



## Моделювання розподілу концентрації викидів від автотранспорту у просторі

Р. А. Васькін<sup>1)</sup>, В. О. Соляник<sup>2)</sup>, І. В. Васькіна<sup>1)</sup><sup>1), 2), 3)</sup> Сумський державний університет, вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, Україна, 40007

## Article info:

Paper received:

The final version of the paper received:

Paper accepted online:

30 October 2015

09 December 2015

10 December 2015

## Correspondent Author's Address:

<sup>1)</sup> r.vaskin@gmail.com

Зростання кількості автотранспорту на дорогах України зумовлює необхідність достовірного аналізу і прогнозу екологічної обстановки поблизу магістралей. Це дослідження присвячене питанням моделювання розподілу концентрації викидів від автотранспорту при різних вихідних даних. На основі дифузійної моделі була розроблена модель, яка дозволяє описати загальний фон забруднення при заданій інтенсивності автотранспортного потоку на ділянці магістралі, а також з урахуванням зміни інтенсивності викиду при різних режимах роботи двигуна: під час розгону, гальмування та під час зупинки автомобіля. У статті наведені результати розрахунків зміни концентрації залежно від початкової концентрації шкідливих речовин, швидкості руху автомобіля, коефіцієнта дифузії. При вирішенні поставленого завдання було використано підхід, який дозволяє одержати просторове поле концентрації за будь-якого стану атмосфери та швидкості повітряного потоку. Також були визначені коефіцієнти зниження інтенсивності викидів залежно від відстані та напрямку руху транспорту на конкретному перехресті. Адекватність запропонованої математичної моделі для оцінювання підтверджують результати експериментальних досліджень інших авторів. Перевагами пропонованої моделі є використання мінімуму експериментальних даних та легке програмування у прикладних математичних пакетах.

**Ключові слова:** математична модель, конвекція, дифузія, інтенсивність, гальмування, розгін.

## ВСТУП

Постійне зростання кількості автотранспорту на дорогах України призводить до збільшення загальної кількості викидів від автомобільних двигунів. Це призводить до порушення екологічної рівноваги. Щоденно у повітря викидається величезна кількість різних речовин (окиси карбону, нітрогену, частинки сажі, важких металів та ін.). Головним джерелом шкідливих викидів під час руху автомобіля є двигун. Витрата палива, а отже, і викиди відпрацьованих газів залежать від режиму роботи двигуна, що задається водієм і дорожніми умовами. Таким чином, змінюючи параметри трансмісії (її передавальні числа), для певного режиму руху можна досягти мінімальних значень витрати палива і відповідно викидів відпрацьованих газів. Для достовірного аналізу й прогнозу екологічної обстановки і визначення оптимальних режимів експлуатації автомобіля необхідні математичні моделі, що базуються на глибокому рівні фізичного опису екологічних систем.

## МЕТА ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Метою цієї роботи є розроблення моделі розподілу концентрації викидів від автотранспорту. Завданням дослідження є вирішення завдання визначення зміни інтенсивності викидів з ураху-

ванням різних режимів роботи двигуна (розгін, гальмування, зупинка).

## АНАЛІЗ ПУБЛІКАЦІЙ

Для одержання достовірних характеристик про рівні забруднення атмосфери викидами автотранспорту потрібно проводити численні і часто масштабні відбори проб з встановленням концентрацій газів, аерозольних випадів поблизу магістралей. Це спричинює великі матеріальні витрати. Тому на практиці ця проблема, як правило, вирішується побудовою фізико-аналітичних моделей процесів емісії та розсіювання шкідливих речовин у атмосферному повітрі. Моделі будуються з певними припущеннями, адекватними відповідно до вирішення конкретного завдання. Детальна класифікація таких математичних моделей наведена у монографії [1]. Найбільш відомими реалізаціями подібних моделей є програмні продукти Aermob, Calpuff, ADMS-3, Caline3, OCD.

