

## МОДЕЛЮВАННЯ РІВНЯ ЗАБРУДНЕННЯ МІСТ ШЛЯХОМ УПРАВЛІННЯ ПАРАМЕТРАМИ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКУ

*Самойленко Є.С.*, Національний транспортний університет, Київ, Україна, [sirius27@ukr.net](mailto:sirius27@ukr.net),  
[orcid.org/0000-0001-8352-2282](https://orcid.org/0000-0001-8352-2282)

## MODELING THE LEVEL OF URBAN POLLUTION BY CONTROLLING THE PARAMETERS OF THE TRAFFIC FLOW

*Samoylenko E.S.*, National Transport University, Kyiv, Ukraine, [sirius27@ukr.net](mailto:sirius27@ukr.net), [orcid.org/0000-0001-8352-2282](https://orcid.org/0000-0001-8352-2282)

**Постановка проблеми.** Досягнення екологічної безпеки міста в значній мірі визначає якість проживання населення, комфортність умов для усіх видів людської діяльності. Однією з найбільш небезпечних екологічних проблем міст є забруднення атмосферного повітря [1].

Місто Київ має високі показники рівня забруднення атмосфери, що пояснюється значним рівнем індустріалізації, стрімким розвитком автопарку міста. Загальний обсяг викидів забруднюючих речовин від стаціонарних джерел у 2020 р. склав 25,5 тис. т., від пересувних майже в 9 разів більше – 225,8 тис. т. Щільність викидів у м. Києві складає 299,5 т/км<sup>2</sup>.

На сьогоднішній день автомобільний транспорт є основним антропогенним джерелом забруднення довкілля. Динаміка світового автопарку вказує, що рівень автомобілізації в країнах із розвинутою економікою постійно зростає. Рівень автомобілізації в Україні, на сьогодні, становить у середньому 187 автомобілів на 1000 жителів країни. Найбільші рівні автомобілізації спостерігаються в Київській, Запорізькій, Волинській, Дніпропетровській, Одеській, Харківській областях. Місто Київ має найвищий показник – 343 автомобілів на 1000 жителів.

Специфіка забруднення атмосферного повітря транспортними потоками полягає в їх приземному розташуванні, безпосередній близькості до житла людей, що призводить до накопичення забруднюючих речовин поблизу поверхні землі – у зоні дихання людей. Рівень концентрації забруднюючих речовин, які утворюються в приземному шарі атмосфери, має просторово-часову неоднорідність, що пояснюється такими чинниками: інтенсивність, склад транспортного потоку, метеорологічні умови, геометричні характеристики вулично-дорожньої мережі (ВДМ), рельєф місцевості, наявність зелених насаджень, регульованих перехресть, просторова орієнтація вулиці тощо [2].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Оцінка екологічного стану атмосферного повітря здійснюється за допомогою математичного моделювання та натурних спостережень. Завдяки математичним моделям, які проводять розрахунки викидів забруднюючих речовин та їх розсіювання в атмосфері, можна здійснювати не лише оцінку рівня забруднення атмосфери, а також прогнозувати якість стану повітря та визначати стратегії скорочення викидів забруднюючих речовин. На сьогоднішній день багато моделей розсіювання забруднюючих речовин в атмосферному повітрі не можуть бути використанні для оперативного визначення концентрації поллютантів у місті, оскільки розрахунки потребують значних часових витрат. Крім того, більшість моделей при оцінці рівня забруднення використовують значні просторово-часові осереднення, при цьому не враховуються мікрокліматичні особливості міста, рельєф місцевості, тощо. Основними підходами до визначення рівня забруднення атмосфери автомобільним транспортом є методи на основі Гаусових моделей: CALINE-4 (California Line Source Model), Roadway 2.0, Hiway-2; GFLSM (General Finite Line Source Model) тощо; моделі міських каньйонів. Найбільш поширеними серед моделей міських каньйонів є; STREET (Johnson et al., USA, 1973); Canyon Plum Box Model (Yamartino et al., 1986); Operational Street Pollution Model (Berkowicz, 1996). Модель OSPM оцінює концентрацію забруднюючих речовин від транспортних потоків у вуличних каньйонах з врахуванням метеорологічних умов, геометричних характеристик вуличних каньйонів, а також в моделі враховується механічна турбулентність, створена рухом транспортних засобів [3,4].

