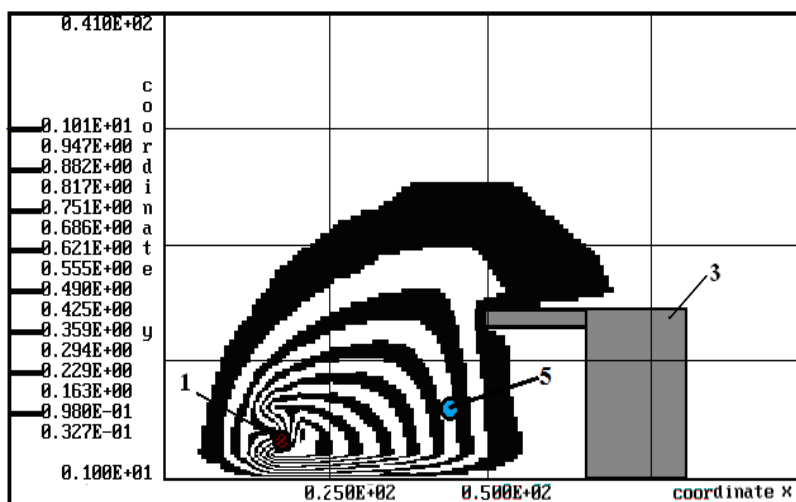


Рис. 3. Зона забруднення без наявності рослинності: 1 – джерело емісії забруднення (автотранспорт), 2 – будівля, 5 – точка спостереження

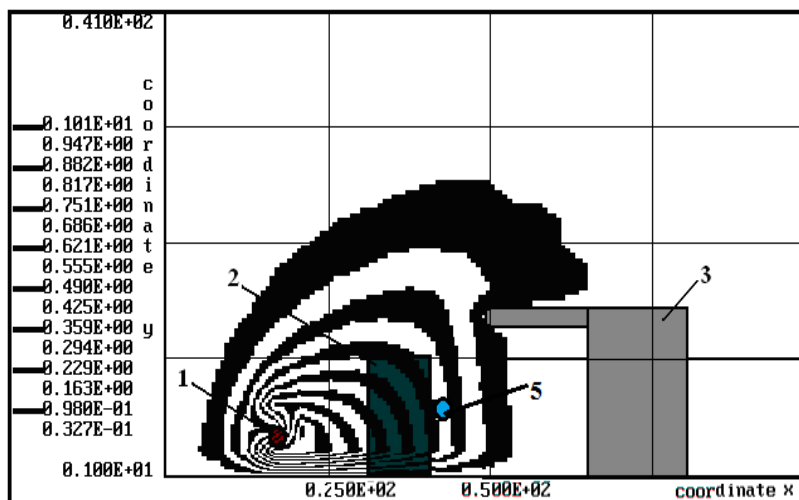


Рис. 4. Зона забруднення при наявності рослинності: 1 – джерело емісії забруднення (автотранспорт); 2 – рослинність, 3 – будівля, 5 – точка спостереження

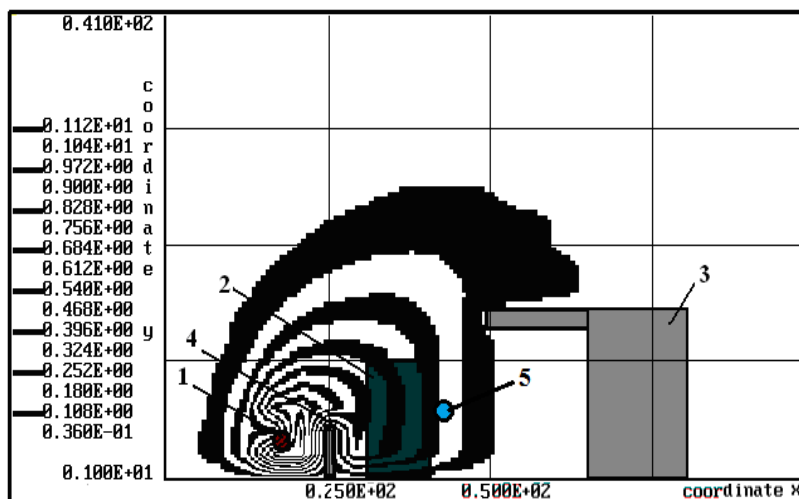


Рис. 5. Зона забруднення при наявності рослинності: 1 – джерело емісії забруднення (автотранспорт); 2 – рослинність, 3 – будівля, 4 – бар'єр (загорожа), 5 – точка спостереження

В кожному варіанті розрахунків порівнювалося значення концентрації забруднювача в точці спостереження, рис. 3–5 позначена цифрою 5, що знаходилася на відстані $x=42$ м, $y=7$ м, числові значення представлені на рис.6. В першому варіанті $C = 0,176$ мг/м³, в другому $C = 0,137$ мг/м³, в третьому $C = 0,098$ мг/м³, тобто наявність рослинності зменшує концентрацію у 1,3 рази, а наявність рослинності та бар'єру зменшує концентрацію у 1,8 рази, відносно ситуації, коли відсутня рослинність, і у 1,4 рази відносно до наявності рослинності.