Принципово можлива побудова математичних моделей поширення домішок в атмосфері й інших середовищах на основі повної системи рівнянь механіки суцільного середовища. Разом із тим такий підхід для вирішення інженерних завдань здебільшого важко реалізувати на практиці. Необхідно також мати на увазі, що в таких моделях потрібно заздалегідь знати багато характе-

ристик системи, які можуть бути визначені лише емпірично. Отже, доцільно розвивати компромісні моделі, які мали б чітке фізичне обґрунтування і в той самий час дозволяли одержувати достовірні оцінки ситуації з мінімальними витратами й емпіричних досліджень.

Завдання побудови таких моделей було сформульовано ще в роботі [2]. У цій самій роботі було висловлено пропозицію про необхідність розвитку моделей дифузійного типу для вирішення зазначених завдань. Ряд дифузійних моделей використовується і сьогодні для оцінювання параметрів поширення забруднювальних домішок в атмосфері (ейлерові моделі, гаусові моделі, лагранжеві моделі) [1, 3]. Ці моделі є базовим математичним апаратом для побудови інших моделей. Але аналіз показує, що практична реалізація таких математичних моделей є складною системою, оскільки вимагає враховувати такі фактори, як турбулентність повітряних потоків, перенесення теплоти, твердих частинок, динаміку водяної пари, конденсацію та випаровування. Недоліком цих моделей також є їх цільовий характер, тобто спрямованість на вирішення вузьких завдань за максимального використання великого обсягу емпіричних даних. Отже, вище перелічені проблеми зумовлюють актуальність нашого дослідження.

#### АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНИ ВИКИДІВ ВІД АВТОТРАНСПОРТУ

Спираючись на відомий математичний апарат [4], за основу нашої моделі візьмемо рівняння конвективної дифузії, але використаємо ефективний коефіцієнт дифузії:

$$I(x, y, z, t) + D_{\text{ef}} \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial C}{\partial t} + V_x \frac{\partial C}{\partial x} + V_y \frac{\partial C}{\partial y} + V_z \frac{\partial C}{\partial z} \quad (1)$$

де  $I(x, y, z, t)$  - інтенсивність джерела викидів;

$D_{\text{ef}}$  - ефективний коефіцієнт дифузії;

$C$  - концентрація домішки;

$V_x, V_y, V_z$  - компоненти вектора швидкості

повітряного потоку;

$x, y, z$  - поточні координати у системі координат із центром у джерелі викидів;

$t$  - час впливу.

Візьмемо, що швидкість поширення викидів від автомобіля ( $V_y$ ) змінюється від 0 до певного сталого значення (амплітуди)  $V_s$  на заданій висоті, а вертикальну складову конвективного потоку беремо сталою  $V_c$  й ототожнюється в нашому випадку з характерною швидкістю осадження частинок сажі [3]. Розподіл швидкості руху повітря у приземному шарі атмосфери змінюється за експоненціальним законом [4]. Тоді можна записати:

$$\begin{aligned} V_x &= 0, \\ V_y &= V_s \left( 1 - \exp\left(-\frac{z}{H^*}\right) \right), \\ V_z &= V_c, \end{aligned}$$

де  $V_s$  - амплітуда горизонтальної складової швидкості викиду;  $H^*$  - характерна висота викиду (приймається рівною 0,5 м).

У нашому випадку можливі дві постановки завдання для цієї моделі.

У першому випадку завданням є опис загального фону забруднення при заданій інтенсивності автотранспортного потоку на ділянці магістралі.

Для розв'язання цього завдання можна використовувати стаціонарну модель [4]:

$$D_{\text{ef}} \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) = V_s \left( 1 - \exp\left(-\frac{z}{H^*}\right) \right) \frac{\partial C}{\partial y} + V_c \frac{\partial C}{\partial z} \quad (2)$$

з початковою умовою  $C(H^*) = C^*$ ,  $C(0) = 0$ .

