

1. ЕКОЛОГІЯ ТА ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

УДК 532.5:627.13

Бондаренко Л.П., канд. техн. наук, Кондюкова І.О., канд. техн. наук

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ ПРИДОРОЖНЬОЇ СМУГИ В ЗИМОВИЙ ПЕРІОД РОКУ

Анотація. В роботі запропоновано математичну модель для прогнозування екологічного стану придорожньої смуги з урахуванням погодних умов та стану дорожнього покриття. Математичне моделювання проведено в рамках системного підходу. Проведено чисельний експеримент з дослідження впливу різних станів покриття на екологічний стан придорожньої смуги. На основі проведених розрахунків та аналізу експериментальних даних встановлено закони розподілу СО та NO₂ в повітрі придорожньої смуги.

Ключові слова: придорожня смуга, екологічний стан, математичне моделювання, чисельний експеримент

Аннотация. В работе предложена математическая модель для прогнозирования экологического состояния придорожной полосы с учетом погодных условий и состояния дорожного покрытия. Математическое моделирование проведено в рамках системного подхода. Проведен численный эксперимент по исследованию влияния различных состояний покрытия на экологическое состояние придорожной полосы. На основе проведенных расчетов и анализа экспериментальных данных установлено законы распределения СО и NO₂ в воздухе придорожной полосы.

Ключевые слова: придорожная полоса, экологическое состояние, математическое моделирование, численный эксперимент

Abstract. This paper presents a mathematical model for predicting ecological condition of roadside strips, taking into account weather and road surface conditions. Mathematical modelling was conducted as part of a systematic approach. The numerical experiment was provided to study the effect of different cases covering ecological conditions of roadside strips. On the basis of calculations and analysis of experimental datasets, the distribution laws of CO and NO₂ in the air near the roadside strips were determined.

Keywords: roadside strip, environmental condition, mathematical modelling, numerical experiment

Вступ

Дорожньо-транспортний комплекс здійснює суттєвий негативний вплив на навколишнє середовище, що обумовлює необхідність розробки ефективних природоохоронних заходів в дорожньо-транспортній галузі. Транспортне забруднення залежить від багатьох факторів, серед яких одним з найбільш суттєвих є стан дорожнього покриття і безпека руху. В свою чергу стан дорожнього покриття є параметром змінним і залежить від сезону та природно-кліматичних умов. Особливо небезпечним в цьому аспекті є зимовий період року, коли різко збільшується кількість ДТП. Зимове утримання автомобільних доріг є складним не лише з матеріальної та технологічної точки зору, але й з точки зору екології. Тому, дослідження забруднення придорожньої смуги в найбільш напружений з погляду умов та безпеки руху зимовий період року є досить актуальним.

Аналіз публікацій На сьогодні існує велика кількість досліджень, в яких представлені різні методи визначення і розповсюдження шкідливих домішок в атмосфері. Великий внесок у вивчення забруднення повітря зробили М.Є. Берлянд, Н.С. Буренін, Г.П. Кирилов, Н.А. Рябіков, В.Ф. Скорченко, І.Ю. Колпакова, Т.І. Черв'якова, В.В. Філіпов, а також інші вітчизняні і зарубіжні автори [1-4].

Для визначення вмісту СО над проїзною частиною автомобільних доріг були запропоновані різні емпіричні залежності, основним дорожнім параметром в яких є інтенсивність руху (табл. 1).