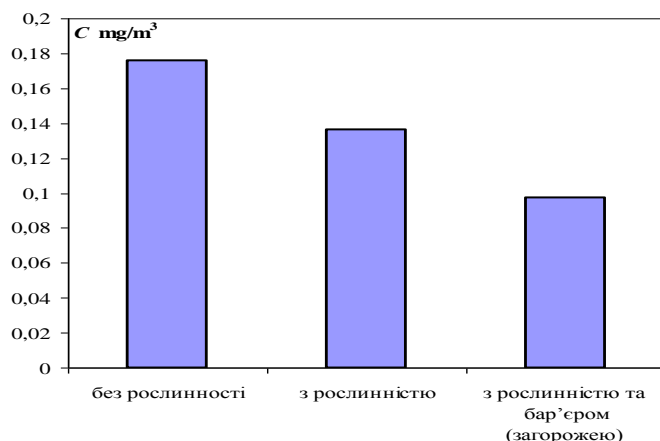


Рис. 6. Значення концентрації в точці спостереження

Зміна значення концентрації домішки обумовлена як процесом сорбції рослинністю, так і зміною аеродинаміки повітряного потоку.

Висновки. Розроблено числову модель для прогнозу локальних зон забруднення біля автомагістралі з урахуванням процесу сорбції рослинністю, що знаходиться поблизу джерела емісії. Застосовано кінцево-різницевий метод для розв'язання гідродинамічної задачі на основі рівняння потенціальної течії та задачі масопереносу. Створено програмне забезпечення, яке дозволяє проводити обчислювальні експерименти для дослідження поля концентрації забруднювача в зоні дії джерела емісії. Встановлено закономірності зміни концентрації залежно від наявності рослинності або рослинності і бар'єру (загорожі), а також в разі їх одночасної відсутності. В перспективах розвитку даного напрямку дослідження необхідно враховувати рослинні характеристики для більшої ефективності процесу сорбції.

Перелік посилань

1. Beckett, K.P., Freer-Smith, P.H. and Taylor, G. (2000). Effective tree species for local air-quality management. *Arbor Journal*, 26, 12–19.
2. Escobedo, F.J., Wagner, J.E., Nowak, D.J., De la Maza, C.L., Rodriguez, M., Crane, D.E. (2008). Analyzing the cost effectiveness of Santiago, Chile's policy of using urban forests to improve air quality. *Journal of Environmental Management*, 86, 148–157.
3. Vos, P.E.J., Maiheu, B., Vankerkom, J. and Janssen, S. (2012). Improving local air quality in cities: To tree or not to tree? *Environmental pollution*, 183, 113–122.
4. Leung, D.Y.C., Tsui, J.K.Y., Chen, F., Yip, W.K., Vrijmoed, L.L.P. and Liu, C. (2011). Effects of urban vegetation on urban air quality. *Landsc Res*, 36 (2), 173–88.
5. Gromke, C. and Ruck, B. (2007). Influence of trees on the dispersion of pollutants in an urban street canyon — experimental investigation of the flow and concentration field. *Atmos Environ*, 41, 3287–3302.
6. Balczó, M., Gromke, C. and Ruck, B. (2009). Numerical modeling of flow and pollutant dispersion in street canyons with tree planting. *Meteorol Z*, 18 (2), 197–206.
7. McDonald, A.G., Bealey, W.J., Fowler, D., Dragosits, U., Skiba, U., Smith, R.I., Donovan, R.G., Brett, H.E., Hewitt, C.N. and Nemitz, E. (2007). Quantifying the effect of urban tree planting on concentrations and depositions of PM10 in two UK conurbations. *Atmospheric Environment*, 41, 8455–8467.