**Метою роботи** є моделювання рівня забруднення вулично-дорожньої мережі міста Києва в залежності від параметрів транспортного потоку, та управління його екологічного станом.

**Результати дослідження.** Для вирішення задачі оперативної оцінки рівня забруднення атмосферного повітря міста Києва ВДМ представлена множиною елементарних однорідних вуличних каньонів, які є типовими архітектурно-планувальними елементами міста і являють собою ділянки з забудовами між найближчими перехрестями. ВДМ Печерського району міста Києва налічує 377 вуличних каньонів, для яких емпірично були встановлені просторово-геометричні характеристики [5].

Основними динамічними чинниками, що впливають на рівень забруднення атмосфери автомобільним транспортом є показники дорожнього руху. Дорожній рух характеризується рядом показників, таких як: пропускна здатність автомобільної дороги; інтенсивність транспортного потоку; щільність транспортного потоку; швидкість руху транспортного потоку; склад транспортного потоку; затримки руху транспортного потоку; рівень завантаження автомобільної дроги [6]. Управління параметрами транспортного потоку дозволяє прогнозувати якість стану атмосферного повітря та попереджати критичні ситуації, при яких рівень забруднення перевищує гранично-допустимі значення [7].

Оцінка та прогнозування рівня забруднення атмосферного повітря у вуличних каньонах від транспортних потоків проводилася на основі методології моделі Operational Street Pollution Model, яка заснована на гаусівському типу розсіювання забруднюючих речовин в поєднанні з характеристиками ВДМ міст. Згідно даної моделі концентрація забруднюючих речовин визначається в межах вуличного каньону і дорівнює сумі концентрації прямого розсіювання поллютантів ( $C_d$ ), концентрації спричиненою рециркуляцією повітря у вуличному каньоні ( $C_r$ ) та міською фоновою концентрацією ( $C_o$ ) [8].

Концентрація прямого розсіювання забруднюючих речовин від транспортного потоку дорівнює:

$$C_d = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int \frac{Q dx}{U_s W \sigma_z(x)} \quad (1)$$

$Q$  – інтенсивність викидів забруднюючих речовин від “ефективного” транспортного потоку, мг/м<sup>3</sup>·с;

$U_s$  – швидкість вітру на рівні вулиці, м/с;

$W$  – ширина вуличного каньону, м;

$\sigma_z(x)$  – параметр вертикальної дисперсії на відстані  $x$  від джерела викиду;

Зона рециркуляції характеризується надходженням забруднюючих речовин з іншої частини вуличного каньону та визначається довжиною турбулентного вихору, геометричними показниками каньону. Концентрація від рециркуляції забруднюючих речовин в межах вуличного каньону визначається наступним чином:

$$C_r = \frac{Q \cdot l_r}{W \cdot (\omega_t \cdot l_t + \omega_s \cdot l_s)} \quad (2)$$

де  $l_r, l_t, l_s$  – геометричні характеристики зони рециркуляції;

$\omega_t, \omega_s$  – швидкість розсіювання забруднюючих речовин відповідно через верхню та бокову частину вуличного каньону, м/с.

На рис. 1 побудовано зміну концентрації оксиду вуглецю в залежності від швидкості вітру на рівні даху будівель (швидкості вітру, що визначається глобальним перенесенням повітряних мас і не залежить від шорсткості поверхні) та інтенсивності транспортного потоку в одному з найтипівіших вуличних каньонів (вул. І.Мазепи) Печерського району.