Таблиця 1 - Залежності для визначення рівня забруднення атмосферного повітря CO над проїзною частиною автомобільних доріг

Автори	Емпіричні рівняння
Арамян П.А.	$CO=0,49 \cdot 10^{-5} \cdot N^2 + 0,06904 \cdot N - 2,043063$
Дмитрієв М.Т.	$T=69 \cdot B \cdot N \cdot [1 + 1,78 \cdot (\mu - 0,02)]$
Кирилов Г.П.	$CO=3,85 + 0,0185 \cdot N + \Sigma A_i$
Манусаджянц Ж.Г.	$CO=22,4 \cdot B \cdot M_r \cdot d \cdot N_a \cdot (1 + 0,0125 \cdot h)$
Сидоренко В.Ф.	$CO=7,38 + 0,026 \cdot N + \Sigma A_i$
Орнатський Н.П.	$CO=(7,33 + 0,026 N_a) \cdot K_1 K_2 \cdot K_3$ при відсутності вітру: $C_x=0,5CO - 0,1X$
Сильянов В.В.	$C=CO=0,006 N_1 - 9 \cdot \lg V - 0,3U + 17$
Boveb L., Siebenberg S.	$CO=1,53 \cdot N^{0,368}$
Cassidy M.	$CO=1,1 \cdot (7 + 0,0025 \cdot N)$
Toyce F., William S., Sohnsen D.	$CO=1,1 \cdot (0,006 \cdot N - 9 \cdot \lg V - 0,3 \cdot U + 17)$

Позначки у таблиці 1: N – інтенсивність руху, авт./доб.; T – вміст CO в частках ГДК; B – коефіцієнт, що враховує вплив забудови; μ – концентрація озону в повітрі, мг/м³; h – висота забудови, м; ΣA_i – коефіцієнт, що враховує зміну складу транспортного потоку, швидкості руху та повздовжні похили; M_r – об'єм відпрацьованих газів умовного автомобіля, м³; d – об'єм вмісту оксиду вуглецю у відпрацьованих газах, %; V – швидкість руху, км/год; α – питома вага CO, г/м³; U – швидкість вітру, м/с; K_1, K_2, K_3 – коефіцієнти, які залежать від складу транспортного потоку, впливу повздовжнього похилу, ступеня токсичності автомобільних викидів.

Однак, наведені в табл. 1 залежності не отримали широкого практичного застосування, оскільки не завжди адекватно відображають фактичне поширення та рівень забруднення атмосфери, а також не враховують вплив інших, не менш важливих, факторів.

На сьогодні при проведенні екологічних досліджень найбільш часто використовуються два методи розрахунку концентрацій шкідливих домішок в атмосфері.

Одним з перших, хто суттєво впровадив отримані результати в практику, був Сеттон С.Г. Він описав концентрацію домішки поблизу джерела забруднення Гаусівським законом розподілу [5]:

$$\theta_x = \frac{1}{\delta_x \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\delta_x^2}\right). \quad (1)$$

У разі лінійного джерела, яким є дорожнє полотно, орієнтоване вздовж осі OY , розподіл можна розглядати тільки в напрямку OX , і тоді параметр δ_x у (1) набуде вигляду:

$$\delta_x^2 = \frac{1}{2} C_x^2 (\bar{u} t)^{2-n} \quad (2)$$

де δ_x – дисперсія розподілу домішки у напрямку осі OX ; C_x – віртуальний коефіцієнт дифузії; \bar{u} – середня швидкість вітру, м/с; n – безрозмірний параметр.

Однак, при розрахунку концентрацій даним методом за аномальних метеорологічних умов можуть бути значні розбіжності між експериментальними і розрахунковими даними.

Другий метод розрахунку концентрації шкідливих домішок полягає у реалізації рівняння турбулентної дифузії з урахуванням можливої зміни температури повітря, швидкості вітру, коефіцієнта обміну в приземному шарі повітря. Цей метод більш універсальний і дозволяє вирішувати задачі з різними характеристиками зовнішнього середовища і граничними умовами. Рівняння сталої дифузії має вигляд:

$$\frac{\partial z_c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} k_x \frac{\partial z_c}{\partial x} + v_x \frac{\partial z_c}{\partial x} + v_y \frac{\partial z_c}{\partial y} + \beta z_c + F_u, \quad (3)$$

де вісь OX – перпендикулярна до осі дороги; вісь OY – співпадає з віссю дороги; z_c – концентрація оксиду вуглецю в точці x ; k_x – коефіцієнт дифузії обміну; v_x, v_y – швидкості дифузії обміну; F_u – функція джерела забруднення; β – параметр рівняння; t – час.