Тоді рівняння (2) можна подати у вигляді

$$\begin{aligned} D_{\text{ef}} \frac{H}{V_c} \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) &= \\ &= \frac{H^*}{V_c} V_s \left( 1 - \exp\left(-\frac{z}{H^*}\right) \right) \frac{\partial C}{\partial y} + H^* \frac{\partial C}{\partial z}, \end{aligned} \quad (3)$$

де  $H^*$  - висота джерела викидів.

У результаті одержуємо безрозмірне рівняння такого вигляду

$$\bar{D}_{\text{ef}} \left( \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial Z^2} \right) = \chi \left( 1 - \exp(-Z) \right) \frac{\partial C}{\partial Y} + \frac{\partial C}{\partial Z}, \quad (4)$$

$$\text{де } \bar{D}_{\text{ef}} = \frac{D_{\text{ef}}}{H^* V_c}, \quad \chi = \frac{V_s}{V_c},$$

$$X = \frac{x}{H^*}, \quad Y = \frac{y}{H^*}, \quad Z = \frac{z}{H^*}.$$

Для подальшого спрощення розрахунків згідно з рівнянням (4) вводимо безрозмірний комплекс  $k$  ( $k = \frac{\chi}{\bar{D}_{\text{ef}}}$ ), що характеризує зміну швидкості

дифузійних процесів за висотою.

Друга постановка завдання пов'язана із розв'язанням задачі з урахуванням зміни інтенсивності викиду за різних режимів роботи двигуна під час розгону, гальмування та під час зупинки. Використовуючи запропоновану модель, можна подати стаціонарну картину розподілу концентрації забруднювальних речовин на перехрестях і на ділянках руху між перехрестями. На рисунках 1, 2 наведені результати розрахунків, із використанням пакета MATLAB5 при значеннях параметрів: ефективний коефіцієнт дифузії  $\bar{D}_{\text{ef}} = 10^{-4}$ , безрозмірний комплекс  $k = 200; 150; 100; 60$ , характерна висота викидів  $\bar{H}^* = 0,5$  м.

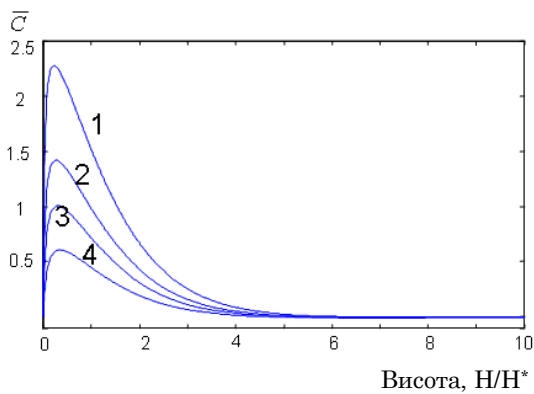


Рисунок 1 – Зміна концентрації забруднень за висотою за різної початкової концентрації на рівні  $H^*$ : 1 –  $k = 60$ ; 2 –  $k = 100$ ; 3 –  $k = 150$ ; 4 –  $k = 200$

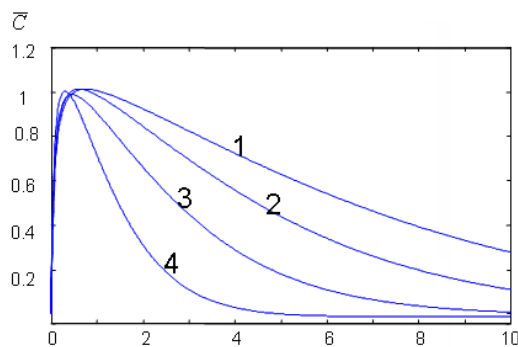


Рисунок 2 – Зміна концентрації забруднень за висотою за різної швидкості автотранспорту: 1 –  $k = 60$ ; 2 –  $k = 100$ ; 3 –  $k = 150$ ; 4 –  $k = 200$

На рисунку 3 показані розрахункові дані згідно з другою постановкою завдання. Тут взято певну підвищену концентрацію на перехресті і розраховано зміну цієї концентрації на заданій висоті за довжиною до наступного перехрестя за різних ефективних коефіцієнтів дифузії.