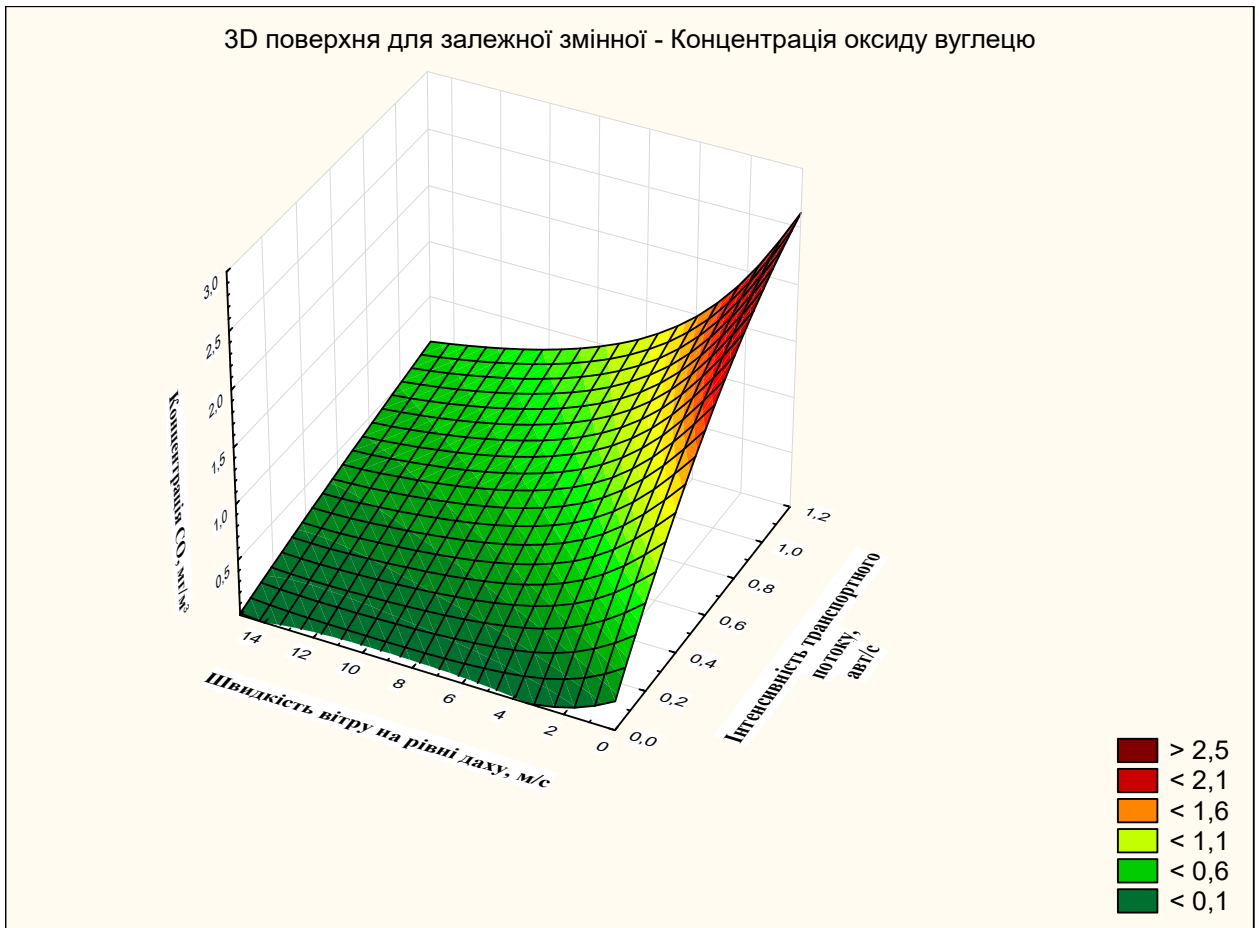


Рисунок 1 – Залежність концентрації оксиду вуглецю від швидкості вітру та інтенсивності транспортного потоку (вул. І. Мазепи)  
 Figure 1 – Dependence of carbon monoxide concentration on wind speed and intensity of traffic flow (I. Mazepa Street)

Найвища концентрація забруднюючих речовин у вуличному каньйоні спостерігається при інтенсивності руху більшою за 0,8 авт/с, та швидкості вітру від 0 до 4 авт/с. За таких умов концентрація оксидів вуглецю перевищує 2 мг/м<sup>3</sup>.