Через припущення про сталість характеру процесу, що розглядається, і лінійність джерела забруднення:

$$\frac{\partial z_c}{\partial t} = 0, \quad v_y = 0, \quad (4)$$

і рівняння (3) набуває вигляду:

$$-\frac{\partial}{\partial x} k_x \frac{\partial z_c}{\partial x} - v_x \frac{\partial z_c}{\partial x} - \beta z_c = F_u. \quad (5)$$

Розв'язання рівняння атмосферної дифузії проводиться чисельними методами із застосуванням сучасної обчислювальної техніки і дозволяє отримати функціональні залежності концентрацій від основних діючих факторів.

Суттєвого розвитку процеси турбулентної дифузії домішок в атмосфері отримали в роботах Берлянда М.Е. [1], Колпакової І.Ю.

Багато робіт присвячено експериментальним дослідженням, розробці математичних моделей розподілу різних забруднюючих речовин в придорожній смузі. Проте, у всіх цих роботах відсутній комплексний підхід до екологічної оцінки придорожньої смуги і не розглядалася сезонна зміна рівня забруднення з урахуванням дії погодно-кліматичних факторів (ПКФ).

Постановка задачі Враховуючи, що на рівень забруднення придорожніх територій здійснюють вплив дорожні і транспортні фактори, оцінку їх екологічного стану доцільно проводити в рамках системного підходу. Розглянемо систему Д-А-НС («дорога – автомобіль – навколишнє середовище»), схему взаємодії якої наведено на рис.1.1.

Задачу дослідження поведінки системи Д – А – НС в зимовий період з екологічною оцінкою доцільно вирішувати у декілька етапів:

1. Виявлення зовнішніх і внутрішніх параметрів;
2. Встановлення законів функціонування підсистеми в цілому і окремих її елементів, формування математичної моделі, розробка алгоритму розрахунку і програмного забезпечення для її реалізації;

3. Дослідження тривалості знаходження дорожнього покриття в різних екологічно небезпечних станах з моделюванням відповідних їм рівнів забруднення НС викидами автотранспорту і витратою ПОМ.

Це дозволить розробити пропозиції щодо зниження рівня забруднення придорожньої смуги в зимовий період.

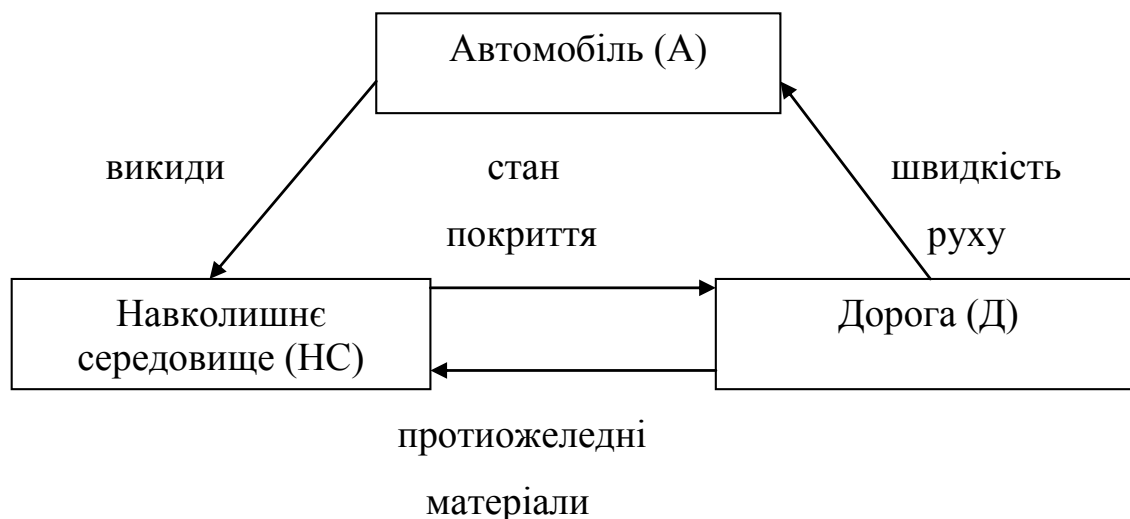


Рисунок 1 – Схема зв'язків системи «дорога – автомобіль – навколишнє середовище»