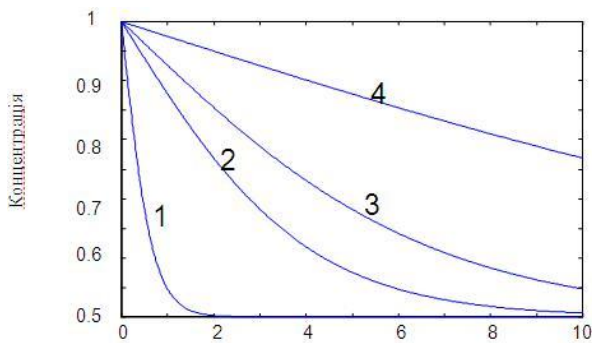
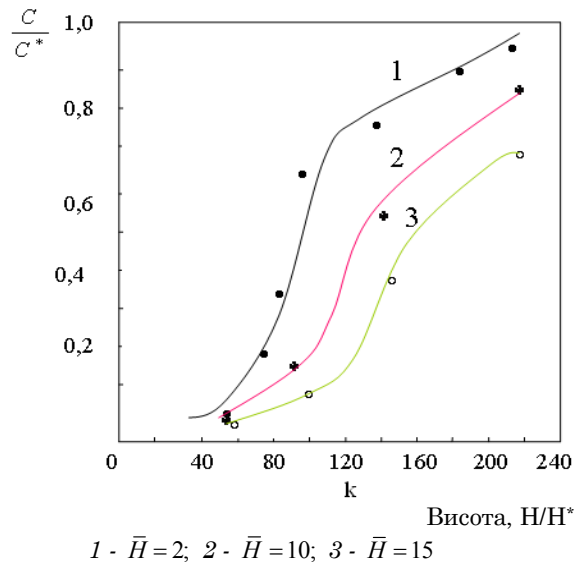


Рисунок 3 – Зміна концентрації на заданій висоті 1,5 м по довжині траси вздовж напрямку руху від джерела викиду на світлофорі за різних ефективних коефіцієнтів дифузії: 1 –  $k = 60$ ; 2 –  $k = 100$ ; 3 –  $k = 150$ ; 4 –  $k = 200$

Хоча розрахунки мають чисельно-експериментальний характер, тобто були здійснені за умовних співвідношень амплітуди швидкості віт-

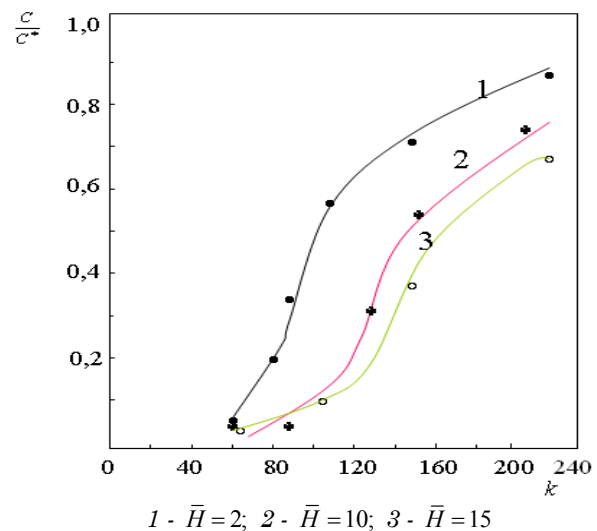
ру і конвективної складової швидкості повітряних мас, порівняння одержаних результатів із відомими дослідними даними [3, 4] дозволяє зробити висновок, що запропонована модель більш достовірно описує якісні особливості поширення домішок, ніж інші методики.