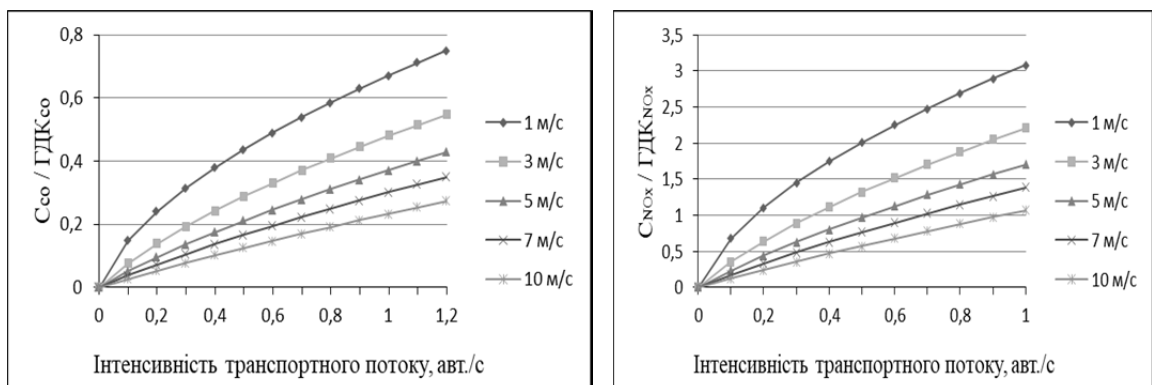


Рисунок 2 – Рівень забруднення CO та NO<sub>x</sub> для різних швидкостей вітру (вул. І. Мазепи)  
 Figure 2 – Level of CO and NO<sub>x</sub> pollution for different wind speeds (I. Mazepa Street)

Для кожної забруднюючої речовини встановлені нормативні гранично допустимі значення концентрації (ГДК). Виділяють максимально-разові, середньодобові та ГДК у робочій зоні.

Основною характеристикою небезпеки шкідливої речовини є максимальна разова ГДК, що встановлюється з метою попередження рефлекторних реакцій людини при короткочасній дії (до 20 хв.) полютантів.

На рис. 2 визначено рівень забруднення вуличного каньйону в залежності від швидкості вітру на рівні даху та інтенсивностями руху транспортного потоку. Так, при швидкості вітру 5 м/с та інтенсивності руху вищою ніж 0,5 авт/с концентрація оксидів азоту перевищить гранично допустимі значення; при швидкості вітру 1 м/с перевищення концентрації оксидів азоту буде спостерігатися вже при інтенсивності 0,2 авт/с.

Оскільки вуличні каньйони міста мають різні просторово геометричні характеристики: ширину, довжину, просторову орієнтацію каньйону, суцільність та композицію забудови (середньозважена висота забудов, щільність забудов, середній кут повороту будинків до осі вулиці), відповідно і рівень забруднення, при однакових інтенсивностях руху транспортного потоку та швидкості вітру, в них буде відрізнятися. У зв'язку з цим, для кожного вуличного каньйону було встановлено такі інтенсивності руху при яких рівень забруднення відповідною шкідливою речовиною досягає гранично допустимого значення (критичні інтенсивності руху транспортних потоків ( $I_{кр}$ )). У таблиці 1 наведено для деяких вуличних каньйонів значення інтенсивностей транспортних потоків при яких концентрація  $NO_x$  досягає гранично допустимих значень.

Таблиця 1 – Критична інтенсивність транспортного потоку, в залежності від швидкості вітру, за якої концентрація  $NO_x$  досягає гранично допустимих значень

Table 1 – The critical intensity of the traffic flow, depending on the wind speed, at which the  $NO_x$  concentration reaches the maximum permissible values

<b>Вуличний каньйон</b>	<b>Критичні інтенсивності транспортних потоків (<math>I_{кр}</math>), авт/с</b>				
	1 м/с	3 м/с	5 м/с	7 м/с	10 м/с
1.Липський провулок	0,1	0,21	0,31	0,42	0,57
2. вул. Липська; буд. 15, 16	0,095	0,2	0,3	0,39	0,54
3. вул. Пилипа Орлика; буд. 3, 4	0,115	0,24	0,355	0,47	0,645
...					
365. вул. Мічуріна; буд. 50, 52	0,135	0,28	0,425	0,565	0,775
366. вул. Землянська; буд. 5, 6	0,105	0,215	0,325	0,435	0,595
377. вул. Пирятинська; буд. 12, 19	0,113	0,234	0,355	0,475	0,655

Таким чином, встановлені значення критичної інтенсивності руху транспортного потоку дозволяють оперативно прогнозувати рівень забруднення атмосферного повітря придорожного простору та своєчасно, шляхом управління параметрами транспортного потоку, попереджати небезпечні ситуації за яких рівень забруднення перевищує нормативні значення [8].