Так як між множиною елементів автомобільної дороги і навколишнім середовищем існує велика кількість різноманітних зв'язків, то ці множини можна розглядати як систему. Власні зв'язки системи і її зв'язки із зовнішнім середовищем створюють структуру системи, що розглядається. Підсистема Д – НС є складною, і при її вивченні можливе використання загальних підходів теорії моделювання складних систем. Вихідною інформацією при побудові математичних моделей процесу функціонування підсистеми Д – НС можуть слугувати дані про призначення і умови її роботи.

Як показує аналіз результатів досліджень багатьох авторів, у якості системоутворюючого фактора для вирішення дорожніх екологічних задач може бути вибрана швидкість руху. У зимовий період вона визначається станом дорожнього покриття. Для оцінки стану дорожнього покриття і відповідних йому швидкостей руху і рівня екологічного забруднення придорожньої смуги використовуватимемо дві математичні моделі, в основу яких покладено

сумісний аналіз погодної, дорожньої і транспортної інформації. Для оцінки стану дорожнього покриття скористаємося математичною моделлю, розробленою для дослідження умов утворення зимової слизькості на дорожніх покриттях [6].

У відповідності із загальною теорією складних систем, закон функціонування підсистеми Д – НС представимо узагальненим оператором F_s , який перетворить набір внутрішніх, незалежних параметрів підсистеми (метеорологічних і дорожніх факторів) у зовнішні, залежні – стани дорожнього покриття:

$$\overline{y}(t) = F_s[\overline{v}(t), \overline{h}(t), t], \quad (6)$$

де $\overline{y}(t) = \{y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t)\}$ – вектор стану покриття доріг у зимовий період; $\overline{v}(t) = \{v_1(t), v_2(t), \dots, v_n(t)\}$ – вектор дії зовнішнього середовища (погоднокліматичні параметри); F_s – закон функціонування системи; $\overline{h}(t) = \{h_1(t), h_2(t), \dots, h_n(t)\}$ – вектор власних параметрів системи (дорожні і транспортні параметри); t – час.

При оцінці екологічної ситуації в придорожній смузі вектор стану покриття буде вже власним параметром підсистеми Д – А – НС, що визначає рівень забруднення. Закон функціонування цієї підсистеми аналогічним чином представимо деяким узагальненим оператором F_y , який перетворить набір внутрішніх, незалежних параметрів підсистеми (метеорологічних і дорожніх факторів) у зовнішні, залежні для оцінки екологічної ситуації у придорожній смузі:

$$\overline{e}(t) = F_y[\overline{v}(t), \overline{h}(t), \overline{y}(t), t], \quad (7)$$

де $\overline{e}(t)$ – вектор зовнішніх, залежних, параметрів, використовуваних для оцінки екологічної ситуації; F_y – закон функціонування підсистеми Д – А – НС.

При оцінці екологічної ситуації в придорожній смузі вектор стану дорожнього покриття $\overline{y}(t)$ буде одним із власних дорожніх параметрів системи, який впливає, як і всі інші, на рівень забруднення навколишнього середовища в

зимовий період. У виразі (7) він виділений окремо, оскільки є результатом моделювання.

Для оцінки екологічної ситуації в зимовий період будемо враховувати наступні параметри: $H_i(t)$ – забруднення придорожньої території протижеледними матеріалами (ПОМ); $Q_i(t)$ – концентрація викидів основних газоподібних забруднювачів транспортними засобами при i -му стані дорожнього покриття.