8. Nowak, D.J., Crane, D.E. and Stevens, J.C. (2006). Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban Forestry and Urban Greening*, 4, 115–123.
9. Mitchell, R., Maher, B.A. and Kinnersley, R. (2010). Rates of particulate pollution deposition onto leaf surfaces: Temporal and inter-species magnetic analysis. *Environmental Pollution*, 158, 1472-1478.
10. Saebo, A., Popek, R., Nawrot, B., Hanslin, H.M., Gawronska, H. and Gawronska, S.W. (2012). Plant species differences in particulate matter accumulation of leaf surfaces. *Science of the Total Environment* 427-428, 347-354.
11. Lazzari, S., Perini K., Rossi di Schio, E., Roccotiello, E. (2016). Simplified CFD Modeling of Air Pollution Reduction by Means of Greenery in Urban Canyons. *Excerpt from the Proceedings of the 2016 COMSOL Conference in Munich*, 1–4.
12. Shuji Fujii, Hiun Cha, Naoki Kagi, Hisashi Miyamura, Yong-Shik Kim (2005). Effect on air pollutant removal by plant absorption and adsorption. *Building and Environment*, 40, 105-112.
13. Бе́ляев Н.Н., Ру́сакова Т.И., Ко́лесник В.Е., Па́вличенко А.В. (2016). Прогноз уровня загрязнения атмосферного воздуха в зоне влияния городских автомагистралей. *Науковий вісник Національного гірничого університету*, 1, 90–97.
14. Марчук, Г.И. (1982). *Математическое моделирование в проблеме окружающей среды*. Москва: Наука.
15. Згуровский, М.З., Скопецкий, В.В., Хрущ, В.К., Бе́ляев, Н.Н. (1997). *Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде*. Київ: Наукова думка.

АНОТАЦІЯ

Цель исследования. Разработка численной модели для прогноза локальных зон загрязнения возле автомагистрали с учетом растительности.

Методика. Метод численного расчета концентрации загрязнителя в атмосферном воздухе основывается на решении двумерного уравнения массопереноса загрязнения, непосредственно поступающего от автомагистрали. Методика учитывает процесс сорбции растительностью, которая растет вдоль автомагистрали, а также наличие барьера (заграждения) перед растительностью. Численная модель основывается на решении уравнений с помощью неявных разностных схем.

Результаты. Создана компьютерная программа для оценки поля концентрации примеси в атмосферном воздухе в результате эмиссии загрязнения, попадающего от автомагистрали. Эта разработка включает в себя модуль, учитывающий процесс сорбции растительностью, непосредственно расположенной вдоль автомагистрали, а также модуль, учитывающий изменения аэродинамических параметров потока атмосферного воздуха в результате расположения барьера (заграждения) впереди растительности. Компьютерная программа "Sorption" позволяет проводить экспресс-прогноз локальных зон загрязнения у автомагистрали с учетом процесса сорбции растительностью, она включает модули графической обработки результатов прогнозирования, что позволяет получать зоны загрязнения атмосферного воздуха различными видами примесей при наличии различной растительности.

Научная новизна. Установлены закономерности загрязнения атмосферного воздуха выбросами автотранспорта, выполнен анализ уровня загрязнения территорий вдоль автомагистрали.

Практическая значимость. Разработана численная модель и компьютерная программа с дополнительными модулями, позволяющими оперативно определять концентрации загрязняющих веществ в атмосфере с учетом сорбции растительностью, территориально и

локально оценить уровень концентрации загрязнения, предоставить оценочные рекомендации для уменьшения загрязнения с помощью насаждения того или иного вида растительности в рамках программ улучшения окружающей среды.

Ключевые слова: автомагистраль, сорбция растительностью, источник загрязнения, воздушный поток, численная модель.

ABSTRACT

Purpose. Development of a numerical model for the prediction of local pollution zones near the motorway taking into account vegetation.

The methodology. The method of numerical calculation of the pollutant concentration in atmospheric air is based on the solution of the two-dimensional equation of mass transfer of pollution directly coming from the motorway. The methodology takes into account the process of sorption by vegetation, which grows along the motorway, as well as the presence of a barrier in front of the vegetation. The numerical model is based on solving equations using implicit difference schemes.

Findings. A computer program has been set up for estimating the impurity concentration field in the atmospheric air as a result of emission of pollution from the motorway. This development includes a module that takes into account the process of sorption by vegetation directly along the motorway, as well as a module that takes into account changes in the aerodynamic parameters of the atmospheric air flow as a result of the location of the barrier in front of the vegetation. The computer program "Sorption" allows carrying out the express forecast of local contamination zones along the highway taking into account the process of sorption by vegetation, it includes modules for graphical processing of forecasting results, allowing to obtain zones of air pollution by various kinds of impurities in the presence of different vegetation.

The originality. The regularities of pollution of atmospheric air by emissions from motor transport are established, the analysis of pollution level of territories along a motorway is executed.

Practical implication. A numerical model and computer program with additional modules allow to determine the concentrations of pollutants in the atmosphere taking into account sorption by vegetation, territorial and local assessment of the pollution concentration level, provide recommendations for reducing pollution by planting a particular vegetation within the programs for improving the environment.

Keywords: *highway, vegetation sorption, source of pollution, air flow, numerical model.*

Рекомендовано до публікації д.т.н. О.В. Зберовським, дата подання рукопису 08.06.2018