На рис. 3 наведено значення критичних інтенсивностей руху транспортного потоку для вулиці І. Мазепи при різних швидкостях вітру. При швидкості вітру 5 м/с гранично допустима концентрація

забруднюючих речовин досягається при інтенсивності транспортного потоку 0,43 авт/с для оксидів азоту; 0,52 авт/с для вуглеводнів та 3,8 авт/с для оксиду вуглецю.

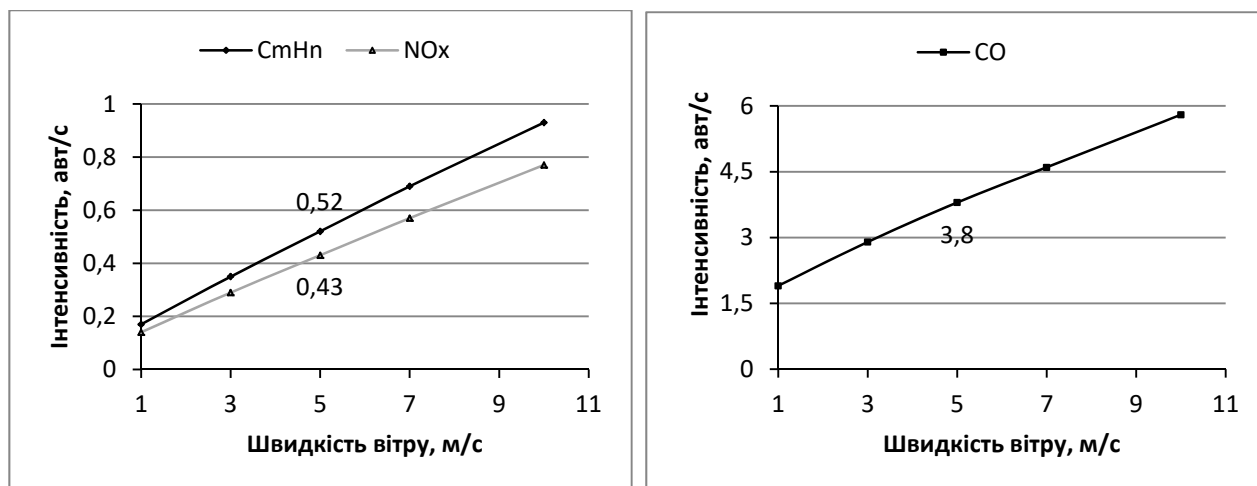


Рисунок 3 – Критичні значення інтенсивності транспортного потоку (вул. І. Мазепи)  
Figure 3 – Critical values of the intensity of traffic flow (I. Mazepa Street)

**Висновок.** Проаналізовано основні методи оцінки рівня забруднення атмосфери міст автомобільним транспортом. На основі моделі міських вуличних каньонів (OSPM) визначено рівень забруднення вуличних каньонів Печерського району м. Києва основними шкідливими речовинами, що містяться у відпрацьованих газах автомобілів. Для кожного з вуличних каньонів встановлено критичні інтенсивності руху транспортного потоку за яких рівень забруднення відповідною шкідливою речовиною досягає гранично допустимого значення. Результати дослідження дозволяють оперативно прогнозувати рівень забруднення атмосферного повітря придорожнього простору міст та, шляхом управління параметрами транспортного потоку, попереджати небезпечні ситуації.

#### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Абрамовський Є.Р., Карплюк В.І., Переметчик М.М. Атмосфера великих міст. Вид. 2-е, доповнене і виправлене – Дн-ськ.: Наука і освіта, 2011. – 350 с.
2. Гутаревич Ю.Ф., Зеркалов Д.В., Говорун А.Г., Корпач А.О., Мерзиевська Л.П. Екологія та автомобільний транспорт: Навчальний посібник. – К.: Арістей, 2006. – 292с.
3. R. Berkowicz, M. Ketznel, S. S. Jensen, M. Hvidberg, O. Raaschou-Nielsen, Evaluation and application of OSPM for traffic pollution assessment for a large number of street locations. Environ. Model. Softw. 2008, 23, 296. doi:10.1016/J.ENVSOF.2007.04.007
4. Berkowicz R. OSPM – a parameterized street pollution model // Kluwer Academ. Publishers. Netherlands. Environmental Monitoring and assessment. – 2000. – Vol. 65. – P. 341-359.
5. Бакуліч О.О., Олійник Р.В., Самойленко Є.С. Потенційна екологічна небезпека вуличних каньонів міста. Вісник Національного транспортного університету. – К.:НТУ, 2015. – Вип. (1) 31.
6. Поліщук В.П. Теорія транспортного потоку: методи та моделі організації дорожнього руху: навч. посіб. / В.П. Поліщук, О.П. Дзюба. – К. : Знання України, 2008. – 175 с.
7. Бакуліч О.О., Самойленко Є.С. Динаміка рівня забруднення урбанізованих територій. Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науково-технічний збірник. 2021. Випуск 1 (48). С. 12-19. URL: <http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/48/012-019.pdf>
8. Бакуліч О.О., Гребельник М.М., Самійленко Є.С. Управління екологічною безпекою мегаполісу. Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науково-технічний збірник. 2022. Випуск 1 (51). С. 12-20. DOI: 10.33744/2308-6645-2022-1-51-020-027 URL: <http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/48/012-019.pdf>