На рисунках 4 і 5 показані графіки залежності безрозмірної концентрації на висоті вимірювання  $z$  від безрозмірного комплексу  $k$ , розрахованого за допомогою чисельного експерименту з дифузійної моделі вздовж напрямку руху  $i$  в напрямку, перпендикулярному до напрямку руху на різній відстані від джерела.



1 -  $\bar{H} = 2$ ; 2 -  $\bar{H} = 10$ ; 3 -  $\bar{H} = 15$

Рисунок 4 – Залежність безрозмірної концентрації на висоті вимірювання  $z = 1,5$  м від безрозмірного комплексу  $k$  за напрямком руху



1 -  $\bar{H} = 2$ ; 2 -  $\bar{H} = 10$ ; 3 -  $\bar{H} = 15$

Рисунок 5 – Залежність безрозмірної концентрації на висоті вимірювання  $z = 1,5$  м від безрозмірного комплексу  $k$  за напрямком, перпендикулярним до напрямку руху

Використовуючи наведені графіки, можна розрахувати коефіцієнти зниження інтенсивності викидів для будь-якої ділянки магістралі. Таким чином,

були визначені коефіцієнти зниження інтенсивності викидів залежно від відстані на перехресті вул. Харківської, вул. Прокоф'єва та просп. М. Лушпи (м. Суми). Відповідні коефіцієнти становлять 0,46 при відстані 260 м та 0,53 – при 200 м (перпендикулярно до напрямку руху), 0,68 – при 130 м (вздовж напрямку руху).

### ВИСНОВКИ

Під час розв'язання поставленого завдання було використано підхід, який дозволяє одержати просторове поле концентрації за будь-яких станів атмосфери та швидкості повітряного потоку.

Адекватність запропонованої математичної моделі для оцінювання підтверджують позитивні результати експериментальних досліджень інших авторів [3, 4, 6]. Пропонована модель використовує мінімум експериментальних даних, які досить просто можуть бути одержані при проведенні чисельного експерименту та більш достовірно описує якісні особливості поширення домішок. Перевагою моделі також є те, що вона легка для програмування у прикладних математичних пакетах (MATLAB, Maple та ін.). Тому ця модель може бути рекомендована для практичного використання.

## Modelling of the Emission and Concentration Distribution of Vehicles in the Environment

R. A. Vaskin<sup>1)</sup>, V. O. Solyanyk<sup>2)</sup>, I. V. Vaskina<sup>3)</sup>

*1), 2), 3) Sumy State University, 2, Rimsky Korsakov Str., 40007, Sumy, Ukraine*

Increasing number of vehicles on the Ukrainian roads requires reliable analysis and forecasting of ecological situation near highways. This issue is devoted to modeling the distribution concentration of emissions from vehicles with different input data. Based on diffusion model was developed a model that allows describing the general background pollution intensity at a given motor flow on the section line, and the changing intensity of emissions under different operating conditions of the engine: during acceleration, braking and stop the vehicle. The article shows the results of calculations of concentration changes depending on the initial concentration of harmful substances, vehicle speed, diffusion coefficient. In the process of solving this problem we used an approach that provides a spatial concentration field in any state of the atmosphere and airflow. The adequacy of the proposed mathematical model for the evaluation confirms the positive results of experimental studies of other authors. The advantages of proposed model are using minimum of experimental data and easy programming in applied mathematical packages.

**Keywords:** mathematical model, convection, diffusion, intensity, inhibition transport, braking, acceleration.

## Моделирование распределения концентрации выбросов от автотранспорта в пространстве

Р. А. Васькин<sup>1)</sup>, В. О. Соляник<sup>2)</sup>, И. В. Васькина<sup>1)</sup>

*1), 2), 3) Сумский государственный университет, ул. Римского-Корсакова, 2, г. Сумы, Украина, 40007*