Таким чином, вектор зовнішніх параметрів набуде вигляду:

$$\overline{e}(t) = \{\overline{H}(t), \overline{Q}(t)\}. \quad (8)$$

Рівняння (6) - (8) є динамічними математичними моделями, що відображають поведінку системи в часі. Оператори F_S і F_y можуть бути представлені у вигляді системи рівнянь, логічних співвідношень, наявних емпіричних і аналітичних залежностей, що зв'язують вхідні і вихідні параметри підсистеми Д – А – НС, словесного опису відповідності і т. д.

Результати розрахунків Для можливості використання запропонованої математичної моделі було здійснено перевірку її адекватності на тестових задачах, для яких існують експериментальні аналоги. При цьому максимальна відносна похибка не перевищила 18%, що дає можливість рекомендувати запропоновані математичні моделі для розв'язання конкретних прикладних задач.

На наступному етапі роботи було проведено дослідження впливу різних факторів на екологічний стан придорожньої смуги. Зокрема досліджено вплив різних станів покриття на екологічний стан придорожньої смуги (рис.2, 3). Бачимо, що найвищі рівні забруднення придорожньої смуги спостерігаються при ожеледі, а найменші – при сухому покритті.

На основі проведених розрахунків та аналізу експериментальних даних було встановлено закони розподілу СО та NO₂ в повітрі придорожньої смуги. Для цього було побудовано відповідні гістограми

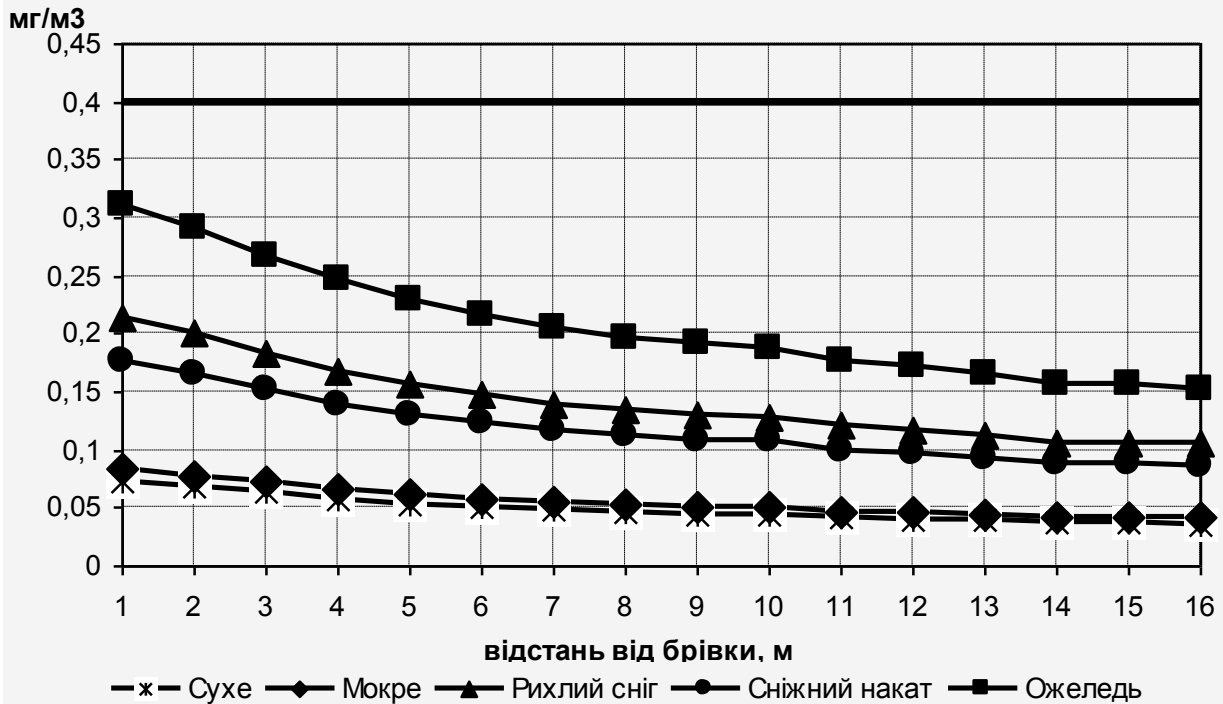


Рисунок 2 - Графіки розподілу приземних концентрацій NO₂ в придорожній смузі при різних станах покриття