#### REFERENCES

1. Abramovs'kij Є.Р., Karplyuk V.I., Peremetchik M.M. *Atmosfera velikih mist* [Atmosphere of big cities]. Dn-sk.: Science and Education, 2011. – 350 p.

2. Gutarevich Yu. F., Zerkalov D. V., Govorun A. G., Korpach A. A., Merzhyevska L.P. (2006) *Ekologhija ta avtomobiljnyj transport* [Ecology and road transport: Manual]. – K.: Aristey, 292p. (ukr)
3. R. Berkowicz, M. Ketzel, S. S. Jensen, M. Hvidberg, O. Raaschou-Nielsen, Evaluation and application of OSPM for traffic pollution assessment for a large number of street locations. *Environ. Model. Softw.* 2008, 23, 296. doi:10.1016/J.ENVSOF.2007.04.007 (eng)
4. Berkowicz R. OSPM – a parameterized street pollution model // Kluwer Academ. Publishers. Netherlands. *Environmental Monitoring and assessment.* – 2000. – Vol. 65. – P. 341-359 (eng)
5. Bakulich O.O., Oliynyk R.V., Samoilenko E.S. *Potentsiyna ekologichna nebezpeka vulychnykh kanyoniv mista* [Potential environmental hazards of street canyons]. *Visnyk natsionalnogo transportnogo universytetu* [Visnyk National Transport University]. – Kyiv, National Transport University Publ. 2014. – Vol. 31. (ukr)
6. Polishchuk V.P., Dzyuba O.P. *Teoriya transportnoho potoku: metody ta modeli orhanizatsiyi dorozhn'oho rukhu* [Traffic flow theory: methods and models of traffic organization] Kiev, Knowledge of Ukraine Publ., 2008. 175 p.
7. Bakulich O.O., Samoilenko E.S. (2021) *Dynamika rivnja zabrudnennja urbanizovanykh terytorij* [Dynamics of pollution level of urbanized territories]. *Visnyk National Transport University.* – Kyiv, National Transport University – Vol. 1 (48). URL: <http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/48/012-019.pdf> (ukr)
8. Bakulich O.O., Grebelnik M.M., Samoilenko E.S. (2022) *Upravlinnia ekolohichnoiu bezpekoiu mehapolisu* [Environmental security management of the megapolis]. *Visnyk National Transport University.* – Kyiv, National Transport University – Vol. 1 (51). URL: <http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/48/012-019.pdf> (ukr)

#### РЕФЕРАТ

Самойленко Є.С. Моделювання рівня забруднення міст шляхом управління параметрами транспортного потоку / Є.С. Самойленко // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науковий журнал. – К.: НТУ, 2022. – Вип. 3 (53).

Стаття присвячена оцінці та прогнозуванню рівня забруднення атмосферного повітря вуличних каньонів м. Києва шляхом управління параметрами транспортного потоку. На сьогоднішній день автомобільний транспорт є основним антропогенним джерелом забруднення довкілля. Специфіка забруднення атмосферного повітря транспортними потоками полягає в їх приземному розташуванні, безпосередній близькості до житла людей, що призводить до накопичення забруднюючих речовин поблизу поверхні землі – у зоні дихання людей.

Об'єкт дослідження – прогнозування рівня забруднення вуличних каньонів міст.

Мета роботи – моделювання рівня забруднення вулично-дорожньої мережі міста Києва в залежності від параметрів транспортного потоку, та управління його екологічного станом.

Методи дослідження – статистичні методи, математичне моделювання.