Рост количества автотранспорта на дорогах Украины вызывает необходимость достоверного анализа и прогноза экологической обстановки вблизи магистралей. Данное исследование посвящено вопросам моделирования распределения концентрации выбросов от автотранспорта при различных исходных данных. На основе диффузионной модели была разработана модель, которая позволяет описать общий фон загрязнения при заданной интенсивности автотранспортного потока на участке магистрали, а также с учетом изменения интенсивности выброса при различных режимах работы двигателя: при разгоне, торможении и остановке автомобиля. В статье приведены результаты расчетов изменения концентрации в зависимости от начальной концентрации вредных веществ, скорости движения автомобиля, коэффициента диффузии. При решении поставленной задачи было использовано подход, позволяющий получить пространственное поле концентрации любого состояния атмосферы и скорости воздушного потока. Также были определены коэффициенты снижения интенсивности выбросов в зависимости от расстояния и направления движения транспорта на конкретном перекрестке. Адекватность предложенной математической модели для оценки подтверждают результаты экспериментальных исследований других авторов. Преимуществами предлагаемой модели является использование минимума экспериментальных данных и легкое программирование в прикладных математических пакетах.

**Ключевые слова:** математическая модель, конвекция, диффузия, интенсивность, торможение, разгон.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бабков В. С. Анализ математических моделей распространения примесей от точечных источников / В. С. Бабков,

Т. Ю. Ткаченко // Наукові праці ДонНТУ. Серія «Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка». – 2011. –

№ 13, – С. 9.

2. Розенберг Г. С. Экологическое прогнозирование (Функциональные предикторы временных рядов) / Г. С. Розенберг, В. К. Шитиков, П. М. Брусиловский. - Тольятти, 1994. - 182 с.
3. Гольдфейн М. Д. Расчетный мониторинг распространения выбросов автомобильного транспорта в крупном промышленном городе / М. Д. Гольдфейн, Н. И. Кожевников, Н. А. Фетисова // Успехи современного естествознания. – 2006. - № 4. – С. 35 - 36.
4. Berlyand M. E. Experimental investigation of atmospheric

## REFERENCES

1. Babkov, V. S., Tkachenko, T. J. (2011). Analiz matematicheskikh modeley rasprostraneniya primesev ot tochechnykh istochnikov [Analysis of mathematical models of the spread of contaminants from point sources], Donetsk, Ukraine.
2. Rozenberg, G. S., Shitikov, V. K., and Brusilovskiy, P. M. (1994). Ekologicheskoe prognozirovanie. Funktsionalnye prediktory vremennykh ryadov [Ecological forecasting. Functional predictors of time series], Tolyati, Russia.
3. Goldfein, M. D., Kogevnikov, N. I., Fetisova, N. A. (2006). Raschetny monitoring rasprostraneniya vybrosov avtomobilnogo transporta v krupnom promyshlennom gorode [Current monitoring of the spread of road transport emissions in large industrial cities], Russia, Moscow.

pollution due to motor vehicles / M. E. Berlyand, N. S. Burenin, E. L. Genihovich // Proc. Sov. American. Symp on mobile sources of air pollution.– Saint-Petersburg, 1992. – Vol. 1. - P. 105 - 121.

5. The wind field model [Электронный ресурс]. URL: <http://indic-airviro.com>
6. Бызова Н. Л. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примесей / Н. Л. Бызова, Е. Г. Гаргер, В. Н. Иванов. – Л. : Гидрометеоиздат, 1991. – 273 с.

4. Berlyand M. E., Burenin N. S., Genihovich E. L. Experimental investigation of atmospheric pollution due to motor vehicles. Proc. Sov. American. Symp on mobile sources of air pollution. Vol.1. – Saint-Petersburg. – 1992. – P. 105 - 121.
5. The wind field model [Электронный ресурс]. - URL: <http://indic-airviro.com>
6. Byzova N. L., Garger E. G., Ivanov V. N. (1991). Eksperimentalnye issledovaniya atmosfernoynykh diffusii i raschety rasseyaniya primesev [Experimental study of atmospheric diffusion and calculations of impurities dispersion], Leningrad. Russia.