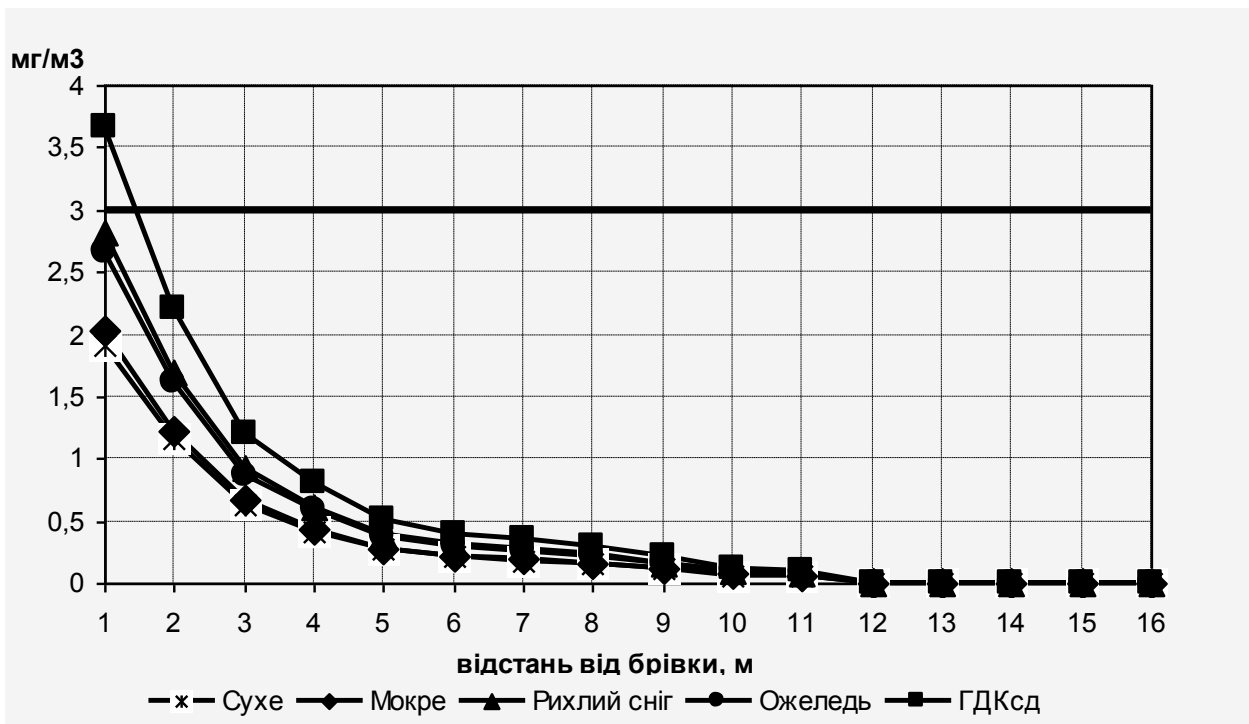


Рисунок 3 - Графіки розподілу приземних концентрацій CO в придорожній смузі при різних станах покриття

Результати статичної обробки одержаних даних наведено в таблицях (табл.2,3)

Таблиця 2 - Результати статистичної обробки концентрації викидів CO при різних станах дорожнього покриття в зимовий період