У статті проаналізовано основні підходи щодо моделювання розсіювання забруднюючих речовин в атмосфері від автомобільного транспорту. Оцінку рівня забруднення атмосфери міст доцільно проводити в однорідних елементах міської території – вуличних каньонах. На основі моделі міських вуличних каньонів (OSPM) визначено рівень забруднення вуличних каньонах Печерського району м. Києва основними шкідливими речовинами, що містяться у відпрацьованих газах автомобілів. Встановлено критичні інтенсивності руху транспортних потоків для кожного з вуличних каньонів при яких рівень забруднення відповідною шкідливою речовиною досягає гранично допустимого значення.

Таким чином, отримані результати дослідження дозволяють оперативно прогнозувати рівень забруднення атмосферного повітря придорожнього простору міст та попереджати екологічно небезпечні ситуації шляхом управління параметрами транспортного потоку.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА, ВУЛИЧНО-ДОРОЖНЯ МЕРЕЖА, ТРАНСПОРТНІ ПОТОКИ, ВУЛИЧНИЙ КАНЬЙОН, РІВЕНЬ ЗАБРУДНЕННЯ, ГРАНИЧНО ДОПУСТИМА КОНЦЕНТРАЦІЯ.

#### ABSTRACT

Samoylenko E.S. Modeling the level of urban pollution by controlling the parameters of the traffic flow. *Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific journal.* – Kyiv: National Transport University, 2022. – Issue 3 (53).

The article is devoted to the assessment and forecasting of the level of atmospheric air pollution in the street canyons of Kyiv by means of traffic flow parameters management. Today, road transport is the main anthropogenic source of environmental pollution. The specificity of atmospheric air pollution by traffic flows lies in their surface location, close proximity to people's homes, which leads to the accumulation of pollutants near the surface of the earth – in the breathing zone of people.

The object of research is forecasting the level of pollution in street canyons of cities.

The purpose of the work is modeling the level of pollution of the street network of Kyiv depending on the parameters of the traffic flow, and managing its environmental condition.

Research methods – statistical methods, mathematical modeling.

The article analyzes the main approaches to modeling the dispersion of pollutants in the atmosphere from road transport. It is advisable to assess the level of pollution of the city atmosphere in homogeneous elements of the city territory – street canyons. Based on the model of urban street canyons (OSPM), the level of pollution of the street canyons of the Pechersk district of Kyiv by the main harmful substances contained in the exhaust gases of cars was determined. The article establishes the critical intensities of traffic flows for each of the street canyons at which the level of pollution by the corresponding harmful substance reaches the maximum permissible value.

Thus, the obtained results of the study make it possible to quickly forecast the level of atmospheric air pollution in the roadside space of cities and to warn of environmentally dangerous situations by managing traffic flow parameters.

**KEY WORDS:** ENVIRONMENTAL SAFETY, STREET ROAD NETWORK, TRANSPORT FLOWS, STREET CANYON, POLLUTION LEVEL, MAXIMUM PERMISSIBLE CONCENTRATION.

**АВТОРИ:**

Самойленко Є.С., Національний транспортний університет, асистент кафедри менеджменту, e-mail: sirius27@ukr.net, тел. +380988088008, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка 1, к.242.

**AUTHOR:**

Samoylenko E.S., postgraduate, National Transport University, assistant department of management, e-mail: sirius27@ukr.net, tel. +380988088008, Ukraine, 01010 Kyiv, M. Omelyanovich-Pavlenko str.1, k.242.

**РЕЦЕНЗЕНТИ:**

Голубкова І.А., доктор економічних наук, професор, завідувач кафедри економічної теорії та підприємництва на морському транспорті, Навчально-науковий інститут морського права та менеджменту Національного університету «Одеська морська академія», Одеса, Україна.

Бакуліч О.О., кандидат технічних наук, професор, Національний транспортний університет, декан факультету менеджменту, логістики та туризму, Національний транспортний університет, Київ, Україна.

**REVIEWER:**

Golubkova IA, Doctor of Economics, Professor, Head of the Department of Economic Theory and Entrepreneurship in Maritime Transport, Educational and Scientific Institute of Maritime Law and Management of the National University "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine.

Bakulich O.O. Ph.D., (engineering), Professor, National Transport University, Dean of the Faculty of Management, logistics and tourism