Стан покриття	Закон розподілу концентрації викидів CO	Параметри закону	Концентрація викидів CO, мг/м ³			
			Середнє значення	Довірчий інтервал розкиду середнього значення для довірчої ймовірності		
				0,85	0,90	0,95
Сухе	Нормальний	$\bar{x}=1,740$ $\sigma=0,795$	1,740	0,717+ +2,763	0,576+ +2,904	0,350+ +3,132
Мокре	Нормальний	$\bar{x}=1,835$ $\sigma=0,816$	1,835	0,756+ +2,914	0,607+ +3,063	0,367+ +3,303
Сніжний накат	Показниковий	$\mu=0,413$	2,420	0,997+ +3,843	0,800+ +4,040	0,484+ +4,356
Ожеледь	Показниковий	$\mu=0,301$	3,320	1,368+ +5,272	1,096+ +5,544	0,662+ +5,978
Рихлий сніг	Показниковий	$\mu=0,392$	2,550	1,050+ +4,050	0,843+ +4,256	0,512+ +4,588

Таблиця 3 - Результати статистичної обробки концентрації викидів NO₂ при різних станах дорожнього покриття в зимовий період

Стан покриття	Закон розподілу концентрації викидів NO ₂	Параметри закону	Концентрація викидів NO ₂ , мг/м ³			
			Середнє значення	Довірчий інтервал розкиду середнього значення для довірчої ймовірності		
				0,85	0,90	0,95
Сухе	Показниковий	$\mu=16,97$	0,050	0,021+ +0,079	0,017+ +0,083	0,010+ +0,090
Мокре	Показниковий	$\mu=17,54$	0,057	0,024+ +0,090	0,019+ +0,095	0,012+ +0,103
Сніжний накат	Нормальний	$\bar{x}=0,138$ $\sigma=0,063$	0,138	0,057+ +0,219	0,046+ +0,230	0,028+ +0,248
Ожеледь	Показниковий	$\mu=4,12$	0,243	0,100+ +0,386	0,081+ +0,405	0,049+ +0,437
Рихлий сніг	Нормальний	$\bar{x}=0,166$ $\sigma=0,076$	0,166	0,068+ +0,263	0,055+ +0,277	0,033+ +0,299

Висновки

1. На сьогодні дорожньо-транспортний комплекс є одним з найбільш небезпечних забруднювачів навколишнього середовища, що обумовлює необхідність вирішення проблем екологічної безпеки як на стадії проектування, так і в процесі експлуатації автомобільних доріг.

2. На формування транспортного забруднення придорожньої смуги здійснюють вплив три групи факторів: дорожні, природно-кліматичні і транспортні.

3. В рамках системного підходу запропоновано математичну модель для оцінки екологічного стану придорожньої смуги в зимовий період року.

4. Проведено порівняння результатів чисельних розрахунків з експериментальними даними «ДерждорНДІ» ім. М.П.Шульгіна і отримано задовільний їх збіг.

5. Найвищий рівень забруднення придорожньої смуги в зимовий період року спостерігається при ожеледі, найменший – при сухому покритті.

6. На основі статистичного аналізу встановлено закони розподілу концентрацій CO і NO₂ у придорожній смузі при різних станах покриття.

Література

1. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. – Л., 1975. – 448 с.

2. Буренин Н.С. Исследование загрязнения атмосферы выхлопными газами автотранспорта. Автореф. к.т.н. Гл. упр. Гидрометеорологической службы при Совмине СССР, Гл. Геофизическая обсерватория им. Воейкова. – Л., 1977. – 18 с.

3. Васильев А.П. Проектирование дорог и влияние климата на условия движения. – М.; 1986. – 248 с.

4. Скорченко В.Ф. Дослідження впливів дорожніх умов на забруднення навколишнього середовища автомобілями: Автореф. к.т.н. / КАДІ, К., 1980. – 229 с.

5. Сеттон С.Г. Микрометеорология (пер. с англ.). – Л., 1958. – 35 с.

Самодурова Т.В. Организация борьбы с зимней скользкостью на автомобильных дорогах по данным прогноза: Автореф. к.т.н. / МАДИ, М., 1992. – 235 с.